

Міністерство освіти і науки України
Технічний коледж Луцького НТУ



ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Курс лекцій
для студентів спеціальності
5.05070103 «Електропостачання»
денної форми навчання

Луцьк
РВВ Луцького НТУ
2016

УДК 621. 3 (07)
Е 87

До друку _____ Голова Навчально-методичної ради Луцького НТУ

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій Луцького НТУ

_____ директор бібліотеки.

Затверджено Навчально-методичною радою Луцького НТУ,
протокол № _ від « » _____ 2016 року.

Рекомендовано до видання Навчально-методичною радою Технічного коледжу Луцького НТУ, протокол № __ від « » _____ 2016 року.
_____ Голова Навчально-методичної ради коледжу

Розглянуто і схвалено на засіданні циклової комісії викладачів зі спеціальності «Електропостачання» Технічного коледжу Луцького НТУ,
протокол № __ від « » _____ 2016 року.

Укладач: _____ В.В. Лишук, кандидат технічних наук, доцент
Луцького НТУ

Рецензент: _____ Н.В. Коменда, кандидат фізико-математичних наук,
доцент Луцького НТУ

Відповідальний
за випуск _____ Т.М. Бондарук, заст. дир. з НВЧ Технічного
коледжу Луцького НТУ

Електричні машини [Текст]: Курс лекцій для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання / уклад. Лишук В.В. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2016. – 120 с.

Призначене для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання.

© В.В. Лишук, 2016

Передмова

Виробленням, розподілом, передачею і споживанням електричної енергії займатимуться у своїй практичній діяльності майбутні спеціалісти за спеціальністю “Електропостачання”.

Оскільки електрична енергія виробляється і споживається переважно електричними генераторами, двигунами і трансформаторами, то курс електричних машин є одним з основних у підготовці спеціалістів за напрямком “Електротехніка”.

Метою вивчення курсу “Електричні машини” є надання студентам теоретичних знань в галузі теорії електромеханічного перетворення електроенергії та вміння використовувати їх в практичній діяльності.

Завданням курсу електричних машин є: вивчення основних конструктивних особливостей різних типів електричних машин і трансформаторів; фізичних явищ, що відбуваються в них при різних режимах роботи; принципу дії електричних машин загального призначення; фізичної суті параметрів електричних машин і трансформаторів та їх впливу на експлуатаційні показники машин; поведінку машин в усталених і перехідних режимах та їх вплив на роботу електротехнічних систем.

Теорія електричних машин базується на таких предметах: вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки, електротехнічні матеріали, основи метрології і вимірювання.

В свою чергу, знання, набуті при вивченні електричних машин, будуть базовими для вивчення таких профільюючих дисциплін як електричні станції і підстанції, електромагнітні перехідні процеси, електропривод, електромеханічні перехідні процеси, електропостачання, оскільки електричні машини є найбільш розповсюдженими елементами будь-якої електротехнічної системи.

В нашому викладі курс лекцій з дисципліни “Електричні машини” складається з двох частин. До першої частини входять три розділи: трансформатори, загальні питання теорії машин змінного струму, асинхронні машини.

У кожному розділі вивчаються питання, що мають найбільш важливе значення для студентів за спеціальністю “Електропостачання”.

ТЕМА 1. ТРАНСФОРМАТОРИ

1.1. Призначення, область застосування і номінальні дані трансформаторів

Трансформатором називається статичний індуктивний перетворювач, що має дві або більше індуктивно зв'язаних взаємо нерухомих обмоток і призначений для перетворення за допомогою магнітного поля однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну), що має інші характеристики, зокрема, напругу та струм. В більшості випадків за допомогою трансформатора перетворюються тільки напруга і струм без зміни частоти і числа фаз.

Існування індуктивного зв'язку між двома обмотками виявив в 1811 р. англійський фізик-експериментатор Майкл Фарадей. Відкритий ним закон електромагнітної індукції лежить в основі роботи електричних машин всіх типів. Вперше трансформацію змінного струму за допомогою найпростішого двообмоткового трансформатора з розімкненим магнітопроводом здійснив російський вчений П.Н.Яблочков у 1876 р. Початок промислового застосування трансформатора для підвищення напруги при передачі електроенергії змінного струму був покладений розробкою у 1884 році братами Джоном і Едуардом Гопкінсами трансформаторів із замкненим магнітопроводом, промисловий випуск яких налагодив електромашинобудівний завод в Будапешті.

Трансформатор, що має дві електрично незв'язані між собою обмотки, називається двообмотковим. Обмотка, що споживає енергію з електричної мережі, називається первинною, а обмотка, що віддає енергію споживачу, – вторинною. Існують багатообмоткові трансформатори, які мають декілька первинних і вторинних обмоток.

Залежно від кількості фаз розрізняють однофазні, трифазні і багатофазні трансформатори. Найбільшого розповсюдження набули однофазні і трифазні трансформатори. Трансформатори з іншим числом фаз використовуються в спеціальних пристроях.

Залежно від охолодження трансформатори поділяються на сухі і масляні.

Трансформатори призначаються:

1. *Для пересилання і розподілу електричної енергії.*

Джерела електричної енергії (електричні станції) переважно будують поблизу природних джерел, а споживачі знаходяться за сотні

кілометрів від них. На електростанціях енергія виробляється за допомогою турбо- або гідрогенераторів напругою до 18,5 кВ. Для зменшення втрат потужності в провідниках і зменшення перерізу проводів лінії електропередачі напругу лінії підвищують до 750 кВ і більше. Тому на підстанціях електростанцій встановлюють трансформатори, що підвищують напругу до необхідної величини (110, 220, 110, 400, 750 кВ). Оскільки більшість споживачів споживають енергію напругою 127, 220, 180 і 660 В (в окремих випадках 6 кВ), то виникає необхідність у встановленні ряду понижувальних трансформаторів. Таким чином, при передачі електричної енергії на великі відстані величина напруги повинна багатократно змінюватись. Тому сумарна встановлена потужність трансформаторів в потужних електричних системах в 5-7 разів перевищує встановлену потужність електричних генераторів.

Трансформатори, що призначені для перетворення електричної енергії в енергосистемах, називають силовими трансформаторами. Вони мають потужність до 1000000 кВА і напругу до 1150 кВ.

2. Для забезпечення необхідної схеми вмикання вентилів в перетворюючих пристроях.

В вентильних випрямлячах змінного струму або перетворення його з постійного в змінний, відношення напруги на вході і виході залежить від схеми вмикання вентилів. Тому при поданні на вхід стандартної напруги напруга на виході буде нестандартною. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі постачаються трансформаторами, що забезпечують на виході стандартну напругу при заданій схемі вмикання вентилів. Трансформатори, що використовуються з цією метою, називають перетворюючими. Вони мають потужність сотні тисяч кВА і напругу до 110 кВ.

3. Для різних технологічних процесів: зварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок і ін. Вони мають потужність десятки тисяч кВА при напрузі до 10 кВ.

4. Для вмикання електровимірювальних приладів (електровимірювальні трансформатори) і деяких апаратів (реле та ін.) в електричні кола високої напруги або в кола, де протікають великі струми, з метою розширення границь вимірювання та забезпечення електробезпеки.

Трансформатори виготовляються за технічними умовами або згідно вимог стандартів і призначені виробником для виконання певних функцій по перетворенню електричної енергії.

Параметри, що відносяться до того режиму роботи, для якого трансформатор призначений виробником, називаються номінальними. При цих параметрах трансформатор може як завгодно довго працювати, не перегріваючись вище від допустимих норм.

В паспорті трансформатора (заводська табличка, що кріпиться до трансформатора) вказують наступні номінальні величини:

1. Номінальна первинна лінійна напруга U_{1H} .

2. Номінальна вторинна лінійна напруга U_{2H} на розімкненій вторинній обмотці при живленні первинної обмотки напругою U_{1H} , номінальної частоти.

3. Номінальний лінійний струм I_{1H} первинної обмотки.

4. Номінальну потужність S_H , під якою розуміють повну потужність трансформатора на затискачах вторинної обмотки. Для двообмоткових трансформаторів номінальна потужність первинної обмотки S_{1H} приймається рівною номінальній потужності вторинної обмотки S_{2H} і дорівнює номінальній потужності трансформатора S_H , $S_{1H} = S_{2H} = S_H$.

5. Номінальний лінійний струм вторинної обмотки I_{2H} .

Номінальні струми визначаються за номінальною потужністю і номінальною напругою обмотки.

Для однофазного трансформатора:

$$I_{1H} = S_H / U_{1H}; I_{2H} = S_H / U_{2H}.$$

Для трифазного трансформатора:

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{1H}); I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{2H}) - \text{лінійні струми.}$$

$$I_{1H\Phi} = S_H / (1 \cdot U_{1H\Phi}); I_{2H\Phi} = S_H / (1 \cdot U_{2H\Phi}) - \text{фазні струми.}$$

6. Схема і група сполучень обмоток.

7. Напруга короткого замикання.

Номінальна частота f_H напруг і струмів для трансформаторів загального використання стандартизована і дорівнює 50 Гц. Слід відмітити, що номінальні дані не вказують на те, що трансформатор необхідно експлуатувати тільки при них. Робота трансформатора можлива в діапазоні зміни вторинного струму від 0 до I_{2H} , можливі короткочасні перевантаження, а також невеликі зміни напруги і частоти, спеціально обумовлені стандартами.

1.2. Електромагнітні процеси в трансформаторі при неробочому ході

Незважаючи на різновидність трансформаторів і величин їх потужностей, теорія їх є єдина і ґрунтується на законі електромагнітної індукції. Зі сторони первинної обмотки з кількістю витків w_1 трансформатор є споживачем електричної енергії, а зі сторони вторинної обмотки з кількістю витків w_2 він є джерелом електричної енергії для приймача з опором Z . Струм i_2 у вторинній обмотці визначається опором Z . При деякому значенні цього опору ($Z = Z_H$) через вторинну обмотку протікає номінальний струм ($i_2 = i_{2H}$). Зменшення ($Z < Z_H$) або збільшення ($Z > Z_H$) опору Z порівняно з опором Z_H приводить трансформатор до перевантаження ($i_2 > i_{2H}$) або до недовантаження ($i_2 < i_{2H}$). При $Z = 0$ трансформатор буде працювати в режимі короткого замикання, ($i_2 \gg i_{2H}$), а при $Z = \infty$ струм вторинної обмотки $i_2 = 0$, трансформатор буде працювати в режимі неробочого ходу. В останньому випадку трансформатор не перетворює електричну енергію, що і спонукає таку назву режиму.

Розглянемо напочатку електромагнітні процеси в трансформаторі в режимі неробочого ходу на прикладі понижувального двообмоткового трансформатора, принципова схема якого зображена на рис.1.1. Під дією прикладеної до первинної обмотки синусоїдної напруги U_1 через неї протікає струм $i_1 = i_{10}$, що називається струмом неробочого ходу. Струм i_1 , протікаючи через витки первинної обмотки збуджує основний змінний магнітний потік $\Phi_1 = \Phi_{10}$, що замикається через феромагнітний магнітопровід і зчіплюється з всіма витками первинної і вторинної обмоток, і магнітний потік розсіяння $\Phi_{\sigma 1}$, що замикається через немагнітні (повітряні, ізоляційні) ділянки, магнітна проникність яких значно менша, ніж в магнітопровода. Тому магнітний потік розсіяння в багато разів менший основного магнітного потоку ($\Phi_{\sigma 1} \ll \Phi_1$). Потоки Φ_1 і $\Phi_{\sigma 1}$ в первинній обмотці індукують електрорушійні сили e_1 індукції та $e_{\sigma 1}$ розсіяння

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt}, \quad (1.1, \text{а, б})$$

а у вторинній обмотці електрорушійну силу взаємної індукції

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad (1.2)$$

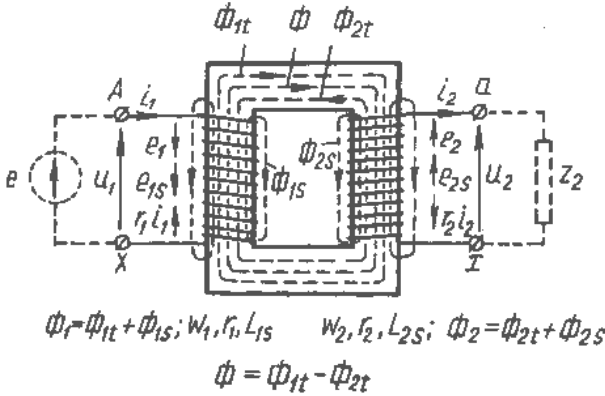


Рис.1.1. Схема однофазного трансформатора

Рівняння, що написано за другим законом Кірхгофа для первинної обмотки, має вигляд

$$u_1 = e_1 - e_{c1} + R_1 i_{10}. \quad (1.3)$$

Напруга U_2 на вторинній обмотці при неробочому ході дорівнює індукованій в ній електрорушійній силі

$$u_2 = e_2. \quad (1.4)$$

Для силових трансформаторів $R_1 i_{10} \ll e_1$ і $e_{c1} \ll e_1$. Тому рівняння (1.3) можна записати у вигляді

$$u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (1.5)$$

Якщо урахувати, що u_1 змінюється за законом $u_1 = U_{1m} \cdot \sin \omega t$, то магнітний потік буде також змінюватися синусоїдно

$$\Phi_1 = \frac{1}{\omega_1} \int U_{1m} \sin \omega t = -\Phi_m \cos \omega t = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (1.6)$$

де $\Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega}$ - максимальне значення потоку.

З урахуванням, що $U_{1m} \approx E_{1m}$ можна отримати формули для визначення діючого значення ЕРС E_1 і E_2

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad (1.7)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot w_2 \Phi_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_{1m} = 4,44 f w_2 \Phi_{1m}. \quad (1.8)$$

З рівнянь (1.7), (1.8) випливає, що індуковані в обмотках ЕРС прямопропорційні кількості витків обмоток, а відношення їх дорівнює відношенню кількості витків або приблизно дорівнює відношенню напруг обмоток

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = n. \quad (1.9)$$

Число n називають коефіцієнтом трансформації трансформатора, причому відношення більшої напруги до меншої

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}. \quad (1.10)$$

Перепишемо рівняння (1.1) в комплексній формі

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_{c1} + \mathcal{E}_{10} R_1, \quad (1.11)$$

де $E_{c10} = -jX_1 \mathcal{E}_{10}$, X_1 - індуктивний опір первинної обмотки, що зумовлений потоком розсіяння Φ_{c1} .

Підставивши значення E_{c10} в (1.11), отримаємо

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_{10} (R_1 + jX_1) = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_{10} Z_1. \quad (1.12)$$

Наочне уявлення про процеси, що відбуваються в трансформаторі при неробочому ході, дає векторна діаграма (рис.1.2). Побудову векторної діаграми починають з вектора основного магнітного потоку Φ .

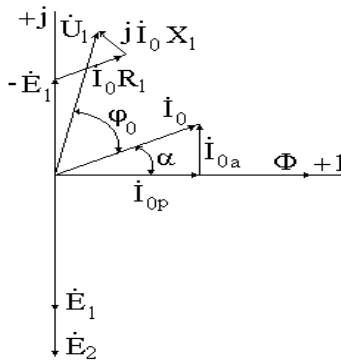


Рис.1.2. Векторна діаграма трансформатора, що працює в режимі неробочого ходу

Під кутом 90^0 в сторону відставання від вектора Φ проведені вектори \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 , що співпадають за фазою, так як первинна і вторинна обмотки одночасно перетинаються одним і тим же основним магнітним потоком.

Під кутом втрат α (дорівнює декільком градусам) в сталюму сердечнику трансформатора в сторону випередження Φ проведено вектор струму неробочого ходу \mathcal{I}_{10} . Згідно з рівнянням (1.12) побудований вектор \mathcal{U}_1 . Кут зсуву фаз між напругою \mathcal{U}_1 первинної обмотки і струмом \mathcal{I}_{10} неробочого ходу близький до 90^0 . Для більшої наочності на векторній діаграмі вектори спадів напруг $\mathcal{I}_{10}R_1$, $\mathcal{I}_{10}X_1$ і кут α значно збільшені.

1.3. Заступна схема та втрати в трансформаторі при неробочому ході

При розрахунку електричних кіл, що містять трансформатори, магнітний зв'язок між первинними і вторинними колами замінюють електричним, що значно спрощує аналіз електричного кола. На рис.1.3. наведена заступна схема трансформатора, що працює в режимі неробочого ходу. Як видно з рисунка, дана схема відповідає заступній схемі котушки з феромагнітним сердечником, до якої прикладена синусоїдна напруга.

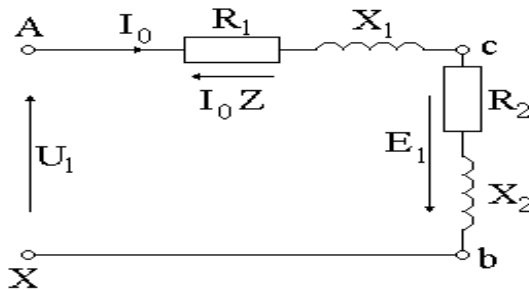


Рис.1.3. Заступна схема трансформатора при неробочому ході

При неробочому ході трансформатор не виконує корисної роботи, тому споживана потужність P_0 витрачається тільки на покриття втрат неробочого ходу, які складаються із електричних втрат в первинній обмотці P_{E1} і магнітних втрат P_M .

Електричними втратами в первинній обмотці P_{E1} при неробочому ході можна знехтувати, тому що струм I_{10} малий і втрати P_{E1} значно менші, ніж в номінальному режимі.

Магнітні втрати в трансформаторі складають 1-2% від номінальної потужності, незважаючи на те, що магнітопровід трансформатора шихтований. Вони складаються із втрат на гістерезис P_H , пропорційним частоті і квадрату індукції, і втрат на вихрові струми P_B , пропорційним квадратам частоти і індукції. В силових трансформаторах визначаються відразу повні магнітні втрати за формулою

$$P_M = P_H + P_B = \sum p_{1,0/50} B_k^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_k,$$

де $p_{1,0/50}$, Вт/кг – питомі втрати в сталі к-ої ділянки при частоті 50 Гц і індукції 1 Тл; B_k , m_k - індукція і маса сталі к-ої ділянки магнітопроводу.

Нехтуючи електричними втратами в первинній обмотці, можна вважати втрати неробочого ходу P_0 рівними магнітним втратам

$$P_0 \approx P_M.$$

Магнітні втрати при неробочому ході і номінальній напрузі майже такі як в номінальному режимі внаслідок незалежності магнітного потоку та індукції від режиму роботи трансформатора. Порівняно з номінальною потужністю трансформатора потужність втрат P_0 невелика, однак вона має важливе експлуатаційне значення. Це пояснюється тим, що втрати в сталі мають місце поки трансформатор під'єднаний до мережі, незалежно від того навантажений він чи працює в неробочому режимі. Оскільки силові трансформатори від'єднуються від мережі в рідких випадках, то втрати в сталі можуть суттєво понизити ККД електромереж.

1.4. Дослід неробочого ходу трансформатора

Для визначення деяких величин, що характеризують роботу трансформатора, використовують дослід неробочого ходу. Схема для проведення дослідів наведена на рис.1.4. Первинна обмотка трансформатора під'єднується до номінальної напруги, а вторинна обмотка розімкнута. За допомогою вольтметрів V_1 і V_2 , амперметра A_1 і

ватметра W вимірюють такі величини: первинну напругу $U_1 = U_{1H}$, струм $I_1 = I_{10}$, потужність $P_1 = P_0$, а також вторинну напругу $U_2 = U_{2H}$.

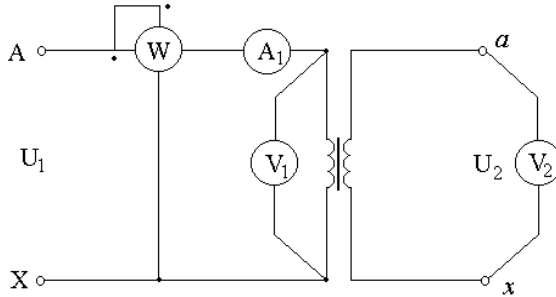


Рис.1.4. Схема досліду неробочого ходу однофазного трансформатора

За даними досліду неробочого ходу визначають повний опір Z_0 , активний R_0 і індуктивний X_0 опори неробочого ходу.

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

коефіцієнт трансформації n і кут втрат α

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}, \alpha = \arccos \frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}.$$

Із заступної схеми трансформатора при неробочому ході видно, що $Z_0 = Z_1 + Z_M$; $R_0 = R_1 + R_M$; $X_0 = X_1 + X_M$.

Звичайно в трансформаторах $R_1 \ll R_M$, $X_1 \ll X_M$.

Тому можна вважати, що опори неробочого ходу дорівнюють опорам контура намагнічування

$$Z_0 \approx Z_M; R_0 \approx R_M; X_0 \approx X_M.$$

1.5. Електромагнітні процеси в трансформаторах при навантаженні

Режим навантаження трансформатора – це такий режим роботи, при якому первинна обмотка під'єднана до джерела змінної напруги, а до затискачів вторинної обмотки під'єднаний споживач.

В режимі навантаження через вторинну обмотку протікає струм $\mathcal{I}_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{Z}$, який збуджує магнітний потік \mathcal{F}_2 , прямопропорційний намагнічуючій силі $I_2 \omega_2$ вторинної обмотки. За правилом Ленца

магнітний потік Φ_2 протидіє причині, що його викликає, тобто напрямлений проти магнітного потоку Φ_1 . Таким чином в магнітопроводі трансформатора діє деякий результуючий магнітний потік $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, що індукує в первинній і вторинній обмотках електрорушійні сили \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 .

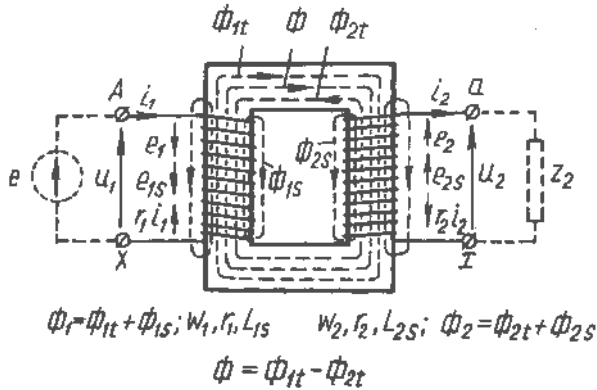


Рис.1.5. Однофазний трансформатор в режимі навантаження

Результуючий магнітний потік не залежить від режиму роботи трансформатора і при будь-якому навантаженні залишається майже незмінним та дорівнює магнітному потоку при неробочому ході Φ_0 . Постійність магнітного потоку Φ (при $U_1 = const$) впливає із рівняння $\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_{10} Z_1$ електричної рівноваги первинної обмотки при неробочому ході. Нехтуючи дуже малою величиною спаду напруги $I_{10} Z_1$ можна вважати, що $U_1 \approx E_1$. Підведена до первинної обмотки напруга U_1 незмінна, отже і $E_1 = const$. Але величина E залежить від амплітуди основного магнітного потоку, отже, амплітуда головного магнітного потоку Φ залишається незмінною.

Основний магнітний потік Φ замикається через магнітопровод і зчіплюється з витками первинної і вторинної обмоток. Частина магнітного потоку, що зчіплюється лише з витками первинної обмотки і замикається через повітря, складає потік розсіяння первинної обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ і йому відповідає ЕРС $E_{\sigma 1}$. Частина магнітного потоку, що зчіплюється тільки з витками вторинної обмотки складає потік

розсіяння вторинної обмотки Φ_{σ_2} , який обумовлює ЕРС E_{σ_2} і замикається також через повітря. В правильно спроектованих силових трансформаторах потоки Φ_{σ_1} і Φ_{σ_2} незначні і складають $0,1 \div 0,4\%$ основного магнітного потоку.

Отже, у первинній обмотці трансформатора електрична енергія перетворюється в енергію магнітного поля, а у вторинній обмотці – енергія магнітного поля перетворюється в електричну енергію.

Магнітний стан трансформатора виражається рівнянням на-магнічуючих сил, яке в комплексній формі має вигляд

$$\mathcal{F}_{10} w_1 = \mathcal{F}_1 w_1 + \mathcal{F}_2 w_2. \quad (1.13)$$

1.6. Рівняння напруг обмоток трансформатора при навантаженні. Зведення вторинних величин до первинної обмотки

Розділивши всі члени рівняння (1.13) на число витків w_1 первинної обмотки, отримаємо рівняння струмів

$$\mathcal{F}'_0 = \mathcal{F}'_1 + \frac{\mathcal{F}'_2}{n} \text{ або } \mathcal{F}'_1 = \mathcal{F}'_{10} - \mathcal{F}'_2, \quad (1.14)$$

де $I'_2 = \frac{I_2}{n}$ – струм вторинної обмотки, зведений до первинної обмотки; n – коефіцієнт трансформації (для понижувального трансформатора).

З рівняння (1.14) слідує, що струм \mathcal{F}'_1 містить дві складові: струм неробочого ходу \mathcal{F}'_{10} , що майже не залежить від навантаження, і струм I'_2 , що залежить тільки від навантаження. При зміні струму у вторинній обмотці на величину $\Delta I'_2$ відбувається зміна струму первинної обмотки на величину $\Delta I_1 = \Delta I'_2$, але результуюча намагнічуюча сила трансформатора $I_{10} w_1$ залишається без зміни (при $U_1 = const$).

Згідно з другим законом Кірхгофа, запишемо рівняння для первинної

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}'_1 + R_1 \mathcal{F}'_1 + jX_1 \mathcal{F}'_1 \quad (1.15)$$

і вторинної

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}'_2 - R_2 \mathcal{F}'_2 - jX_2 \mathcal{F}'_2 \quad (1.16)$$

обмоток навантаженого трансформатора. R_1 , R_2 і X_1 , X_2 – відповідно активні і реактивні опори обмоток.

Помноживши рівняння (1.16) на коефіцієнт трансформації n отримаємо

$$\mathcal{E}'_2 = \mathcal{E}_2 - R_2 \mathcal{I}'_2 - jX'_2 \mathcal{I}'_2 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{I}'_2 Z'_2, \quad (1.17)$$

де $\mathcal{E}'_2 = n\mathcal{E}_2$; $\mathcal{E}_2 = n\mathcal{E}'_2$; $\mathcal{I}'_2 = \frac{\mathcal{I}_2}{n}$; $R_2 = n^2 R'_2$; $X'_2 = n^2 X_2$; $Z'_2 = n^2 Z_2$,

являють собою вторинні величини, що зведені до числа витків первинної обмотки.

Рівняння (1.14), (1.13), (1.17) характеризують роботу зведеного трансформатора при навантаженні

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_1 + R_1 \mathcal{I}_1 + jX_1 \mathcal{I}_1;$$

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_2 - R_2 \mathcal{I}'_2 - jX'_2 \mathcal{I}'_2;$$

$$\mathcal{I}'_1 = \mathcal{I}'_{10} - \mathcal{I}'_2.$$

Отже, замість реального трансформатора ми отримали еквівалентний трансформатор з $n = w_1 / w_2 = 1$. Такий трансформатор називається зведеним. Це дає змогу спростити аналіз процесів, які відбуваються в трансформаторі.

1.7. Дослід короткого замикання трансформатора

Дослід короткого замикання трансформатора здійснюється за схемою, що зображена на рис.1.6. Вторинна обмотка замикається накоротко, а до первинної обмотки для уникнення перегрівання і пошкодження трансформатора підводиться понижена напруга, при якій струми в обох обмотках дорівнюють номінальним. Ця напруга називається напругою короткого замикання U_K . Величина

$$U_K \% = \frac{U_{1K}}{U_H} \cdot 100\%$$

вказується в паспортній таблиці трансформатора і складає для силових трансформаторів від 4% до 15%.

При короткому замиканні $U_2 = 0$ і основний магнітний потік Φ_{1K} складає 5% від магнітного потоку при неробочому ході. Втрати в сталі пропорційні квадрату індукції, тобто квадрату магнітного потоку Φ_{1K} . Отже, в досліді короткого замикання втратами в сталі та намагнічуючим струмом можна нехтувати. Тому потужність короткого замикання P_K практично витрачається на покриття втрат в первинній і вторинній обмотках

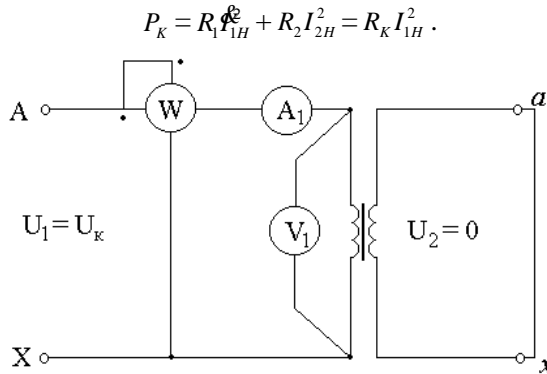


Рис.1.6. Схема досліду короткого замикання однофазного трансформатора

Повний Z_K активний R_K , реактивний X_K опори короткого замикання визначаються за формулами

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}} ; R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2} ; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} .$$

Заступна схема в режимі короткого замикання трансформатора наведена на рис.1.7. Тут не враховують опори R_M і X_M тому нехтують струмом намагнічування.

Активний та реактивні опори обмоток трансформатора (параметри заступної схеми трансформатора при короткому замиканні) визначають за формулою

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} ; X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2} .$$

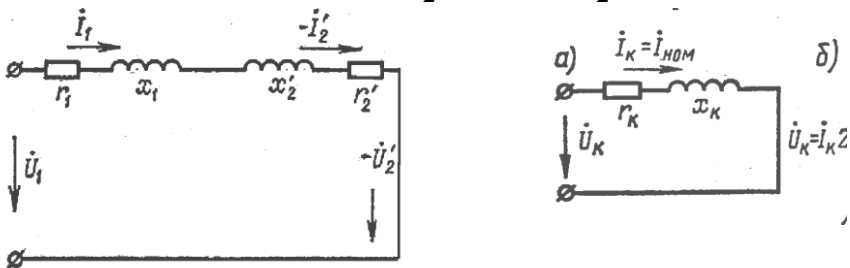


Рис.1.7. Заступна схема трансформатора в режимі короткого замикання

З досліду короткого замикання визначають активну U_{Ka} і реактивну U_{Kp} складові напруги U_K короткого замикання, що виражені у відносних одиницях

$$U_K = \frac{I_{1H} Z_K}{U_{1H}} = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kp}^2},$$

$$\text{де } U_{Ka} \% = U_K \% \cos \varphi_K = \frac{I_{1H} R_K}{U_{1H}} \cdot 100\%;$$

$$U_{Kp} \% = U_K \% \sin \varphi_K = \frac{I_{1H} X_K}{U_{1H}} \cdot 100\%;$$

$$\varphi_K = \arctg \frac{X_K}{R_K}.$$

За відомою величиною $U_K \%$ можна визначити усталений струм короткого замикання при номінальній напрузі

$$I_K = \frac{U_{1H}}{Z_K} = \frac{U_{1H}}{U_K \% \cdot \frac{U_H}{100 \cdot I_{1H}}} = \frac{100}{U_K \%} \cdot I_{1H}.$$

В силових трансформаторах струм I_K в 7-20 разів більший від номінального.

1.8. Характеристики трансформаторів.

Зміна вторинної напруги трансформатора при навантаженні

Зміною вторинної напруги ΔU трансформатора називається арифметична різниця між вторинними напругами трансформатора при неробочому ході $U_{20} = U_{2H}$ та при заданому струмі навантаження I_2 , коли напруга первинної обмотки є постійною і дорівнює номінальній величині ($U_1 = U_{1H} = \text{const}$)

$$\Delta U = U_{2H} - U_2, \quad (1.18)$$

або в %

$$\Delta U \% = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} \cdot 100\% = \frac{U'_{2H} - U'_2}{U'_{2H}} \cdot 100\%. \quad (1.19)$$

Для визначення вторинної напруги трансформатора при різному навантаженні скористаємось спрощеною заступною схемою без намагнічуючого контура (рис.1.8,а). На рис.1.8,б наведена векторна діаграма для заступної схеми при активно-індуктивному навантаженні.

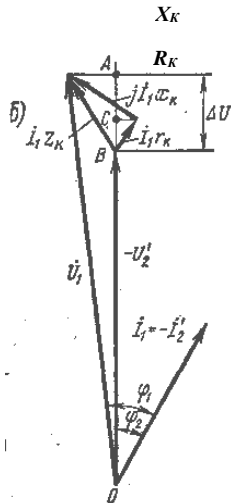
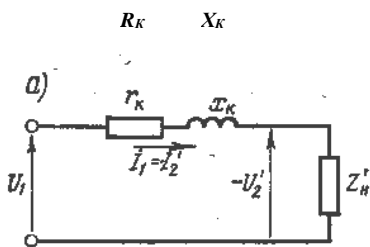


Рис.1.8.

Спрощена заступна схема трансформатора та векторна діаграма (б)

На рис.1.8 опори R_K і X_K визначаються з рівностей

$$R_K = R_1 + R'_2; \quad X_K = X_1 + X'_2; \quad Z_K = R_K + jX_K. \quad (1.20)$$

Оскільки при неробочому ході нехтуємо спадами напруг в обмотках трансформатора, то $U'_{2H} = U_1$ і при номінальному значенні U_{1H} маємо

$$\Delta U \% = \frac{U_{1H} - U'_2}{U_{1H}} \cdot 100\%. \quad (1.21)$$

Цю величину називають відносною втратою напруги.

Із діаграми, наведеної на рис.1.8,б, видно, що модуль вектора напруги \mathcal{U}'_1 наближено дорівнює його проекції на вектор \mathcal{U}'_2 ($\varphi_1 - \varphi_2 \approx 0$), тобто відрізьку \overline{OA} . Тоді

$$\Delta U = U_1 - U'_2 = \overline{OA} - \overline{OB} = \overline{BA}.$$

Спроектувавши вектори \mathcal{R}_K і $j\mathcal{X}_K$ на вектор \mathcal{U}'_2 отримаємо

$$\Delta U = \overline{BA} = \overline{BC} + \overline{CA} = I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2.$$

Таким чином, відносна зміна напруги дорівнює

$$\Delta U = \frac{I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2}{U_{1H}} \cdot 100\%. \quad (1.22)$$

При номінальному навантаженні формула (1.22) матиме вигляд

$$\Delta U_H \% = \frac{I_{1H} R_K \cos \varphi_2 + I_{1H} X_K \sin \varphi_2}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

або

$$\Delta U_H \% = U_{Ka} \% \cos \varphi_2 + U_{Kp} \% \sin \varphi_2 ,$$

де $U_{Ka} \%$ і $U_{Kp} \%$ - активна і реактивна складові напруги короткого замикання у відсотках від U_{1H} .

Ввівши поняття коефіцієнта завантаження β

$$\beta = \frac{I_2'}{I_{2H}} \approx \frac{I_1}{I_{1H}} ,$$

отримаємо

$$\Delta U \% = \beta (U_{Ka} \% \cos \varphi_2 + U_{Kp} \% \sin \varphi_2) .$$

Для силових трансформаторів використовують іноді більш точну формулу

$$\Delta U \% = \beta (U_{Ka} \% \cos \varphi_2 + U_{Kp} \% \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2 (U_{Kp} \% \cos \varphi_2 - U_{Ka} \% \sin \varphi_2)^2}{200} .$$

1.9. Зовнішні характеристики трансформатора

Залежність напруги U_2' від струму I_2' або $U_2' = U_1 = f(\beta)$ при $\varphi_2 = const$ і $U_1 = U_{1H} = const$ називається зовнішньою характеристикою трансформатора. На рис.1.9 наведені зовнішні характеристики трансформатора для різних видів навантаження вторинної обмотки.

Розрахунок зовнішніх характеристик проводиться за формулою

$$U_2' = U_{1H} - \Delta U = \beta \left[1 - \frac{\beta}{100} (U_{Ka} \% \cos \varphi_2 + U_{Kp} \% \sin \varphi_2) - \frac{\beta^2}{20000} (U_{Kp} \% \cos \varphi_2 - U_{Ka} \% \sin \varphi_2)^2 \right] . \quad (1.23)$$

В межах зміни коефіцієнта β від 0 до 1 зовнішні характеристики практично прямолінійні.

Складові напруги короткого замикання U_{Ka} і U_{Kp} залежать від номінальної потужності трансформатора. В трансформаторах середньої потужності U_{Kp} значно більша від U_{Ka} . Тому в таких трансформаторах реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги U_2' , ніж активне, тобто при активно-індуктивному

навантаженні чим менша величина $\cos \varphi_2$, тим нижче проходить зовнішня характеристика. При активно-ємнісному навантаженні напруга U_2' при деяких кутах φ_2 може бути більшою за U_1 (в формулі (1.23) при $\varphi_2 < 0$ величина $\sin \varphi_2$ стає від'ємною).

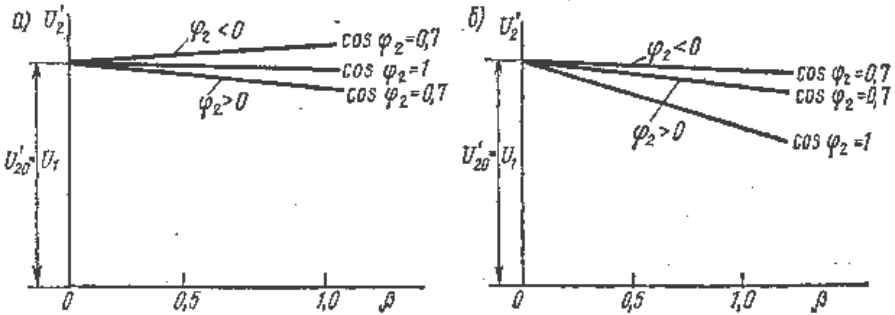


Рис.1.9. Зовнішні характеристики трансформаторів великої (а) і малої (б) потужності

В трансформаторах невеликої потужності активний спад напруги більший за реактивний. Тому в таких трансформаторах активне навантаження викликає більшу зміну напруги, ніж реактивне. При активно-індуктивному навантаженні чим менше величина $\cos \varphi_2$, тим вище розміщені зовнішні характеристики. При активно-ємнісному навантаженні вони розміщені вище, ніж при активному та активно-індуктивному (рис.1.9,б).

Для зменшення зміни напруги трансформатора при навантаженні зменшують потоки розсіяння. Для цього первинні і вторинні обмотки розміщують на одному стержні і по можливості наближають одна до одної (концентричні обмотки). Мінімальний проміжок між обмотками обмежується електричною міцністю. Тому високовольтні трансформатори, в яких ізоляційний проміжок між обмотками більший, мають відносно більші потоки розсіяння і напругу U_K , порівняно з низьковольтними трансформаторами.

Як видно з формули (1.23), зміна вторинної напруги суттєво залежить від кута φ_2 навантаження. Залежність $\Delta U = \Delta U(\varphi_2)$ при $\beta = 1$ для трансформатора, у якого $U_K = 0,1$, $U_{Ka} = 0,04$, $U_{Kp} = 0,092$ зображена на рис.1.10.

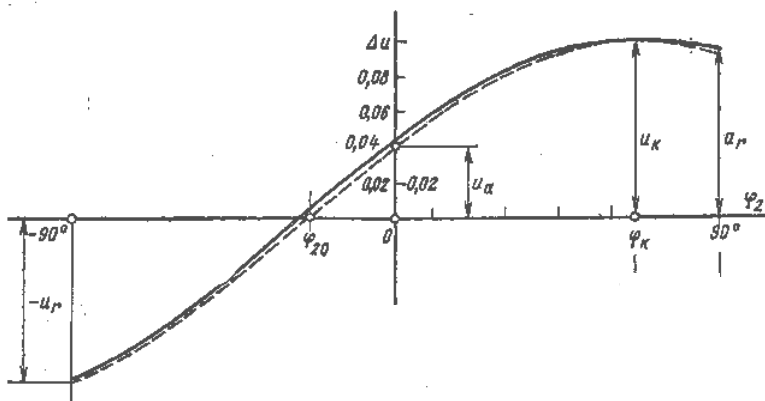


Рис.1.10. Залежність $\Delta U = \Delta U (\varphi_2)$

На рис.1.11 наведені залежності $\Delta U = \Delta U (\beta)$ для трансформатора з $U_{Ka}=0,01$, $U_{Kp}=0,04$.

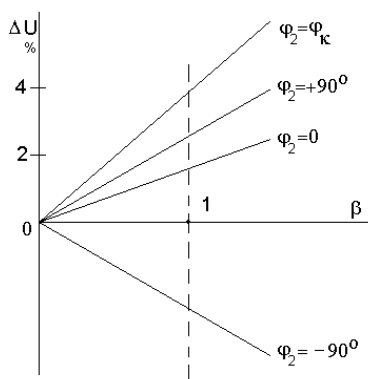


Рис.1.11. Залежності $\Delta U = \Delta U (\beta)$

1.10. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії трансформатора

Втрати активної потужності в трансформаторі поділяються на електричні втрати в обмотках і магнітні втрати в сталі.

Величина втрат визначається розрахунковим шляхом для трансформаторів, що проектуються, і експериментальним шляхом для виготовлених трансформаторів.

Як було встановлено раніше, втрати P_M при всіх навантаженнях дорівнюють втратам P_0 при неробочому ході, а електричні втрати P_E дорівнюють втратам короткого замикання P_K : $P_M = P_0$;

$$P_E = P_{E1} + P_{E2} = R_1 I_1'^2 + R_2 I_2'^2 = R_K I_1'^2 = R_K I_{1H}^2 \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 = P_K \beta^2. \quad (1.24)$$

Повні втрати ΔP дорівнюють

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K. \quad (1.25)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення потужності P_2 , що віддається у вторинну мережу до активної потужності P_1 , що надходить в первинну обмотку

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1 + \Delta P},$$

або

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K}. \quad (1.26)$$

Враховуючи, що

$$P_2 = m U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m U_{1H} I_2' \cos \varphi_2' = m U_{1H} I_{1H} \frac{I_2'}{I_{1H}} \cos \varphi_2,$$

отримаємо

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_K + P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}. \quad (1.27)$$

Ця формула рекомендується державним стандартом для визначення ККД трансформатора. Величини S_H , P_0 , P_K наведені у відповідних стандартах і каталогах.

Оптимальне значення β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення, можна визначити, якщо взяти похідну $d\eta/d\beta$ виразу (1.27) і прирівняти її до нуля. При цьому

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_0 / P_K}.$$

Для силових трансформаторів $P_0 / P_K = 0,5 \div 0,25$ і максимальне значення ККД буде при навантаженні $\beta = 0,7 \div 0,5$.

Слід відмітити, що в силових трансформаторах максимум ККД виражений незначно, тобто ККД зберігає високе значення в широкому діапазоні зміни навантаження ($0,4 < \beta < 1,5$).

1.11. Магнітні системи і способи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Трифазний трансформатор можна отримати, якщо розмістити магнітопроводи трьох однофазних трансформаторів під кутом 120° один до одного (рис.1.12,а). Середній стержень такого трансформатора ніби відповідає нейтральному провіднику при з'єднанні трифазного споживача зіркою. При симетричній трифазній системі вектори магнітних потоків створюють симетричну зірку і їх сума дорівнює нулю (рис.1.12,б). Тому середній стержень є непотрібним, оскільки магнітний потік у ньому дорівнює нулю. Така конструкція магнітопровода є симетричною. Симетричний магнітопровід є незручним для виготовлення і в сучасному трансформаторобудуванні використовується рідко.

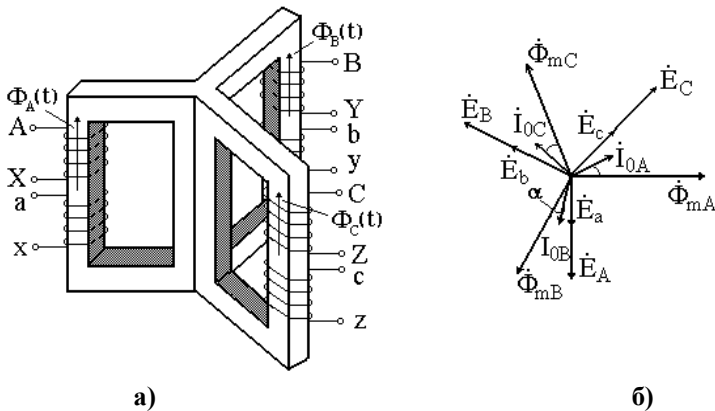


Рис.1.12. Симетричний магнітопровід трифазного трансформатора (а) і векторна діаграма (б) при неробочому режимі

Магнітопроводи сучасних трифазних трансформаторів мають три стержні, що розміщені в одній площині. Магнітне коло плоского магнітопровода має невелику магнітну асиметрію, що обумовлює несиметрію намагнічуючих струмів. Струм неробочого ходу в фазі, що розміщена на середньому стержні, буде більший за величиною в порівнянні з струмами двох інших фаз, струми неробочого ходу яких рівні між собою. Однак практично для потужних трансформаторів це не має суттєвого значення, так як величина струму неробочого ходу складає 1-8% від номінального струму фази.

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані

зіркою або трикутником. При сполученні зіркою назовні крім лінійних кінців виводиться іноді нульова точка.

В деяких випадках використовується також з'єднання обмоток за схемою зигзаг (рис.1.13), коли фаза обмотки поділяється на дві частини, які розміщені на різних стержнях і з'єднуються послідовно. При цьому друга половина обмотки під'єднується зустрічно по відношенню до першої половини.

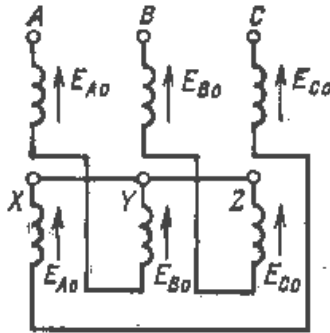


Рис.1.13. Схема з'єднання обмотки зигзагом

Згідно з державним стандартом, початки обмотки *ВН* позначаються літерами *A, B, C*, а кінці – літерами *X, Y, Z*. Початки обмотки *НН* позначаються малими літерами *a, b, c*, а кінці - *x, y, z*. Нульова точка позначають літерою *N*.

Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають у вигляді дробу, в чисельнику якого поміщають позначення схеми з'єднання обмотки *ВН*, а в знаменнику – обмотки *НН* (наприклад *Y/Y*).

Вибір схеми з'єднання обмоток залежить від багатьох причин. Наприклад, для мереж з напругою 15 кВ і більше вигідно з'єднати обмотку трансформатора зіркою і заземлити нульову точку, так як при цьому напруга виводів трансформатора і провідників лінії передачі відносно землі буде завжди в $\sqrt{3}$ раз меншою за лінійну, що дає можливість зменшити вартість ізоляції.

При з'єднанні обмоток трансформатора за схемою *Y_n/Y* треті гармоніки фазних струмів замикаються через нульовий провідник. При цьому струм неробочого ходу кожної фази має третю гармоніку, а потік є синусоїдним.

При схемі *Y/Y* шлях для замикання третіх гармонік фазних струмів відсутній і струм неробочого ходу є синусоїдним. Однак крива

магнітного потоку спотворюється і має третю гармоніку. Несинусоїдними будуть також і ЕРС фаз. В тристержевому трансформаторі треті гармоніки магнітних потоків фаз не можуть замикатися через сталений магнітопровід, так як вони в будь-який момент направлені зустрічно. Тому треті гармоніки потоків замикаються через стінки бака, створюючи при цьому додаткові втрати потужності.

Якщо одна із обмоток з'єднана трикутником, то фазні потоки є практично синусоїдними. Це тому, що в обмотці, яка з'єднана трикутником, треті гармоніки е.р.с. викликають струм потрібної частоти, який протікає через фазні обмотки і зменшує треті гармоніки магнітних потоків. Таким чином, обмотки трансформаторів краще з'єднувати за схемами Y/Δ або Y_n/Δ , що дозволяє практично позбутися третіх гармонік в кривих магнітних потоків і ЕРС.

1.12. Групи з'єднань обмоток трансформаторів

З'єднання обмоток BH і HN зіркою чи трикутником отримують з'єднуючи відповідним чином затискачі фаз обмоток. Залежно від того, які затискачі фаз обмоток BH і HN з'єднуються разом, змінюється величина кута α зсуву фаз між векторами лінійних напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора в режимі неробочого режиму, що взяті між однойменними затискачами. В однофазних трансформаторах кут α дорівнює 0^0 чи 180^0 , а в трифазних трансформаторах кут α дорівнює

$$\alpha = K \cdot 30^0,$$

де $K = 0, 1, 2, 1, \dots, 11$ – ціле число, яке називається групою з'єднань обмоток трансформатора.

Для зручності визначення числа K користуються годинником. При цьому під номером групи з'єднання приймають годину на годиннику, хвилинна стрілка якого суміщена з вектором лінійної напруги \mathcal{E}_{AB} обмотки BH і встановлена на цифру 0 (12), а годинна суміщена з вектором лінійної напруги \mathcal{E}_{ab} обмотки HN .

Номер групи з'єднання вказується після позначення схеми з'єднання його обмоток, наприклад $Y/\Delta-11$ або $Y/Y-0$. Знання групи з'єднань обмоток необхідно при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу, коли необхідно з'єднувати рівнопотенціальні затискачі обмоток.

1.13. Паралельна робота трансформаторів

Для забезпечення надійності електропостачання, а також у зв'язку із спеціальними вимогами, на трансформаторних підстанціях встановлюються два і більше паралельно працюючих трансформатори. При цьому їх первинні обмотки ввімкнені – на спільну первинну мережу (первинні шини), а вторинні – на спільну вторинну мережу (вторинні шини).

Крім цього, паралельна робота трансформаторів забезпечує:

- резервування споживачів у випадку аварії;
- зменшення втрат енергії під час малих навантажень підстанції шляхом вимикання частини паралельно працюючих трансформаторів;
- кращу організацію ремонту трансформаторів.

При паралельній роботі трансформаторів постає питання про розподіл між трансформаторами навантаження пропорційно їх номінальним потужностям. Такий розподіл навантаження досягається за умов, коли паралельно працюючі трансформатори мають:

- а) однакові групи з'єднань обмоток;
- б) рівні за величиною первинні і вторинні номінальні напруги (рівні коефіцієнти трансформації);
- в) рівні напруги короткого замикання та їх складові.

Слід відмітити, що при першому вмиканні трансформаторів на паралельну роботу необхідно переконатися в тому, що на одну і ту ж шину вмикаються такі фази окремих трансформаторів, напруги яких співпадають за фазою (однакове чергування фаз).

Для того, щоб навантаження розподілялось між паралельно ввімкненими трансформаторами прямопропорційно їх номінальним потужностям, вони повинні мати однакові напруги короткого замикання. Практично задовільний розподіл навантаження відбувається тоді, коли U_K паралельно працюючих трансформаторів відхиляється від їх середньоарифметичного значення не більше $\pm 10\%$.

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{U_{KII}}{U_{KI}} \cdot \frac{S_{III}}{S_{III}}. \quad (1.28)$$

Якщо U_K різні за величиною, перевантаженим буде трансформатор з меншим значенням U_K , тобто з меншим опором Z_K . В даному випадку потрібно буде зменшити загальне навантаження паралельно працюючих трансформаторів.

1.14. Трансформатори спеціального призначення.

Автотрансформатори

Автотрансформатором називається трансформатор, у якого обмотки крім електромагнітного зв'язку мають ще електричне з'єднання. Автотрансформатори можуть бути понижувальними або підвищувальними (рис.1.14), однофазними або трифазними. Розглянемо роботу понижувального автотрансформатора.

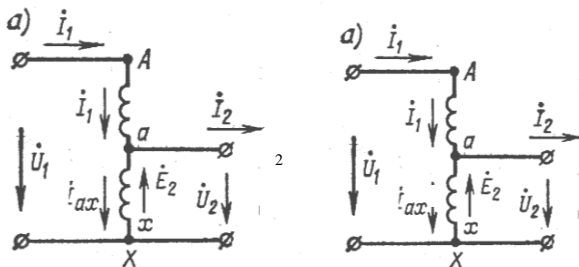


Рис.1.14. Схема автотрансформатора:
а) понижувального, б) підвищувального

В понижувальному трансформаторі (рис.1.14.а) первинна напруга підводиться до затискачів A і X . Частина первинної обмотки між затискачами a і x є вторинною обмоткою. В усталеному режимі роботи первинна напруга U_1 рівномірно розділяється по витках обмотки AX . Вторинна напруга U_2 дорівнює

$$U_2 = U_{ax} = \frac{U_{AX}}{w_{AX}} \cdot w_{ax} = \frac{U_1}{K}, \quad (1.29)$$

де w_{AX} , w_{ax} - числа витків відповідно між точками A і X , a і x ;

$K = \frac{w_{AX}}{w_{ax}}$ - коефіцієнт трансформації автотрансформатора.

В двообмотковому трансформаторі розрахункова потужність S_{TP} обох обмоток дорівнює

$$S_{TP} = I_1 E_1 + I_2 E_2. \quad (1.30)$$

В трансформаторі розрахункову потужність обох обмоток можна записати у вигляді

$$S_{aTP} = S_{Aa} + S_{ax}. \quad (1.31)$$

Визначимо потужність S_{Aa}

$$S_{Aa} = I_1 E_{Aa} = I_1 \frac{E_1}{w_{AX}} w_{Aa} = I_1 E_1 \frac{w_{AX} w_{ax}}{w_{AX}} = I_1 E_1 \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (1.32)$$

На ділянці ax через обмотку протікає струм I_{ax}

$$\mathcal{I}_{ax} = \mathcal{I}_2 + \mathcal{I}_1. \quad (1.33)$$

Але струми \mathcal{I}_2 і \mathcal{I}_1 зсунені за фазою майже на кут 180° . Нехтуючи струмом неробочого ходу, діюче значення струму I_{ax} запишемо у вигляді

$$I_{ax} \approx I_2 - I_1 = I_2 - \frac{I_2}{K} = I_2 \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (1.34)$$

Розрахункова потужність обмотки S_{ax} на ділянці ax дорівнює

$$S_{ax} = E_2 I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (1.35)$$

Розрахункова потужність обох обмоток автотрансформатора

$$S_{aTP} = S_{Aa} + S_{ax} = (I_1 E_1 + I_2 E_2) \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) = S_{TP} \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (1.36)$$

Із (1.36) видно, що розрахункова потужність обмоток автотрансформатора менша, ніж потужність обмоток двообмоткового трансформатора при однаковій прохідній потужності $I_1 E_1 \approx I_2 E_2$, що передається з первинного кола у вторинне.

Фізично це пояснюється тим, що в автотрансформаторі частина енергії передається з первинної обмотки до вторинної не електромагнітним шляхом, а безпосередньо через електричний зв'язок.

Відношення

$$K_e = \frac{S_{aTP}}{S_{TP}} = 1 - \frac{1}{K} \quad (1.37)$$

називають коефіцієнтом вигоди.

Із (1.37) видно, що перетворення електроенергії вигідно проводити за допомогою автотрансформатора при K близькому до одиниці.

Розміри трансформатора визначаються тільки тою потужністю, що передається електромагнітним шляхом. Із наведених співвідношень видно, що при заданій прохідній потужності, електромагнітна потужність в автотрансформаторі значно менша, ніж в трансформаторі, завдяки чому автотрансформатор буде мати менші розміри, ніж трансформатор. Внаслідок цього і втрати в автотрансформаторі менші, ніж в трансформаторі такої ж потужності.

ТЕМА 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ

2.1. Області використання, конструкція та принцип роботи асинхронних машин

Асинхронні машин набули найбільшого розповсюдження як двигуни. В даний час асинхронні двигуни є основними двигунами в промисловості, сільському господарстві та побуті. Вони споживають майже половину електричної енергії, що виробляється на електричних станціях. Широкого розповсюдження асинхронні двигуни набули завдяки своїй простоті, низькій вартості та високій надійності в експлуатації.

Електротехнічна промисловість випускає асинхронні двигуни в широкому діапазоні потужностей. Гранична потужність асинхронних двигунів складає десятки мегават. В індикаторних системах використовуються асинхронні двигуни потужністю від долі вата до сотень ват. Швидкість обертання ротора асинхронних двигунів загального використання складає від 1000 до 500 об/хв.

Експлуатація асинхронних двигунів показала, що поряд з великими перевагами вони мають і недоліки, до яких слід перш за все віднести те, що вони споживають реактивний струм, який необхідний для створення магнітного потоку. До недоліків відносяться також неможливість плавного регулювання швидкості обертання ротора в широкому діапазоні.

Конструкція асинхронних двигунів, запропонована М.О. Доліво-Добровеським в 1889 р., в основних рисах збереглася до наших днів.

Асинхронні двигуни складаються із двох частин: нерухомої частини – статора і рухомої частини – ротора, які розділені повітряним проміжком.

Сердечник статора, що являє собою пустотілий циліндр, збирають з листів холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,15 або 0,5 мм. Якщо довжина магнітопроводу більша ніж 0,1 м то його поділяють в осьовому напрямку на ряд пакетів завширшки 0,1-0,6м. Між пакетами влаштовують радіальні вентиляційні канали шириною 0,01 м для проходження охолоджуючого повітря. На внутрішній поверхні статора виштамповують пази, в які вкладається трифазна обмотка. Сердечник статора закріплюють в корпусі. Кріплення статора в корпусі залежить від габаритів і потужностей машини.

Повітряний проміжок між статором та ротором роблять якнайменшим (який допускається з міркувань технології виготовлення): від 0,1 мм у двигунах малої потужності до кількох міліметрів у двигунах великої потужності. Це пояснюється тим, що статор і ротор зв'язані між собою магнітним потоком, який замикається через сердечники статора і ротора. Чим менший повітряний проміжок, тим кращий магнітний зв'язок.

Ротори асинхронних двигунів бувають двох типів: з короткозамкненою обмоткою (асинхронний двигун з короткозамкненим ротором) і з фазною обмоткою (асинхронний двигун з фазним ротором). Найбільшого розповсюдження набули двигуни з короткозамкненим ротором. На рис.2.1 наведено загальний вигляд з розрізами двигуна з короткозамкненим ротором.

Сердечник ротора збирають із листів, які штампують із відходів листів при штампуванні сердечника статора. Сердечники двигунів із висотою осі обетання до 0,45 м насаджують безпосередньо на вал (до висоти 0,25 м – на гладкий вал). У більших машинах сердечник кріплять на валу за допомогою шпонки, а в машинах великих габаритів насаджують на втулку або на кістяк (хрестовину) ротора. На зовнішній циліндричній поверхні ротора рівномірно розміщені пази, в які вкладається обмотка.

В короткозамкнених роторах використовують напівзакриті або закриті пази, що мають овальну, прямокутну або грушоподібну форму. Ширину відкриття паза вибирають біля 1 мм. Закриті пази перекриваються зверху стальним містком товщиною 0,1-0,5 мм. Обмотку ротора виконують шляхом заливання розплавленого алюмінієвого сплаву в пази. Така обмотка має вигляд бльчатого колеса. Одночасно з обох торців ротора заливають короткозамкнені кільця разом з вентиляційними лопатками. В великогабаритних машинах використовують зварну обмотку – в пази вставляють мідні стержні, які на торцях приварюють до мідних чи алюмінієвих короткозамкнених кілець.

В двигунах з фазним ротором в пази вкладають трифазну обмотку аналогічно обмотці статора. Початки фаз з'єднані в нейтральну точку, а кінці фаз приєднані до контактних кілець, які розміщені на валу та ізольовані одне від одного і від валу машини. До рухомих кілець через щітки під'єднують пусковий чи регулювальний реостат.

Двигуни з фазним ротором дають змогу розширити діапазон регулювання швидкості обертання ротора шляхом зміни опору кола ротора, тобто механічні характеристики асинхронного двигуна є більш м'якими, але слід мати на увазі, що в колі ротора будуть спостерігатись великі втрати енергії.

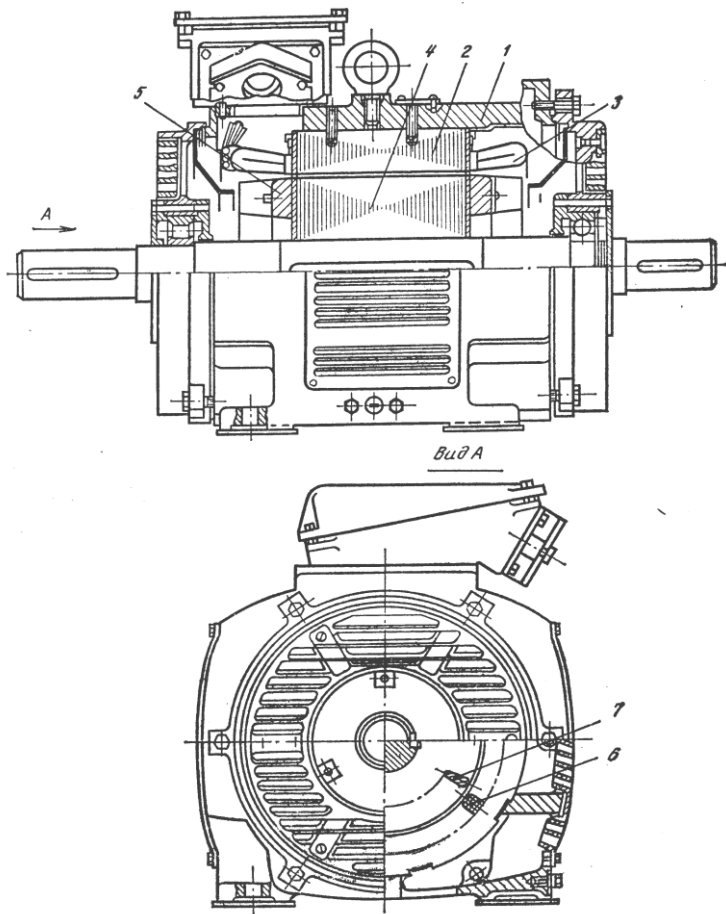


Рис.2.1. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором:
1 – корпус; 2 – сердечник статора; 1 – обмотка статора; 4 – сердечник ротора; 5 – обмотка ротора; 6 – паз статора; 7 – паз ротора

Вал ротора обертається в підшипниках, закріплених в підшипникових щитах. В асинхронних двигунах переважно використовують підшипники кочення. В машинах великої потужності використовують іноді підшипники ковзання. Підшипникові шити прикріплюють до корпусу статора.

На прикріпленій до корпусу таблиці вказують номінальні (паспортні) дані:

- потужність (потужність на валу);
- лінійні напруги обмотки статора у вигляді дробу (при більшій напрузі обмотки з'єднується зіркою, а при меншій – трикутником);
- лінійні струми у вигляді дробу (відповідно при з'єднанні обмотки зіркою і трикутником);
- частота мережі живлення;
- швидкість обертання ротора;
- коефіцієнт потужності;
- коефіцієнт корисної дії.

Для двигуна з фазним ротором вказується ще напруга і струм ротора.

Якщо трифазну обмотку статора під'єднати до трифазної мережі, то струми протікатимуть через фази обмотки і створять обертове магнітне поле з швидкістю обертання $n_1 = \frac{60f}{p}$. Обертове магнітне поле буде перетинати провідники обмотки ротора і індукувати в них ЕРС, напрям яких можна визначити за правилом правої руки.

В замкненій обмотці ротора виникає струм I_2 , активна складова якого співпадатиме за напрямом з ЕРС. Струм I_2 , взаємодіючи з магнітним полем, створить обертовий момент M , під дією якого ротор почне обертатись. Скориставшись правилом лівої руки, встановимо, що напрями моменту і обертання ротора будуть співпадати з напрямом обертання поля.

Швидкість обертання ротора буде зростати, але навіть при відсутності навантаження на валу, ротор не зможе досягти швидкості обертання поля. Пояснюється це тим, що обертовий момент може виникнути тільки в тому випадку, коли магнітне поле перетинає провідники, тобто існує різниця між швидкостями обертання ротора і поля. Оскільки при неробочому ході в двигуні існує невеликий

гальмівний момент M_0 , зумовлений механічними втратами, то двигун споживає із мережі струм I_{10} для покриття гальмівного моменту.

Отже, для асинхронного двигуна характерним є несинхронне (асинхронне) обертання його ротора і магнітного поля. Звідси походить і назва – асинхронний двигун.

Величину

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

називають ковзанням.

Оскільки швидкість обертання магнітного поля відносно ротора дорівнює $n_1 - n$, то частота ЕРС в його обмотці визначається за формулою

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s .$$

Номінальна швидкість обертання ротора залежить від n_1 і не може бути довільною. Залежно від необхідної номінальної швидкості обертання ротора обмотки двигуна виготовляють з відповідним числом пар полюсів. Асинхронні двигуни випускаються з синхронними швидкостями обертання 1000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/хв.

2.2. Електромагнітні процеси в асинхронній машині при рухомому роторі

При обертовому роторі в асинхронній машині відбувається перетворення електричної енергії в механічну (режим двигуна) або зворотнє перетворення (режим генератора). В теоретичному плані виникає необхідність заміни асинхронної машини з обертовим ротором еквівалентною їй за електромагнітними і енергетичними процесами машинною з нерухомим ротором. Досягнути цього можна, коли при такій заміні струм і його фаза в роторі та МРС ротора F_2 залишаться без зміни.

Струм в роторі, що обертається із ковзанням s , дорівнює

$$I_{2S} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2S}^2}}, \quad (2.1)$$

де R_2 - активний опір фази

ЕРС E_{2s} відповідає ЕРС, що індукується в фазі ротора при ковзанні s

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 K_{\phi 2} \Phi. \quad (2.2)$$

При умові, що $f_2 = f_1 s$, отримаємо

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s w_2 K_{\phi 2} \Phi = E_{2s}, \quad (2.3)$$

де E_2 - ЕРС що наводиться в фазі нерухомого ротора ($s=1, f_2=f_1$).

Аналогічно, індуктивний опір розсіяння фази ротора, при ковзанні s , дорівнює

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 s = X_{2s}, \quad (2.4)$$

де $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ - індуктивний опір розсіяння при нерухомому роторі.

З урахуванням (2.3) та (2.4) запишемо (2.1) у вигляді

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2s})^2}}. \quad (2.5)$$

Поділивши чисельник і знаменник на s , отримаємо

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}. \quad (2.6)$$

Струми I_{2s} і I_2 мають однакову величину та однакові кути зсуву по відношенню до ЕРС

$$\operatorname{tg}\psi_2 = \frac{X_2}{R_2/s} = \frac{X_2 s}{R_2} = \operatorname{tg}\psi_{2s}. \quad (2.7)$$

Так як струми \mathcal{F}_{2s} і \mathcal{F}_2 рівні за величиною і фазою, то МРС, створені ними, також будуть рівні і однаково орієнтовані в просторі, тобто $\mathcal{F}_{2s} = \mathcal{F}_2$.

МРС F_{2s} рухається відносно ротора в тому ж напрямку, що і ротор з швидкістю $\frac{2\pi f_2}{p} = \frac{2\pi f_1 s}{p} = \omega_1 s$.

Так як швидкість ротора $\omega = \omega_1(1-s)$ то МРС F_{2s} при будь-яких значеннях ковзання s буде рухатися в просторі (відносно нерухомого статора) з кутовою швидкістю

$$\omega_1 s + \omega_1(1-s) = \omega_1. \quad (2.8)$$

З такою ж швидкістю рухається в просторі $\dot{\mathcal{F}}_1$. Отже, при довільному ковзанні МРС $\dot{\mathcal{F}}_1$ і $\dot{\mathcal{F}}_{2S} = \dot{\mathcal{F}}_2$ нерухомі відносно один одного і створюють результуючу МРС $\dot{\mathcal{F}}_{12}$

$$\dot{\mathcal{F}}_{12} = \dot{\mathcal{F}}_1 + \dot{\mathcal{F}}_2, \quad (2.9)$$

звідки випливає, що заміна обертового ротора еквівалентним нерухомим не порушує магнітного стану машини. Згідно з (14.1.6), при переході до еквівалентного нерухомого ротора необхідно R_2

замінити на $\frac{R_2}{s}$, а тому в його коло вводиться додатковий опір R_{MX}

$$R_{MX} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.10)$$

Асинхронна машина з еквівалентним нерухомим ротором в еквівалентному відношенні буде подібна трансформатору, що працює на активне навантаження.

Потужність, що споживається еквівалентним нерухомим ротором (електромагнітна потужність), дорівнює

$$P_{12} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{s}. \quad (2.11)$$

Частина цієї потужності витрачається на покриття електричних втрат в обмотці ротора

$$P_{e2} = m_2 I_2^2 R_2. \quad (2.12)$$

Решта цієї потужності поглинається опором R_{MX}

$$P_2' = P_{12} - P_{e2} = m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.13)$$

В реальному двигуні з обертовим ротором цій потужності буде відповідати повна механічна потужність, яка отримується в результаті перетворення електричної енергії в механічну. Отриманий результат наочно показаний на електричній схемі, зображеній на рис.2.2,а, в якій активний опір обмотки ротора поділений на дві частини R_2 і $R_2 \frac{1-s}{s}$.

Перший опір не залежить від режиму роботи і втрати в ньому дорівнюють електричним втратам реального ротора. Другий опір залежить від ковзання, і потужність, що виділяється в ньому, чисельно дорівнює механічній потужності двигуна P_{mex} . Таким чином, наведена на рис.2.2,а заступна схема ротора дає змогу замінити реальний

рухомий ротор нерухомим, в коло обмотки якого ввімкнено активний опір, що залежить від частоти обертання ротора двигуна.

На рис.2.2,б наведена повна заступна схема асинхронного двигуна, яка відрізняється від заступної схеми асинхронної машини з нерухомим ротором (трансформатором) тільки наявністю активного навантаження, що залежить від ковзання.

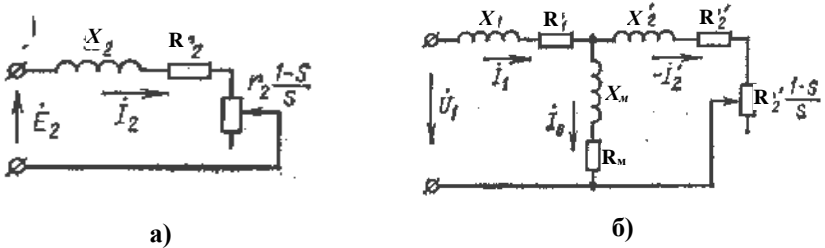


Рис.2.2. Заступна схема ротора (а) і Т-подібна заступна схема асинхронного двигуна при обертанні ротора

Отже і при рухомому роторі теорію асинхронної машини можна звести до теорії трансформатора.

Наведену на рис.2.2,б схему називають Т-подібною заступною схемою (опори Z , Z_2' , Z_M створюють букву *T*). Ця схема повністю відображає фізичні процеси, що протікають в машині, але вона має вузлову точку між опорами Z і Z_2' , наявність якої ускладнює розрахунок струмів при різних ковзаннях.

Практично більше застосування для аналізу асинхронних машин набула схема, в якій намагнічуюча гілка під'єднана безпосередньо на напругу U_1 (Г-подібна схема, зображена на рис.2.3)

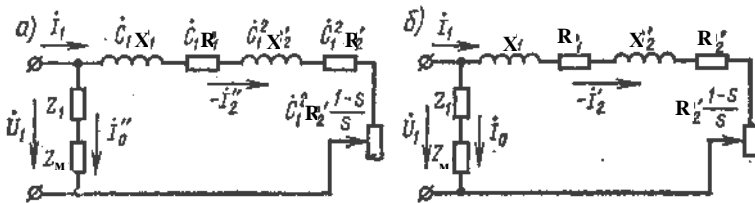


Рис.2.3. Г-подібна схема асинхронної машини (а) та її спрощений варіант (б)

Перетворення Т-подібної схеми в Г-подібну (в курсі ТОЕ) приводить до появи комплексу \mathcal{E}_1

$$\mathcal{E}_1 = \frac{1 + (R_1 - jX_1)}{R_M + jX_m} = \mathcal{E}_1 e^{-j\gamma}.$$

Для машин понад декілька кіловат $C_1 = 1,02 \div 1,05$, а аргумент $\gamma < 1^\circ$. Тому практично приймають $\gamma = 0$, а комплексний коефіцієнт \mathcal{E}_1 замінюють модулем C_1 .

При практичних розрахунках асинхронних машин загального використання можна прийняти $C_1 = 1$. Похибка при цьому не перевищить 1-5%, а заступна схема буде мати вигляд, наведений на рис.2.3,б.

Перетворення активної потужності в асинхронному двигуні можна проілюструвати на енергетичній діаграмі (рис.2.3). Статор споживає із мережі потужність P_1 . Частина цієї потужності витрачається на електричні втрати P_{E1} в активному опорі R_1

$$P_{E1} = m_1 I_1^2 R_1,$$

а друга частина витрачається на магнітні втрати в сталі P_{cm1} . Залишкова потужність за допомогою магнітного поля передається з статора на ротор. Ця потужність називається електромагнітного.

$$P_{12} = P_1 - P_{E1} - P_{cm1} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{s}.$$

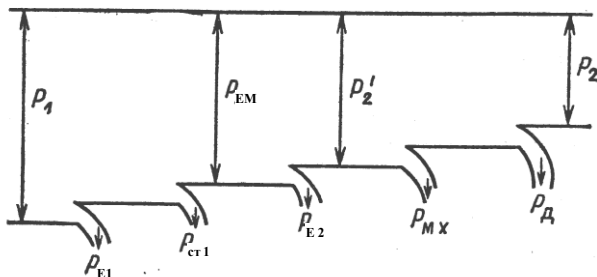


Рис.2.4. Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Електромагнітна потужність частково витрачається на втрати в роторі, які складаються із електричних втрат в обмотці ротора P_{E2} та магнітних втрат в роторі P_{cm2} . Магнітні втрати в роторі малі через

малу частоту $f_2 = f_1 s \approx 0,5 \div 2$ Гц, і тому їх не враховують. Потужність $P'_2 = P_{12} - P_{E2}$ перетворюється в повну механічну потужність.

Корисна механічна потужність P_2 , що знімається з валу двигуна, буде меншою за P'_2 на величину механічних втрат P_{MX} (тертя в підшипника, вентиляція) і додаткових втрат P_D , що викликаються вищими гармоніками

$$P_2 = P'_2 - P_{MX} - P_D.$$

2.3. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Велике значення для оцінки роботи асинхронного двигуна має механічна характеристика, що являє собою залежність обертового моменту M від швидкості обертання ротора n_2

$$M = f(n_2) \text{ або } M = f(s).$$

Визначимо електромагнітний момент через електромагнітну потужність P_{12}

$$P_{12} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}. \quad (2.14)$$

Із заступної Г – подібної схеми (рис.2.3,б) визначимо струм I_2'

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (2.15)$$

Обертовий момент визначимо із формули

$$M = \frac{P_{12}}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s}. \quad (2.16)$$

Підставивши (2.15) в (2.14) отримаємо

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 s \left[\left(\frac{R_1 + R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{X_1 + X_2'}{s}\right)^2 \right]}. \quad (2.17)$$

Надаючи значення s , при відомих параметрах двигуна можна визначити M і побудувати залежності $M = f(s)$ або $M = f(n_2)$. На рис.2.5 зображені графічно ці залежності.

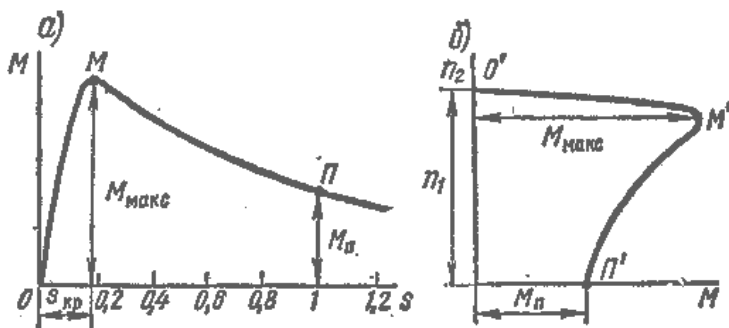


Рис.2.5. Механічні характеристики асинхронного двигуна

Режиму неробочого ходу на рис.2.5 відповідають точки O і O' . Режим, при якому двигун розвиває максимальний момент, характеризується точками M і M' , а режим, при якому ротор нерухомий – точками Π і Π' .

Ковзання $s_{кр}$, при якому момент набуває максимального значення, називається критичним. Його можна визначити, взявши похідну від моменту по ковзанню $\frac{dM}{ds}$ і прирівнявши її до нуля

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.18)$$

В асинхронних машинах R_1 в декілька разів менший індуктивних опорів X_1 і X'_2 , то з достатньою для практики точністю можна вважати, що

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}. \quad (2.19)$$

Підставивши значення (2.19) в (2.18) і нехтуючи величиною R_1 отримаємо вираз для максимального моменту

$$M_{max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X'_2)}. \quad (2.20)$$

Таким чином, M_{max} не залежить від активного опору R_2 ротора, але цей опір визначає величину критичного ковзання (2.19).

Величина $K_M = \frac{M_{max}}{M_H}$ називається перевантажувальною здатністю двигуна і для двигунів загального використання складає $1,7 \div 1$. При цьому критичне ковзання $s_{кр} = 0,1 \div 0,2$.

Пусковий момент M_{II} , який розвиває двигун при нерухомому роторі, можна визначити, коли в (2.17) підставити $s = 1$.

$$M_{II} = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 [(R_1 + R_2') + (X_1 + X_2')^2]} . \quad (2.21)$$

Відношення $K_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}$ називається кратністю пускового моменту і знаходиться для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором в межах $0,7 \div 1,8$. При цьому кратність пускового струму повинна бути не більше $5 \div 7$.

На практиці для побудови механічної характеристики широко використовується наближена формула

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} . \quad (2.22)$$

Формулу (2.22) вперше застосував М. Клосс, тому вона називається формулою Клосса. Вона дає можливість побудувати механічну характеристику за каталожними даними.

За відомими із каталогу даними M_H , s_H , $K_M = \frac{M_{max}}{M_H}$ визначають $s_{кр}$ за формулою

$$s_{кр} = s_H (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) .$$

Потім при відомих M_{max} і $s_{кр}$, надаючи значень ковзанню s , визначають момент M .

Ця формула дає задовільні результати при постійних параметрах асинхронної машини.

2.4. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочими характеристиками асинхронного двигуна називаються залежності швидкості обертання ротора n_2 , моменту на валу M_2 , струму статора I_1 , коефіцієнта корисної дії η і $\cos \phi_1$ від потужності

P_2 при $U_1 = const$, $f_1 = const$. Робочі характеристики дають можливість визначити всі основні величини, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях. Ці характеристики можна будувати за розрахунковими даними або визначити експериментальним шляхом.

На рис.2.6 наведено наближений вигляд робочих характеристик.

Залежність $n_2 = f(P_2)$. При зміні навантаження від $P_2 = 0$ (режим неробочого ходу) до $P_2 = P_{2H}$ швидкість обертання ротора змінюється незначно (на 2-6%), так як номінальне ковзання не перевищує $0,02 \div 0,06$. Тому ця характеристика є досить "жорсткою".

Залежність $M_2 = f(P_2)$. Момент M_2 пов'язаний з P_2 залежністю

$$P_2 = M_2 \omega_2,$$

де $\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ - кутова швидкість обертання ротора в рад./сек.

Оскільки n_2 змінюється мало, то залежність $M_2 = f(P_2)$ являє собою майже пряму, що проходить через початок координат.

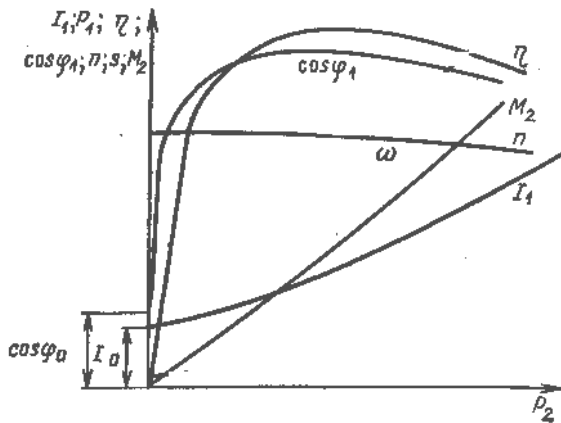


Рис.2.6. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Залежність $I_1 = f(P_2)$. При неробочому ході ($P_2 = 0$, $M_2 = 0$) струм I_1 дорівнює струму неробочого ходу I_{10} . Внаслідок наявності повітряного проміжку між статором і ротором I_{10} складає 25-50% від номінального струму статора I_{1H} . Із збільшенням струму I_2 буде зростати і струм I_1 .

Залежність $\eta = f(P_2)$. Ця залежність має такий же характер, як і в трансформатора. Максимум ККД настає при навантаженні, коли змінні втрати (електричні втрати в обмотках статора і ротора; додаткові втрати, що дорівнюють $0,005 P_2$) дорівнюють постійним втратам (магнітні втрати в сталі і механічні втрати від тертя). В асинхронних двигунах загального використання ця умова відповідає навантаженню, що дорівнює 60-80% від номінального.

Для машин середньої потужності максимальне значення ККД $\eta_{max} = 0,7 \div 0,9$, а для машин великої потужності $\eta_{max} = 0,92 \div 0,94$.

Залежність $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. При зміні навантаження від неробочого ходу ($P_2 = 0$) до $P_2 = P_{2H}$ коефіцієнт потужності зростає від $\cos \varphi_1 = 0,09 \div 0,18$ до деякої максимальної величини $\cos \varphi_1 = 0,7 \div 0,9$ (у двигунів до 100кВт) і до $\cos \varphi_1 = 0,9 \div 0,92$ (у двигунів понад 100 кВт). При подальшому навантаженні $\cos \varphi_1$ дещо зменшується.

2.5. Пуск асинхронних двигунів

Процес пуску асинхронних двигунів повинен бути простим і без складних пускових пристроїв. При цьому пусковий момент повинен бути достатньо великим, а пускові струми – малими.

Практично існує два способи пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором:

- безпосередній пуск;
- пуск при пониженій напрузі.

Безпосередній пуск. При безпосередньому пуску обмотка статора без будь-яких пускових пристроїв під'єднується до мережі (рис.2.7).

Величину пускового моменту можна визначити із рівняння механічної характеристики при $S = 1$.

$$M_{II} = \frac{mU_1^2 R_2'}{\omega_1 (R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}.$$

Відношення $\frac{M_{II}}{M_H} = K_{II}$ - називають кратністю пускового моменту. Для двигунів потужністю 0,6-100 кВт $K_{II} = 1 \div 2$. Пусковий струм досягає величини $I_{II} = (5 \div 7) I_H$.

Тривалість безпосереднього пуску складає долі секунди у двигунів невеликої потужності і декілька секунд у потужних двигунів.

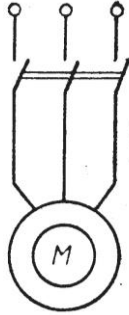


Рис.2.7.

При пуску швидкість ротора поступово збільшується, а його ковзання і ЕРС зменшуються, внаслідок чого зменшуються струми в статорі і роторі.

Якщо пуск проводиться рідко, то незважаючи на великі пускові струми, обмотки не встигають нагрітися вище допустимих температур. Кріплення обмоток розраховують так, щоб вони могли витримувати електромагнітні зусилля, що виникають при пуску.

Обмеження для прямого пуску накладає мережа, яка не допускає пониження напруги під час пуску більше, ніж на 10÷15%.

Пуск при пониженій напрузі. В малопотужних мережах для обмеження пускового струму використовують пуск при пониженій напрузі, що дає можливість зменшити пусковий струм і спад напруги в мережі. Недоліком такого способу є зменшення пускового моменту пропорційно квадрату напруги. Тому цей спосіб пуску використовують в тих випадках, коли навантажувальний момент на валу малий або відсутній зовсім. Для пониження напруги, що подається на обмотку статора, використовують такі схеми:

- пуск через реактор (рис.2.8);
- пуск через автотрансформатор (рис.2.9);
- перемиканням обмотки статора із зірки на трикутник.

Пуск через реактор відбувається при вимкненому вимикачі В₂. Потім включають вмикають В₁. Внаслідок спаду напруги на реакторі напруга на обмотці статора зменшиться до величини U_1 , пропорційно зменшаться пусковий струм I_{II} і пусковий момент M_{II}

$$I_{II} = I_{III} \frac{U_1}{U_{IH}}; \quad M_{II} = M_{III} \left(\frac{U_1}{U_{IH}} \right)^2, \quad (2.23)$$

де $I_{пн}$, $M_{пн}$ - пускові струм і момент при номінальній напрузі $U_{1н}$ (при безпосередньому пуску).

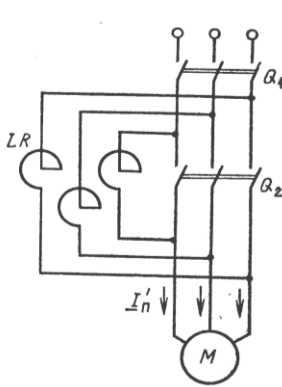


Рис.2.8. Пуск асинхронного двигуна через реактор

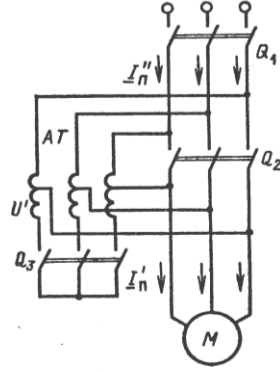


Рис.2.9. Пуск асинхронного двигуна через автотрансформатор

Після закінчення розгону ротора двигуна вмикають вимикач B_2 , що призводить до шунтування реактора. До обмотки статора тепер підводиться повна напруга мережі. Відповідним підбором опору реактора можна обмежити пусковий струм до будь-якої величини. Однак, не слід забувати, що одночасно із зменшенням пускового струму зменшується і момент. Тому напругу U_1 практично вибирають рівною $0,65 U_{1н}$.

Пуск через автотрансформатор здійснюють таким чином. При ввімкненому вимикачі B_1 вмикають вимикач B_2 . При цьому на обмотку статора двигуна подається напруга U_1 понижувального автотрансформатора АТ. Струм у вторинній обмотці автотрансформатора і обертовий момент на початку момент пуску визначатимуться рівняннями (2.23). Струм в первинній обмотці автотрансформатора, а відповідно і струм $I'_п$, що поступає з мережі, буде менший за величиною

від $I_{пн}$ в число раз, що дорівнює відношенню напруг $\frac{U_1}{U_{1н}}$, тобто

$$I'_п = I_{пн} \left(\frac{U_1}{U_{1н}} \right) = I_{пн} \left(\frac{U_1}{U_{1н}} \right)^2. \quad (2.24)$$

Отже, при автотрансформаторному пуску зменшення струму, що споживається з мережі, відбувається більш різко, ніж при пуску через реактор.

Після закінчення пуску вимикач B_1 замикається і на двигун подається напруга мережі. Розмикання вимикача B_1 необхідне, щоб запобігти перегорянню обмотки автотрансформатора, так як при замиканні B_2 частина обмотки автотрансформатора закорочується і наруга мережі прикладається тільки на невеликі частини обмоток, внаслідок чого різко збільшується струм. За допомогою автотрансформатора напруга U_1 понижується до величини $(0,55 \div 0,75) U_{1H}$.

Пуск двигуна з перемиканням обмотки статора із зірки на трикутник можливий тоді, коли обмотка статора може бути з'єднана зіркою або трикутником і напруга мережі відповідає з'єднанню обмотки статора трикутником.

Тоді при пуску такого двигуна обмотку статора з'єднують зіркою і вмикають в мережу. Напруга на фазі понизиться в $\sqrt{3}$ раз. Пусковий струм в цьому випадку дорівнює

$$I_{пY} = \frac{U_{1H}}{(\sqrt{3} \cdot Z_K)},$$

де U_{1H} - лінійна номінальна напруга, Z_K - опір короткого замикання фази двигуна.

Після того, як ротор двигуна набере певних обертів, обмотку статора за допомогою перемикача вмикають трикутником. При цій схемі і буде відбуватися подальша робота двигуна.

Коли при безпосередньому пуску обмотка статора була б з'єднана трикутником, то лінійний пусковий струм був би рівний

$$I_{п\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{1H}}{Z_K}.$$

Таким чином, перемиканням із зірки на трикутник пусковий струм знижується в 3 рази.

$$\frac{I_{п\Delta}}{I_{пY}} = 3.$$

Пусковий момент зменшиться пропорційно квадрату відношення фазних напруг, тобто також в 3 рази.

2.6. Регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронних двигунів

Можливі способи регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна витікають із формули

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s). \quad (2.25)$$

Як видно з рівняння (2.25) існує три можливих способи регулювання швидкості обертання ротора асинхронних двигунів:

- зміною частоти f_1 напруги живлення;
- зміною числа пар полюсів p ;
- зміною величини ковзання s .

Крім вказаних способів можна регулювати швидкість ще зміною напруги живлення.

Всі вказані способи регулювання швидкості мають практичне застосування. Розглянемо їх окремо.

Регулювання швидкості зміною частоти f_1 . Цей спосіб регулювання швидкості дає можливість плавно змінювати швидкість в широкому діапазоні (10:1) і використовувати при цьому найбільш надійні і дешеві асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Однак для зміни частоти напруги живлення необхідно мати окреме джерело живлення із змінною частотою. В якості такого джерела використовують синхронний генератор з змінною швидкістю обертання або напівпровідниковий перетворювач частоти.

Характеристики асинхронного двигуна при зміні частоти залежать від співвідношення між величиною напруги U_1 і частоти f_1 , тобто при зміні частоти необхідно за певним законом змінювати величину напруги живлення U_1 .

Максимальний момент двигуна наближено (нехтуючи опором R_1) визначається за формулою

$$M_{max} \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X'_2)}.$$

Враховуючи, що $\omega_1 = 2\pi f_1$; $X_1 = 2\pi f_1 L_1$; $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ отримаємо

$$M_{max} \approx K_1 \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (2.26)$$

де K_1 - постійний коефіцієнт.

Відношення моментів при двох значеннях частоти f_1 дорівнює

$$\frac{M_{max1}}{M_{max2}} = \left(\frac{U_{1(1)}}{U_{1(2)}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}} \right)^2, \quad (2.27)$$

де індекси (1) і (2) відносяться до різних частот.

З (2.27), можна отримати в загальному вигляді закон зміни U_1 при регулюванні частоти f_1

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \sqrt{\frac{M_{max2}}{M_{max1}}}. \quad (2.28)$$

Якщо при регулюванні швидкості обертання необхідно щоб $M_{max} = const$, то з (2.28) отримаємо

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} = const; \quad \frac{U_{1(1)}}{f_{1(1)}} = \frac{U_{1(2)}}{f_{1(2)}} = const, \quad (2.29)$$

тобто для здійснення регулювання з постійним моментом необхідно напругу живлення статора змінювати пропорційно його частоті. Слід відмітити, що при регулюванні швидкості за законом (2.29) основний магнітний потік при різних значеннях f_1 майже незмінний

$$\Phi \approx \frac{U_1}{f_1 \cdot 4,44 \cdot \omega_1 K_{об}} = const.$$

Механічні характеристики двигуна при регулюванні швидкості з $M_{max} = const$ наведені на рис.2.10.

Якщо регулювання відбувається з постійною механічною потужністю P_2 , то момент M_{max} повинен змінюватися обережно пропорційно швидкості обертання і відповідно f_1

$$\frac{M_{max(2)} \cdot \omega_{(2)}}{M_{max(1)} \cdot \omega_{(1)}} = const,$$

або

$$\frac{M_{max(2)}}{M_{max(1)}} = \frac{\omega_{(1)}}{\omega_{(2)}} = \frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}}. \quad (2.30)$$

Підставивши (2.30) в (2.28), отримаємо закон зміни напруги при регулюванні з постійною потужністю

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \sqrt{\frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}}}. \quad (2.31)$$

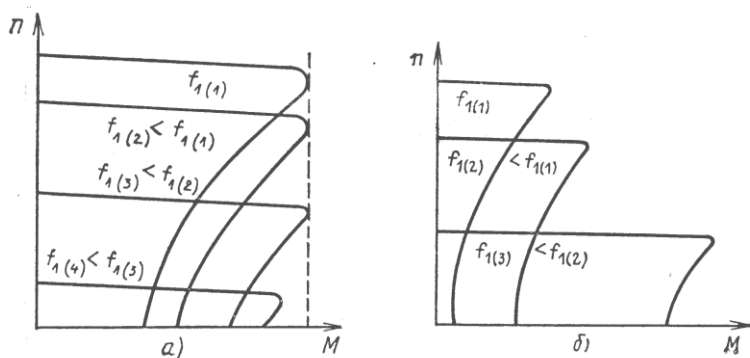


Рис.2.10. Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних f_1 і $M_{max} = const$ (а), $P_2 = const$ (б).

Механічні характеристики двигуна при регулюванні з $P_2 = const$ наведені на рис.2.10,б.

Частотний спосіб регулювання швидкості є економічним, оскільки енергетичні характеристики двигуна при цьому залишаються практично незмінними. Недоліком такого способу регулювання швидкості є велика вартість джерела живлення і його конструктивна складність.

Регулювання швидкості зміною напруги живлення. В такому способі регулювання напруга живлення зменшується. Оскільки момент пропорційний U_1^2 , то механічні характеристики при зменшенні напруги будуть розміщені нижче природньої. Якщо момент навантаження залишається постійним, то при пониженні напруги швидкість буде зменшуватися, а ковзання зростати. Зміна ковзання в цьому випадку можлива в межах $0 < s < s_{кр}$. Для розширення діапазону регулювання слід збільшити $s_{кр}$ за рахунок збільшення активного опору обмотки ротора.

Регулювання швидкості обертання ротора зміною напруги живлення має суттєвий недолік, який полягає в тому, що при такому способі регулювання збільшуються втрати і знижується ККД. При зменшенні U_1 зменшується і Φ . При постійному моменті навантаження $M = M_c = const$, зростає струм, а відповідно і електричні втрати в роторі. Тому такий спосіб регулювання швидкості можна використовувати тільки в мікродвигунах, для яких величина ККД не має вирішального значення.

ТЕМА 3. СИНХРОННІ МАШИНИ

3.1. Конструктивні схеми і принцип роботи синхронної машини

Синхронною машиною називають таку машину змінного струму, у якій частота обертання ротора не залежить від навантаження і визначається лише частотою напруги живлення та кількістю пар полюсів обмотки збудження.

Синхронна машина має дві обмотки. Одна обмотка (обмотка збудження) під'єднується до джерела постійної напруги і створює основне магнітне поле. Друга обмотка є трифазною обмоткою якоря, в якій індукуються ЕРС машини.

Найбільшого розповсюдження набули синхронні машини, у яких обмотка якоря розташована на статорі, а обмотка збудження – на роторі. В малопотужних машинах можливе і обернене виконання, коли обмотка збудження розташована на статорі, а обмотка якоря обертається. В електромагнітному відношенні обидві конструкції рівноцінні. Більшого розповсюдження набула перша конструкція, так як в цьому випадку до ковзаючого контакту на роторі подається потужність збудження, що складає лише 0,3-3% номінальної потужності машини. Це дає можливість забезпечити задовільну роботу рухомого контакту.

Якщо обмотку збудження під'єднати до джерела постійного струму і ротор синхронного генератора привести в рух з швидкістю n об/хв, то магнітний потік Φ_0 обмотки збудження, що обертається разом з ротором, буде перетинати провідники обмотки статора і в результаті цього в трьох фазних обмотках статора будуть індукуватися три однакових за амплітудою електрорушійні сили частотою

$$f = \frac{pn}{60},$$

де p - число пар полюсів.

Для отримання стандартної частоти 50 Гц при різних швидкостях обертання ротора синхронні генератори виготовляють з різними числами пар полюсів.

Відповідно до принципу зворотності електричних машин синхронна машина може працювати в режимі двигуна. За своєю конструкцією синхронні двигуни в принципі не відрізняються від синхронних генераторів, але все-таки мають деякі особливості: повітряний проміжок менший, ніж в генераторах такої ж потужності, що сприяє змен-

шенню пускового струму; їх виготовляють переважно явнополосними $2p = 6 \div 24$. Тому синхронні машини, що випускаються промисловою, мають цільове призначення – або синхронні генератори, або синхронні двигуни.

Принцип роботи синхронного двигуна ґрунтується на законі Біо-Савара-Лапласа: під час живлення трифазної обмотки статора синхронної машини виникає обертове магнітне поле статора, яке взаємодіє з магнітним полем ротора, внаслідок чого виникає електромагнітний момент, який обертає ротор синхронного двигуна. Щоб момент мав один напрям, поля повинні бути нерухомими одне відносно одного. Це буде в тому випадку, коли ротор і його магнітне поле будуть обертатися із швидкістю обертання магнітного поля статора.

Сердечник статора є пустотілим циліндром, який зібраний з окремих кільцевих пластин електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. На внутрішній поверхні циліндра розміщені пази для вкладання обмотки якоря. При зовнішньому діаметрі циліндра більше 1 м кожне кільце складають з окремих пластин, що називаються сегментами. Сердечник розташований в корпусі статора. Пази переважно мають прямокутний переріз і в них вкладають двошарові петльові обмотки.

За конструкцією ротора синхронні машини поділяються на явнополосні і неявнополосні.

Явнополосний ротор має явновиражені полюси, сердечники яких в потужних машинах збирають із пластин конструкційної сталі товщиною $1 \div 2$ мм, в малопотужних машинах – з електротехнічної сталі товщиною $0,5 \div 1$ мм. В машинах малої потужності полюси кріпляться болтами до валу (рис.3.1,а) у тихохідних машинах – до ободу ротора (рис.3.1,б). В крупних і швидкохідних машинах полюси прикріплюють до ободу ротора за допомогою Т-подібних хвостів (рис.3.1,в) або хвостів, що мають форму хвоста ластівки (рис.3.1,г).

Обмотку збудження для кращого охолодження в потужних машинах виготовляють із неізолюваної мідної шини, намотаної на ребро. Між сусідніми витками розміщують ізоляційні прокладки, просочені смолою, після чого котушку запікають і встановлюють на полюсі. В машинах невеликої потужності котушки обмотки збудження виготовляють з ізолюваних провідників прямокутного або круглого перерізу.

Полюси ротора часто мають демпферну обмотку, яку розміщують в пазах полюсних наконечників. Мідні стержні цієї

обмотки з торців замикають пластинами або кільцями. Демпферні обмотки поділяються на поздовжні і поздовжньо-поперечні.

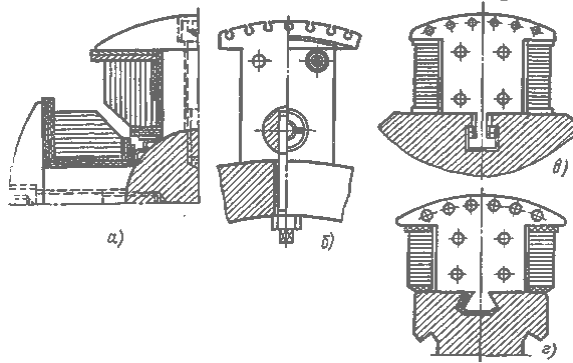


Рис.3.1. Кріплення полюсів до ротора

Поздовжня обмотка створюється, коли пластини замикають з торців стержні тільки одного полюса (рис.3.2). В поздовжньо-поперечній обмотці з торців з'єднані стержні всіх полюсів. (рис.3.3).

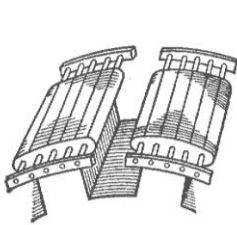


Рис.3.2 Поздовжня демпферна обмотка

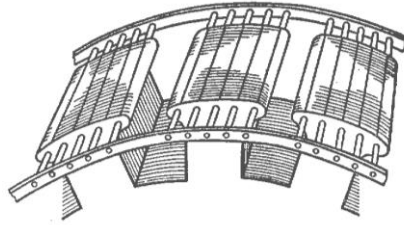


Рис.3.3 Поздовжньо-поперечна демпферна обмотка

Демпферна обмотка виконує певні функції. В генераторах вона послаблює поле зворотної послідовності при несиметричному навантаженні і понижує амплітуду коливань ротора, які виникають іноді при паралельній роботі генератора. В двигунах вона виконує роль пускової обмотки, а також понижує амплітуду коливань ротора при пульсації навантажувального моменту.

Загальний вигляд ротора явноплюсної машини зображений на рис.3.4.

Ротор даної конструкції використовується в синхронних машинах при швидкості обертання $n \leq 1000$ об/хв., коли можна використати явновиражені полюси з точки зору механічної міцності.

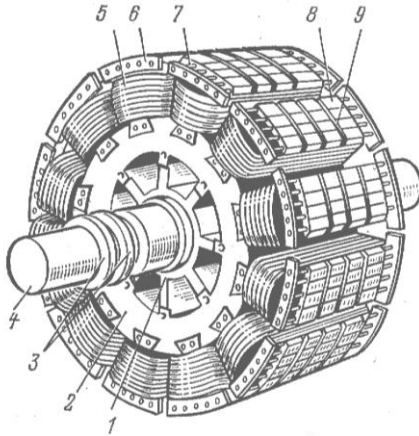


Рис.3.4. Ротор явнополюсної синхронної машини: 1-кістяк ротора; 2-обод ротора; 3-контактні кільця; 4-вал; 5-котушка обмотки збудження; 6-сегмент демпферної обмотки; 7-стержень демпферної обмотки; 8-пакет сердечника полюса; 9-вентиляційний канал в полюсі

Найчастіше ротор явнополюсного синхронного генератора обертається гідравлічною турбіною. Такий генератор називається гідрогенератором. Залежно від потужності гідротурбіни і напору води, швидкість обертання коливається від 50 до 600 об/хв., а число полюсів складає декілька десятків.

3.2. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при неробочому ході

Неробочим ходом автономного синхронного генератора називається такий режим роботи, коли ротор обертається, а обмотка якоря розімкнена ($I_a = 0$). В цьому випадку магнітне поле можна розкласти на дві складові: основне поле, магнітні лінії якого проходять через повітряний проміжок і зчіплюються з обмоткою якоря, і поле розсіяння полюсів, яке зчіплюється тільки з обмоткою збудження.

Магнітний потік основного поля при обертанні ротора індукуює в обмотці якоря ЕРС

$$E_0 = 4,44 f w_a K_{oba} \Phi_3, \quad (3.1)$$

де w_a - число витків фази; K_{oba} - обмотковий коефіцієнт обмотки якоря; Φ_3 - потік першої гармоніки магнітного поля збудження.

При невеликому струмі збудження I_z , магнітний потік Φ_z малий, магнітопровід не насичений. В цьому випадку характеристика неробочого ходу $E_0 = f(I_z)$ має вигляд прямої лінії (рис.3.5). При зростанні магнітного потоку відбувається насичення магнітопроводу і характеристика неробочого ходу стає нелінійною. Номінальний режим роботи синхронних генераторів визначається точкою, що розміщена на „коліні” характеристики неробочого ходу. При цьому коефіцієнт насичення $K_{нас} = ab/ac$ складає $1.1 \div 1.4$. Отже, ця характеристика дає можливість оцінити насичення магнітного кола машини, крім цього її використовують для побудови векторних діаграм і на інших характеристиках машини.

З метою полегшення математичного аналізу роботи синхронної машини іноді нелінійну криву неробочого ходу замінюють прямою лінією, яку проводять як дотичну до кривої неробочого ходу (рис.3.5, пряма 1), або через точку b , що відповідає даному режиму роботи. В першому випадку спрямлена характеристика відповідає роботі машини при відсутності насичення. В другому випадку вона враховує деяке усереднене насичення магнітного кола.

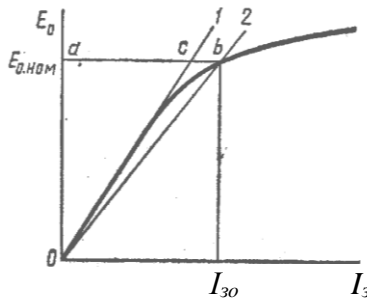


Рис.3.5. Характеристика неробочого ходу синхронного генератора

Напруги, що індукуються в обмотці якоря при неробочому ході, повинні бути синусоїдними, бо при цьому зменшаться додаткові втрати від вищих гармонік. Критерієм оцінки є коефіцієнт спотворення

$$K_c = \frac{\sqrt{\sum E_{ov}^2}}{E_{o1}},$$

де $v \neq 1$; E_{ov}, E_{o1} - амплітудні (або діючі) значення основної і вищих гармонік ЕРС.

Стандартами передбачено, що коефіцієнт спотворення кривої лінійної напруги в трифазних генераторах потужністю до 1МВА не повинен перевищувати 10%, а для генераторів потужністю понад 1 МВА – 5%.

Щоб отримати криву ЕРС, наближену до синусоїди, перш за все необхідно, щоб крива магнітного поля обмотки збудження була по можливості наближена до синусоїди. З цією метою в неявнополюсних машинах обмотку збудження виготовляють розподіленою, а в явнополюсних машинах збільшують повітряний проміжок під краями полюса в 1,5÷2 рази, ніж під серединою (рис.3.6). Обмотку якоря виконують розподіленою ($q = 4\div 6$) з вкороченим кроком ($y = 0,8\tau$).

Щоб знищити треті гармоніки струму і зменшити втрати в машині, трифазну обмотку якоря з'єднують зіркою. При цьому будуть відсутні також і треті гармоніки в лінійних напругах. Вказані заходи дозволяють отримати на виході генератора практично синусоїдну ЕРС.

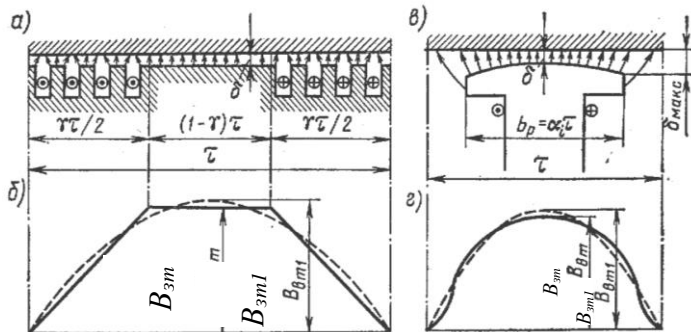


Рис.3.6. Магнітне поле обмотки збудження в повітряному проміжку неявнополюсної (а) і явнополюсної (в) машин

Магнітне поле, що створюється обмоткою збудження, характеризується коефіцієнтами, за рахунок яких реальний розподіл індукції в повітряному проміжку зводиться до синусоїдного. До цих коефіцієнтів відносяться:

1. Коефіцієнт форми кривої поля збудження

$$K_3 = B_{zm1} / B_{zm} \quad (3.2)$$

- відношення амплітуди першої гармоніки B_{zm1} індукції поля збудження в повітряному проміжку до амплітуди B_{zm} дійсного розподілу цієї індукції.

2. Коефіцієнт потоку збудження

$$K_{\phi} = \frac{\Phi}{\Phi_{31}} \quad (3.3)$$

- відношення потоку Φ , створеного обмоткою збудження в повітряному проміжку, до потоку першої гармоніки Φ_{31} цього поля.

3. Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття α_{δ}

$$\alpha_{\delta} = \frac{B_{\delta_{зсп}}}{B_{\delta_{зм}}} \quad (3.4)$$

- відношення середньої індукції в повітряному проміжку $B_{\delta_{зсп}}$ до індукції на осі полюса $B_{\delta_{зм}}$.

Визначаємо ці коефіцієнти для неявнополюсної і явнополюсної синхронних машин. На рис.3.6а, б зображено розподіл магнітного поля збудження в повітряному проміжку в межах одного полюсного ділення для неявнополюсної машини. Якщо розглядати обмотку збудження як однофазну, яка розподілена на ділянці $\gamma\tau$ кола ротора, то при заданому трапецевидному розподілі індукції поля збудження отримаємо для першої гармоніки (штрихова лінія) рівність

$$B_{3m1} = \frac{4B_{3m}K_{p.3}}{\pi}, \quad (3.5)$$

де $K_{p.3} = \frac{\sin(\pi\gamma/2)}{\pi\gamma/2}$ - коефіцієнт розподілу для обмотки збудження;

$\gamma = Z_{32}/Z_2$ - коефіцієнт завантаження кола ротора обмоткою збудження; Z_{32} - число пазів ротора заповнених провідниками обмотки; Z_2 - повне число пазових ділень ротора.

Отже, коефіцієнт форми кривої поля збудження дорівнює

$$K_3 = \frac{B_{3m1}}{B_{3m}} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin(\pi\gamma/2)}{\pi\gamma/2} = \frac{8 \sin(\pi\gamma/2)}{\pi^2\gamma}. \quad (3.6)$$

Магнітний потік обмотки збудження дорівнює

$$\Phi = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta} B_{\delta_{зм}}. \quad (3.7)$$

При трапецевидному розподілі індукції потік Φ складається з двох частин

$$\Phi = \Phi' + \Phi'',$$

де Φ' - потік, що відповідає ділянці $(1-\gamma)\tau$ кола ротора, що не заповнена обмоткою; Φ'' - потік, що відповідає ділянці $\gamma\tau$ кола ротора, в пазах якої вкладається обмотка збудження.

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = B_{zm} (1-\gamma) \tau l_{\delta} + 0,5 B_{zm} \gamma \cdot \tau \cdot l_{\delta} = B_{zm} (1-\gamma/2) \tau l_{\delta}. \quad (3.8)$$

Потік першої гармоніки поля збудження

$$\Phi_{\phi 1} = 2 B_{zm1} \tau l_{\delta} / \pi. \quad (3.9)$$

Отже, коефіцієнт потоку збудження дорівнює

$$K_{\phi} = \frac{\Phi}{\Phi_{\phi 1}} = \frac{(1-\gamma/2) \tau l_{\delta} B_{zm}}{(2/\pi) \tau l_{\delta} B_{zm1}} = \frac{\pi(1-\gamma/2)}{2K_3}. \quad (3.10)$$

З урахуванням (3.8) розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття дорівнює

$$\alpha_{\delta} = \frac{\Phi}{\tau l_{\delta} B_{zm}} = 1 - \gamma / 2. \quad (3.11)$$

З урахуванням (3.7) і (3.9) коефіцієнт полюсного перекриття дорівнює

$$\alpha_{\delta} = 2K_3 K_{\phi} / \pi. \quad (3.12)$$

На рис.3.6.в, г зображено розподіл магнітного поля збудження в повітряному проміжку для явнополюсної машини. Форма розподілу магнітного поля і коефіцієнт K_3 залежать від коефіцієнту полюсної дуги і від відношення δ_{max} / δ і δ / τ .

При $\alpha_{\delta} = 0,65 \div 0,75$; $\delta_{max} / \delta = 1 \div 2,5$; $\delta / \tau = 0,01 \div 0,05$ коефіцієнт $K_3 = 0,9 \div 1,2$.

Коефіцієнт магнітного потоку K_{ϕ} також залежить від форми розподілу магнітного паля і являє собою відношення площ, що обмежені розгляданими кривими. При вищевказаних значеннях α_{δ} , δ_{max} / δ , δ / τ коефіцієнт $K_{\phi} = 0,92 \div 1,1$.

3.3. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при навантаженні

Розглянемо роботу синхронного генератора на автономне симетричне навантаження. В цьому випадку через фази обмотки якоря будуть протікати рівні за величиною, але зсунені за фазою один відносно одного на електричний кут 120° , струми. Ці струми створять обертове магнітне поле з швидкістю обертання n_1 , що дорівнює швидкості обертання ротора n_2 . отже, магнітні потоки якоря Φ_a і збудження Φ_z будуть взаємно нерухомими. Результуюче магнітне поле машини при навантаженні буде створюватися спільною дією МРС

обмотки збудження і МРС обмотки якоря. Воно буде відрізнятись від поля при неробочому ході.

Дія МРС якоря на поле синхронної машини називається реакцією якоря. Характер цієї дії залежить від взаємного розміщення в просторі полів збудження та якоря. Магнітне поле обмотки збудження завжди направлено по осі полюса і обумовлює ЕРС в провідниках обмотки якоря. Вісь, що співпадає з віссю полюсів, називається поздовжньою віссю машини, а перпендикулярну до неї вісь – поперечною. Орієнтація поля якоря в просторі залежить від кута зсуву струму в провідниках від індукованої ЕРС. Надалі цей кут будемо позначати ψ . Кут ψ залежить від характеру навантаження генератора і змінюється від 90^0 до -90^0 . Розглянемо якісний прояв реакції в граничних випадках.

Струми в фазах відстають на кут $\psi = 90^0$. Якщо нехтувати активним опором фази, то можна вважати, що такому куту відповідає чисто індуктивний характер навантаження. На рис.3.7 зображені поперечний переріз двополюсного синхронного генератора і реакція якоря при індуктивному навантаженні.

Для спрощення фазна обмотка представлена у вигляді одного витка з діаметральним кроком. При обертанні ротора в фазних обмотках наводяться ЕРС, напрям яких визначається за правилом правої руки. Для зображеного на рис.3.7 моменту часу, напрям фазних ЕРС показано знаками: хрестик і крапка за межами провідника. Максимальна ЕРС буде індукуватися у фазі А, де індукція має максимальне значення.

На рис.3.8 зображена векторна діаграма ЕРС і струмів. Величину і напрям струмів у фазах визначають як проєкції векторів $\mathcal{F}_A, \mathcal{F}_B, \mathcal{F}_C$ на вертикальну вісь. На рис.3.7 всередині провідника показано напрям струмів у фазах. Як видно з рис.3.7 і рис.3.8 струм в фазі А в даний момент часу дорівнює нулю, а в фазах В і С струми рівні, але протилежні за напрямом. Ці струми створюють магнітне поле, напрям якого визначається за правилом свердлика. Відносно осі полюсів воно є поздовжнім і направлено на зустріч полю збудження. Отже, при індуктивному навантаженні в синхронному генераторі виникає поздовжня розмагнічуюча реакція якоря, яка спричинить зменшення результуючого потоку і індукованих в обмотках якоря ЕРС.

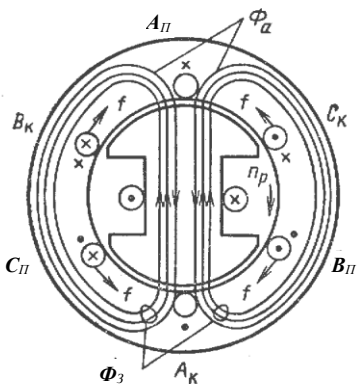


Рис. 3.7. Реакція якоря при індуктивному навантаженні

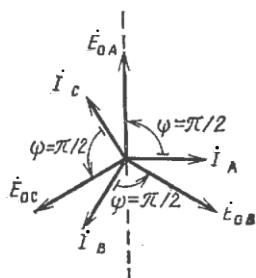


Рис. 3.8. Векторна діаграма синхронного генератора, що відповідає моменту часу, зображеного на рис.3.7

Визначивши за правилом лівої руки напрям сил f , що діють на провідники якоря (рис.3.7), встановимо, що на провідники, розміщені під одним полюсом, діють протилежно направлені сили і результуючий електромагнітний момент синхронної машини дорівнює нулю. Отже, при індуктивному навантаженні в синхронному генераторі не створюється електромагнітний момент.

Ємнісне навантаження. Струми фаз випереджують ЕРС на кут $\psi = 90^\circ$. На рис.3.9. наведений поперечний переріз синхронного генератора, що відповідає тому ж моменту часу, що й на рис.3.7. В даному випадку розподіл струмів в провідниках якоря зберігається таким, як і при індуктивному навантаженні, але з протилежним знаком.

Поле якоря відносно осі полюсів буде також поздовжнім, але буде спричиняти підмагнічуючу дію на поле збудження. Отже, при ємнісному навантаженні реакція якоря в синхронному генераторі буде намагнічуючою. Аналогічно попередньому випадку при ємнісному навантаженні також не створюється електромагнітний момент.

Навантаження, що відповідає куту $\psi = 0$. В даному випадку струми у фазах будуть співпадати за напрямом з індукованими в них ЕРС. Для цього синхронний генератор повинен бути навантажений не на активне, а на активно-ємнісне навантаження $Z = R - jX_C$. Ємнісний опір X_C підбирають так, щоб він компенсував індуктивний опір фази.

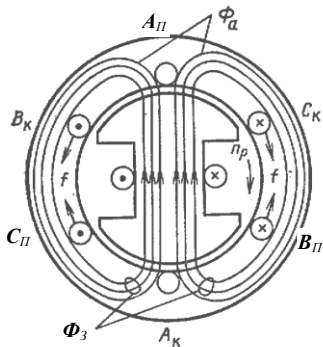


Рис. 3.9. Реакція якоря при чисто ємнісному навантаженні

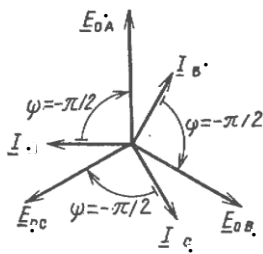


Рис. 3.10. Векторна діаграма синхронного генератора для положення ротора, зображеного на рис.3.9

Реакція якоря і векторна діаграма для розгляданого випадку наведені на рис.3.11 і 3.12. Максимальний струм буде в фазі А, де в даний момент ЕРС також має максимальне значення. В фазах В і С струми менші, ніж у фазі А, і протилежні за напрямом. Магнітне поле відносно осі полюса є поперечним. Воно буде послаблювати поле обмотки збудження на набігаючій половині полюса і підсилювати його на збігаючій половині полюса.

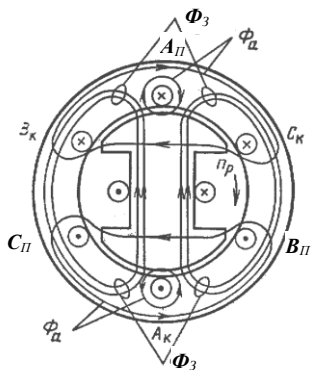


Рис.3.11. Реакція якоря синхронного генератора при $\psi = 0$

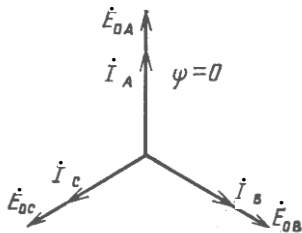


Рис.3.12. Векторна діаграма синхронного генератора, для положення ротора, що відповідає рис.3.11

Отже, при навантаженні, коли $\psi = 0$, виникає поперечна реакція якоря, що спотворює магнітне поле в повітряному проміжку синхронної машини. В даному випадку електромагнітні сили, що створені струмами провідників обмотки статора, спрямовані в один бік, що співпадає з напрямом обертання ротора. Оскільки ці провідники нерухомі, то виникає реакція на ротор, протилежного напрямку його обертання. Таким чином, при $\psi = 0$ електромагнітні сили в генераторі створюють гальмівний момент, що діє на ротор.

В загальному випадку, коли $0 < |\psi| < 90^\circ$, струм якоря I можна розкласти на дві складові (рис.3.13)

$$I_q = I \cos \psi ;$$

$$I_d = I \sin \psi .$$

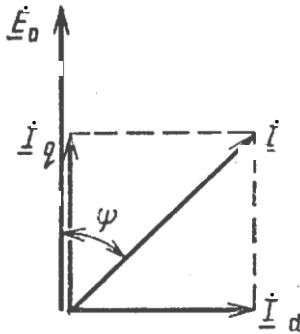


Рис.3.13. Поздовжня I_d і поперечна I_q складові струму якоря I

Одна з цих складових I_q , що співпадає за фазою з ЕРС, створює поперечну реакцію якоря і носить назву поперечного струму якоря. Друга складова I_d , перпендикулярна до ЕРС, створює поздовжню реакцію якоря і носить назву поздовжнього струму якоря. Таким чином, в загальному випадку в синхронній машині при навантаженні існує поздовжня і поперечна реакція якоря.

3.4. Параметри і характеристики синхронного генератора при автономному режимі

Оцінку робочим властивостям синхронного генератора дають на основі його характеристик, які можуть бути побудовані за розрахунковими даними, за допомогою векторних діаграм або за даними

відповідних дослідів. До найважливіших характеристик відносяться такі характеристики: неробочого ходу, трифазного короткого замикання, індукційна навантажувальна, зовнішня і регульовальна.

Характеристика неробочого ходу $E = f(I_3)$. Ця характеристика дозволяє зробити оцінку насиченого магнітного кола машини. Крім цього, її використовують для побудови векторних діаграм та інших характеристик машини.

Розрахунковим шляхом характеристику неробочого ходу можна отримати на основі розрахунку магнітного кола.

На рис.3.14 наведена схема для визначення характеристики неробочого ходу дослідним шляхом. При постійній швидкості обертання за допомогою резистора R_3 струм збудження змінюють від максимального значення до нуля, записуючи при цьому покази амперметра і вольтметра. Дослідна характеристика неробочого ходу зображена на рис.3.15. штриховою лінією.

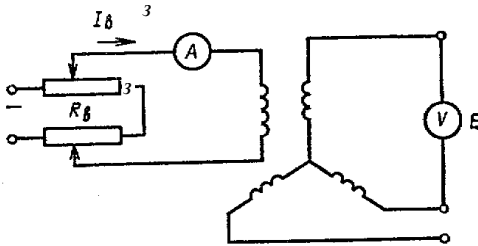


Рис.3.14. Схема для визначення характеристики неробочого ходу

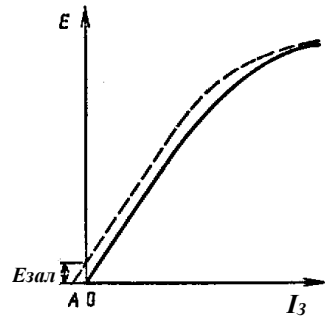


Рис.3.15. Характеристика неробочого ходу

При $I_3 = 0$ в обмотці якоря наводиться ЕРС від залишкового магнітного потоку, яка дорівнює 2÷3% від номінальної напруги. Для розрахунків використовують характеристику неробочого ходу, яку отримують шляхом зміщення експериментальної характеристики вправо на відрізок ОА (суцільна лінія).

Характеристику неробочого ходу іноді доцільно будувати у відносних одиницях. При переводі ЕРС у відносні одиниці її біжуче значення ділять на номінальну напругу обмотки якоря ($E_* = E/U_n$). Відносне значення струму збудження визначають як відношення вели-

чини даного значення струму збудження, до величини базового струму збудження $I_{зб}$ ($I_{з*} = I_з / I_{зб}$). За величину $I_{зб}$ приймають струм, що відповідає по характеристиці неробочого ходу при $E = U_H$.

Отримані таким чином характеристики називаються нормальними характеристиками неробочого ходу. В таблиці 1 наведені дані нормальних характеристик для явнополюсних і неявнополюсних синхронних машин.

Табл. 1.

$I_{з*}$		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
E_*	Явнопол.	0	0,53	1	1,23	1,3	-	-	-
	Неявнопол.	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,45	1,51

Характеристика трифазного короткого замикання являє собою залежність струму якоря при короткому замиканні від струму збудження $I_к = f(I_з)$ при постійній швидкості ротора. На рис.3.16. наведена схема для експериментального визначення характеристики короткого замикання. На рис.3.17 наведені характеристика короткого замикання 1 і характеристики неробочого ходу 2.

Завдяки малій величині R_a обмотка якоря синхронної машини являє собою практично чисто індуктивний опір. Тому струм $I_к$ відстає від ЕРС на 90^0 і створює в машині поздовжню розмагнічуючу реакцію якоря. Внаслідок цього величина струму $I_к$ є невеликою (при $I_{з*} \approx 1$ струм $I_к = I_H$). При короткому замиканні машина є ненасиченою і тому характеристика $I_к = f(I_з)$ являє собою пряму лінію.

Практичне значення цієї характеристики полягає в тому, що при сумісному її розгляді з характеристикою неробочого ходу можна визначити ненасичене значення X_d , МРС реакції якоря і відношення короткого замикання (ВКЗ).

Синхронний індуктивний опір X_d можна визначити, якщо припустити, що при короткому замиканні $U = 0$, $R_a = 0$, $I_q = 0$, $I_к = I_d$, тоді

$$\underline{E}_0 = j\underline{I}_к (X_{ad} + X_\sigma) = j\underline{I}_к X_d. \quad (3.13)$$

За рівнянням (3.13) побудована векторна діаграма синхронного генератора при короткому замиканні (рис.3.18).

Із (3.13) отримуємо

$$X_d = E_0 / I_к. \quad (3.14)$$

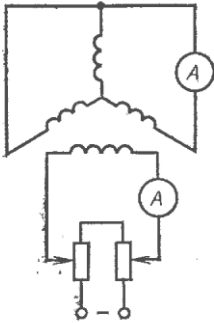


Рис.3.16. Схема досліду трифазного короткого замикання

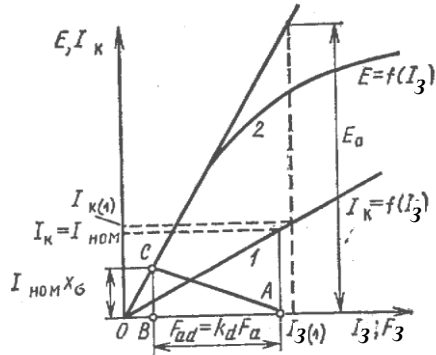


Рис.3.17. Характеристика трифазного короткого замикання

Якщо для довільного струму $I_{3(1)}$ за характеристикою короткого замикання визначається струм $I_{K(1)}$, а по спрямленій характеристиці неробочого ходу – E_0 (див. рис.3.17), то за (3.14) визначаємо ненасичене значення X_d .

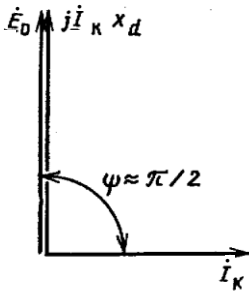


Рис.3.18. Векторна діаграма синхронного генератора при короткому замиканні

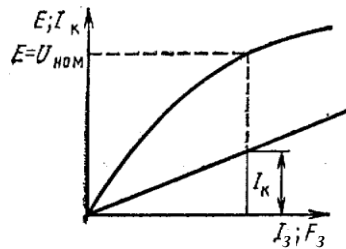


Рис.3.19. Визначення ВКЗ

Реакцію якоря при струмі $I_K = I_H$ можна визначити із характеристичного трикутника (див. рис.3.17). Катет BC являє собою спад напруги на індуктивному опорі розсіяння $I_H X_\sigma$, а катет AB дорівнює МРС реакції якоря при $I_K = I_H$. Для явнополюсної машини ця МРС

дорівнює F_{ad} , а для неявнополюсної – F_a . Для струмів, що відрізняються від номінального, МРС перераховується пропорційно струму.

Відношенням короткого замикання (ВКЗ) називається відношення струму короткого замикання I_k (рис.3.19), що виникає при МРС збудження, яка відповідає номінальній напрузі в режимі неробочого ходу, до номінального струму якоря

$$BKZ = I_k / I_H = I_{k*}$$

ВКЗ характеризує вплив реакції якоря на роботу машини. Синхронні машини з малим ВКЗ дають більшу зміну напруги при навантаженні, є менш стійкими при паралельній роботі, але такий генератор є більш дешевим. У гідрогенераторів $BKZ=1 \div 1,4$, а в турбогенераторів $BKZ=0,5 \div 0,7$.

Зовнішня характеристика показує, як змінюється напруга на затискачах генератора U при зміні струму навантаження I при $I_3 = const$, $\cos \varphi = const$. На характер зовнішніх характеристик значно впливає $\cos \varphi$. На рис.3.20 наведені зовнішні характеристики для трьох значеннях $\cos \varphi$. Для всіх характеристик вихідною точкою є точка, що відповідає номінальній напрузі при номінальному струмі якоря. Струми збудження, отримані при встановленні вихідної точки, надалі підтримуються незмінними. Зміна струму I проводиться активним опором, ввімкненим в коло якоря.

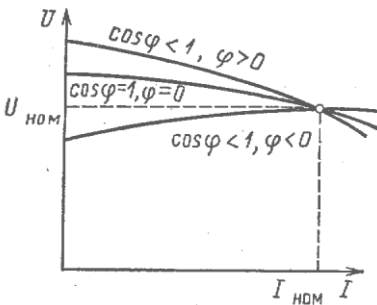


Рис.3.20. Зовнішні характеристики синхронного генератора

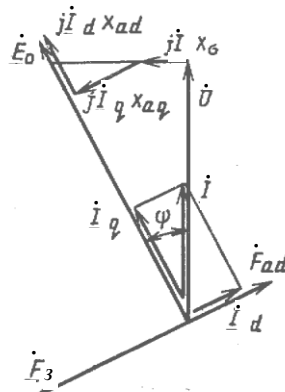


Рис.3.21. Векторна діаграма синхронного генератора при $\cos \varphi = 1$.

При активно-індуктивному навантаженні ($\varphi > 0$) із зменшенням струму I напруга на затискачах генератора зростає, бо зменшується вплив розмагнічуючої дії поздовжньої реакції якоря і спаду напруги $\mathcal{E}(R_a + jX_\sigma)$. Чим менший $\cos \varphi$, тим сильніше впливає поздовжня реакція якоря, внаслідок чого напруга із зменшенням струму I буде збільшуватися значніше.

При $\cos \varphi = 1$ (рис.3.21) в машині також буде мати місце поздовжня розмагнічуюча реакція якоря, внаслідок послаблення дії якої при зменшенні струму I напруга U буде збільшуватися, але меншою мірою, ніж при $\cos \varphi < 1$.

Якщо навантаження активно-ємнісне ($\varphi < 0$), то поздовжня реакція якоря має намагнічуючий характер і напруга зменшується при зменшенні I .

За зовнішніми характеристиками визначають номінальну зміну напруги синхронного генератора ΔU_H , тобто зміну напруги при зміні навантаження від нуля до номінального при незмінному струмі збудження

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

Переважно генератори працюють з відстаючим струмом при $\cos \varphi = 0,8$. В даному випадку $\Delta U = 20 \div 30\%$.

Регульовальні характеристики являють собою залежність $I_3 = f(I)$ при $U = const$, $\cos \varphi = const$, $n = const$. Регульовальні характеристики показують, як необхідно змінювати струм збудження I_3 , для того, щоб підтримувати незмінною напругу генератора при зміні струму навантаження I .

На рис.3.22 зображені регульовальні характеристики для трьох значень $\cos \varphi$. При активно-індуктивному ($\varphi > 0$) і активному ($\varphi = 0$) навантаженнях в генераторі існує поздовжня розмагнічуюча реакція якоря, яка при збільшенні I зростає. Щоб підтримувати постійну напругу, необхідно при зростанні навантаження компенсувати розмагнічуючу дію поздовжньої реакції якоря за рахунок збільшення струму збудження. Регульовальні характеристики для $\cos \varphi < 1$ ($\varphi > 0$) і $\cos \varphi = 1$ мають наростаючий характер.

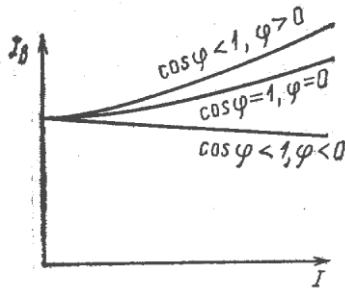


Рис.3.22. Регульовальні характеристики синхронного генератора

При активно-емнісному навантаженні ($\varphi < 0$) подовжня реакція якоря намагнічуюча і для збереження U на постійному рівні необхідно зменшувати струм збудження. В даному випадку характеристика має спадаючий характер.

3.5. Паралельна робота синхронних генераторів

Електромережі складаються із багатьох електричних станцій, що працюють паралельно, завдяки чому підвищується надійність, економічність виробництва і розподілу електричної енергії. Оскільки на кожній електростанції встановлені декілька генераторів, то в енергосистемі на паралельну роботу може бути ввімкнено сотні машин.

Процес вмикання генератора на паралельну роботу з мережею називається синхронізацією. Синхронізація може бути точною і грубою (самосинхронізація).

При точній синхронізації, щоб уникнути стрибків струму, необхідно виконати такі умови:

- 1) частота мережі і частота генератора повинні бути однаковими;
- 2) напруги мережі і частота генератора повинні співпадати за фазою і мати однакові амплітуди;
- 3) чергування фаз ЕРС генератора і напруги мережі повинні бути однаковими.

Рівність напруг досягається шляхом регулювання струму збудження синхронного генератора, а рівність частот – шляхом регулювання частоти обертання ротора генератора за рахунок зміни

частоти обертання парової або гідравлічної турбін. За цих умов в контурі мережа – генератор сума ЕРС дорівнює нулю $U_M + E_0 = 0$.

Решта умов перевіряється за допомогою спеціального приладу, що називається синхроскопом. Найпростіший синхроскоп є ламповий і являє собою три лампи розжарювання, що вмикаються між фазами генератора і мережі.

Використовують дві схеми виконання ламп: на погасання (рис. 3.23,а) і на обертання світла (рис.3.23,б).

Розглянемо першу схему (рис.3.23,а)

Тут лампи увімкнені між точками $A' - A''$, $B' - B''$ і $C' - C''$, кожна з ламп підключається до двох кінців однієї фази. В момент вмикання вимикача Q напруги між цими точками повинні бути рівні нулю і всі три лампи повинні погаснути. При цьому напруга \mathcal{E}_M і ЕРС \mathcal{E}_0 для кожної фази знаходяться в протифазі.

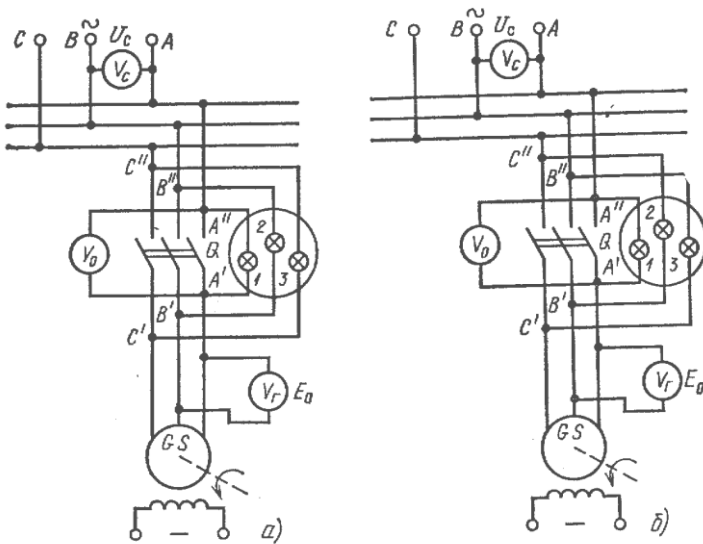


Рис. 3.23. Схеми вмикання ламп: а – на погасання; б – на обертання світла

В другій схемі (рис.3.23,б) одна із ламп під'єднується до точок однієї фази $A' - A''$, а дві інші лампи – між точками різних фаз $B' - C''$ і $C' - B''$. В цій схемі до вмикання вимикача Q лампи будуть по чергово загорятися і погасати, тобто при їх розташуванні по колу буде відбуватися обертання світла. Це відбувається через взаємне пере-

міщення векторів \mathcal{E}_M і \mathcal{E}_0 . Рубильник необхідно вмикати при повільному обертанні світла в момент, коли лампа в неперехресчиній фазі (А) погасне, а дві інші будуть горіти з однаковим розжарюванням. Перед вмиканням вимикача Q необхідно досягти, щоб обертання світла відбувалося з невеликою швидкістю, що досягається регулюванням швидкості приводного двигуна.

Лампи гаснуть при напругах, що дорівнюють 30-60% їх номінальної величини. Для більш точного визначення моменту вмикання вимикача Q часто використовують нульовий вольтметр, що має розтягнуту шкалу в межах нуля.

За допомогою лампового синхроскопа можна визначити відповідність порядку чергування фаз мережі і генератора. Якщо у схемі вмикання лампи (рис.3.23,а) буде спостерігатись обертання світла, а в схемі за рис.3.23,б – одночасне загорання і погасання ламп, то це буде означати, що мережа і генератор мають різний порядок чергування фаз. Змінити порядок чергування фаз можна шляхом перемикання двох фаз між собою.

Генератори великої потужності синхронізують за допомогою стрілкових синхроскопів, що працюють за принципом обертового магнітного поля. В цьому приладі стрілка обертається з частотою, що пропорційна різниці частот $f_M - f_T$ в одну або в другу сторону, залежно від того, яка із цих частот є більшою. При $f_T = f_M$ стрілка встановлюється на нуль і в цей момент необхідно підключити генератор до мережі.

На електростанціях часто використовують спосіб грубої синхронізації або самосинхронізації синхронних генераторів. При цьому способі вмикання генераторів на паралельну роботу частота обертання незбудженого генератора доводиться майже до синхронної, а потім генератор під'єднується до мережі і після цього в обмотку збудження подається постійний струм.

При такому ввімкненні генератора на паралельну роботу в обмотках статора спостерігаються стрибки струму, які перевищують номінальний струм, а на валу генератора виникають механічні зусилля, що не становлять особливої небезпеки для машини.

Ввімкнення методом самосинхронізації надзвичайно спрощує процес синхронізації, може бути легко автоматизоване і має особливо

велике значення при ліквідації аварій, коли при значних коливаннях напруги і частоти необхідно швидко ввімкнути генератор в мережу.

Після ввімкнення генератора в мережу швидкість стає строго постійною, тобто машина держиться в синхронізмі. Після цього генератор потрібно навантажити. Так як він є джерелом змінної напруги, то його навантаження буде складатися із активної і реактивної потужності.

Якщо зменшити струм збудження, тобто недозбудити генератор, то крім активної складової струму якоря I_3 виникне ємнісна складова, яка створить поздовжню намагнічуючу МРС якоря в такій мірі, щоб скомпенсувати зменшення струму збудження і знову таки забезпечити постійність магнітного потоку.

Відносно напруги мережі \mathcal{E}_M індуктивний струм генератора є ємнісним, а ємнісний струм генератора є індуктивним. Перезбуджуючи генератор, можна частково скомпенсувати індуктивні струми в мережі (в мережах найчастіше переважає індуктивне навантаження) і тим покращити коефіцієнт потужності мережі. Отже, при відхиленні I_3 від нормального струму I зростає.

Залежність струму якоря від струму збудження $I = f(I_3)$ у графічній формі подібна до латинської літери V і тому називається V - подібною характеристикою. Для різних значень потужності вони зображені на рис.3.24. Для кожної потужності генератора є свій нормальний струм збудження, якому відповідає мінімум струму якоря.

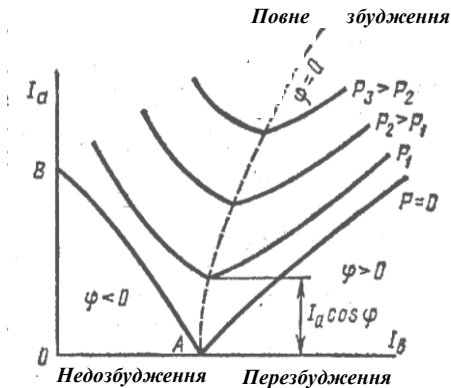


Рис.3.24. V -подібні характеристики синхронного генератора

Чим більша потужність, тим більший нормальний струм збудження, штрихова крива, що проведена через точки мінімумів V-подібних характеристик відповідає режимам роботи генератора з $\cos\varphi = 1$.

В загальному випадку паралельно працюючі генератори можуть мати різні $\cos\varphi$ залежно від встановленого в кожному з них струму збудження. Але з точки зору найкращого ККД вигідно, щоб всі генератори працювали з однаковим $\cos\varphi$, бо в цьому випадку між ними не протікають вирівнювальні струми.

3.6. Робота синхронної машини в режимі двигуна

Синхронні двигуни виготовляються переважно явноплюсними, потужністю від 40 до 7500 кВт і швидкостями від 1000 до 125 об/хв.

Статор синхронного двигуна має практично ту ж конструкцію, що і статор синхронного генератора. Повітряний проміжок в синхронному двигуні роблять меншим від проміжку в синхронному генераторі. В полюсні наконечники двигуна закладають спеціально розраховану пускову обмотку. Для збудження синхронних двигунів використовуються електромашинна або тиристорна система збудження.

Ротор синхронного двигуна обертається синхронно з магнітним полем машини. Обертове магнітне поле, внаслідок взаємодії полів статора і ротора, захоплює за собою ротор. При навантаженні синхронного двигуна під дією гальмівного моменту його ротор, продовжуючи обертатись синхронно, зміщується відносно результуючого поля машини на кут θ , який зростає зі збільшенням навантаження. На відміну від генератора, де ротор випереджує поле, в двигуні він відстає від поля. Тому для двигунів кут θ вважають від'ємним.

При побудові векторних діаграм синхронних двигунів прийнято фазу струму визначати по відношенню до вектора напруги мережі \mathcal{E}_M . Побудова векторних діаграм синхронного двигуна за відомими U , I , θ виконується так, як і для генератора

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_d + jI X_\sigma + jI_q X_{aq} + jI_d X_{ad}. \quad (3.15)$$

Якщо при побудові діаграми виходити із відомої напруги мережі $U_M = U$, то рівняння (3.15) буде мати вигляд

$$-\mathcal{E}_0 = \mathcal{E} - jI X_\sigma - jI_q X_{aq} - jI_d X_{ad}. \quad (3.16)$$

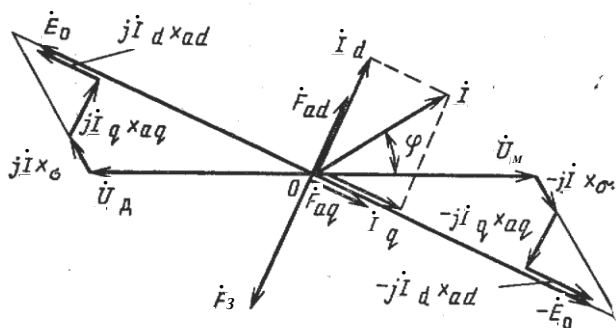


Рис.3.25. Векторна діаграма явнополюсного синхронного двигуна

Діаграма за рівнянням (3.16) побудована в правій частині рис.3.25, для випереджуючого струму якоря. На рис.3.25 наведені вектори МРС обмотки збудження і складових реакції якоря. Перший вектор відкладений в сторону випередження \mathcal{E}_0 на 90° , а два інших – в фазі зі струмами \mathcal{F}_d і I_q . Із рис.3.25 видно, що поздовжня реакція якоря в синхронному двигуні при випереджуючому струмі є розмагнічуюча (\mathcal{F}_{ad} направлений проти \mathcal{F}_3). Аналогічно можна показати, що при відстаючому струмі поздовжня реакція буде намагнічуючою.

Ці висновки протилежні висновкам про вплив реакції якоря на поле обмотки збудження у генератора. Це пов'язано з різним відліком фази струму в двигуні і генераторі. В двигуні фаза визначалася відносно напруги мережі U_M . Тому випереджуючому струму в режимі двигуна відповідає відстаючий струм в генераторному режимі.

3.8. Характеристики синхронного двигуна

Кутові характеристики. Рівняння для електромагнітної потужності синхронного двигуна можна отримати із векторних діаграм, якщо нехтувати активним опором R_a . Для двигуна буде справедливим те ж рівняння, що і для генератора. Різниця полягає в тому, в двигуні кут θ потрібно вважати від'ємним, а електромагнітний момент двигуна M є рушійним і зрівноважується гальмівним моментом на валу. Крім цього в двигунах кут θ більший, а перевантажувальна здатність менша, ніж в генераторах, бо робота двигунів має менш відповідальний характер.

Для явнополюсного двигуна електромагнітна потужність дорівнює

$$P = mU \frac{E_0}{X_d} \sin(-\theta) + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(-2\theta). \quad (3.17)$$

В неявнополюсних двигунах $X_d = X_q$, тому друга складова рівняння (3.17) буде відсутня. Рівняння електромагнітного моменту отримаємо, якщо (3.17) поділимо на кутову швидкість поля і ротора ω_1

$$M = mU \frac{E_0}{\omega_1 X_d} \sin(-\theta) + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(-2\theta). \quad (3.18)$$

В явнополюсному двигуні за рахунок другої складової в формулі моменту (реактивного моменту) обертовий момент може створюватись і при відсутності струму збудження ($E_0 = 0$).

На рис.3.26 зображена кутова характеристика $M = f(\theta)$ для двигунного режиму роботи синхронної машини. Там же для співставлення наведена аналогічна характеристика для генераторного режиму. Кутова характеристика двигунного режиму розміщена в зоні від'ємних кутів θ .

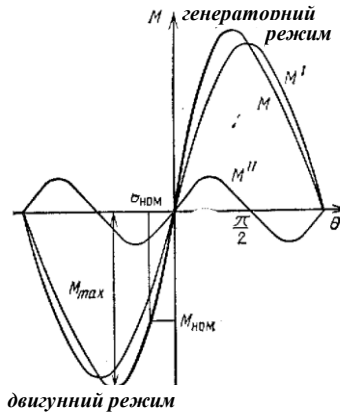


Рис.3.26. Кутова характеристика явнополюсного синхронного двигуна

Стійкою частиною кутової характеристики в двигунному режимі є область від 0 до -90° . При номінальному навантаженні $\theta_H = 20^\circ \div 30^\circ$.

Відношення M_{max}/M_H називається кратністю максимального моменту. Згідно з держстандартами, ця кратність повинна бути меншою 1,65. Залежність $M = f(\theta)$ для синхронного двигуна є його механічною характеристикою.

V - подібні характеристики синхронних двигунів мають такий же вигляд, що і для генераторів. При перезбудженні синхронний двигун відносно мережі є ємністю, недозбуджений двигун споживає з мережі реактивну потужність, виступаючи відносно мережі індуктивністю. При перезбудженні реакція якоря в синхронному двигуні – розмагнічуючи, при недозбудженні – підмагнічуючи.

На рис.3.27 наведені залежності $I = f(I_3)$ при різних значеннях потужності P_2 на валу. Мінімум струму I відповідає $\cos\varphi = 1$. Ліворуч від мінімуму двигун недозбуджений і працює частково як реактивна котушка, праворуч від мінімуму двигун пере збуджений і відіграє роль конденсатора.

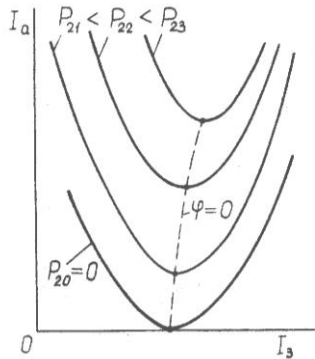


Рис.3.27. V - подібні характеристики синхронного двигуна

Перезбуджений двигун генерує реактивну потужність безпосередньо біля споживача, що сприяє підвищенню $\cos\varphi$ мережі. Це дозволяє понизити реактивну потужність, що виробляється синхронними генераторами на електростанціях, і зменшити втрати в лініях електропередачі. Можливість генерувати реактивну потужність вигідно відрізняє синхронні двигуни від асинхронних, які тільки споживають реактивну потужність для збудження.

Робочі характеристики. Вони мають важливе значення для дослідження процесів перетворення енергії в синхронних двигунах. Ро-

бочі характеристики визначаються при $I_3 = const$ або при $\cos \varphi = const$. На рис.3.28 наведені робочі характеристики $M, I_3, P_1, I, \eta = f(P_2)$.

Залежність моменту на валу M_2 від P_2 має лінійний характер, так як швидкість $\omega_1 = const$. Для підтримання $\cos \varphi = const$ із збільшенням навантаження струм збудження I_3 слід збільшувати.

При неробочому ході ($P_2 = 0$) двигун споживає з мережі активну потужність, яка необхідна для покриття втрат в середині машини. Тому при неробочому ході струм якоря не дорівнюватиме нулю. Із зростанням P_2 буде збільшуватися P_1 і струм якоря I .

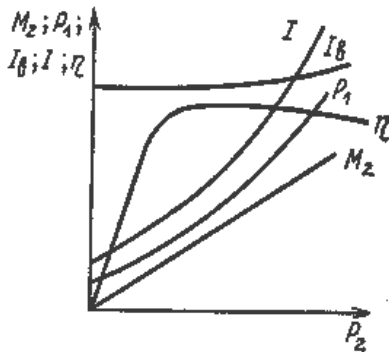


Рис.3.28. Робочі характеристики синхронного двигуна при $\cos \varphi = const$

Залежність $\eta = f(P_2)$ має типовий характер для всіх електричних машин. Крива швидко зростає при збільшенні навантаження від 0 до $0,5 P_2$, а потім мало змінюється при зміні навантаження до P_H .

3.9. Пуск синхронних двигунів

Існує декілька способів пуску синхронного двигуна. Всі вони ґрунтуються на тому, що в процесі пуску ротор двигуна розганяється до швидкості обертового поля, після чого ротор входить в синхронізм. Практичного використання набули: пуск за допомогою розгінного двигуна, частотний пуск і асинхронний пуск.

Пуск за допомогою розгінного двигуна полягає в тому, що додатковим двигуном ротор синхронного двигуна розганяється до номінальної швидкості. Обмотка збудження ввімкнена в мережу постійного струму, а обмотка статора розімкнена. Потім проводять

синхронізацію машини з мережею (аналогічно генератору). Після під'єднання машини до мережі, розгінний двигун механічно від'єднують від вала синхронної машини і вона переходить в двигунний режим. Потужність розгінного двигуна складає 10÷20% номінальної потужності синхронного двигуна.

Частотний пуск використовується в тому випадку, коли синхронний двигун під'єднаний до автономного джерела живлення, частоту напруги якого можна змінювати від нуля до номінальної. Із збільшенням частоти напруги живлення буде збільшуватись швидкість обертання магнітного поля. Ротор також буде поступово збільшувати свою швидкість обертання від нуля до номінальної. В процесі пуску синхронний двигун працює весь час в синхронному режимі.

Асинхронний пуск. Синхронні двигуни, які передбачають асинхронний пуск, виготовляють з явновираженими полюсами. В полюсних наконечниках закладена спеціальна пускова обмотка, аналогічна до більшої клітки асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Процес асинхронного пуску синхронного двигуна полягає в тому, що під дією підведеної до статора двигуна напруги, трифазна обмотка створює обертове магнітне поле. Під дією обертового магнітного поля в пусковій обмотці ротора індукуються ЕРС, яка призведе до виникнення струму. Взаємодія струму з обертовим полем створить обертовий момент і ротор розганяється до підсинхронної швидкості обертання. При цьому обмотку ротора замикають на активний опір, який у 10÷15 разів перевищує активний опір обмотки збудження, щоб уникнути перенапруги в обмотці і пробивання ізоляції. Після того, як швидкість ротора двигуна досягне 95÷98% номінальної швидкості, пусковий опір вимикається, а в обмотку збудження подається постійна напруга і ротор втягується в синхронізм.

Якщо при асинхронному пуску обмотка збудження замкнена накоротко, то в ній індукуються ЕРС з частотою $f_2 = f_1 s$ і протікає змінний струм, який створює пульсуюче магнітне поле. Пульсуюче магнітне поле можна розкласти на два обертові поля: пряме і зворотне, швидкості обертання яких відносно ротора дорівнюють $\pm n_1 s$. Відносно статора пряме поле обертається з швидкістю

$$n_{np} = n_2 + n_{np} = n_1(1-s) + n_1 s = n_1,$$

тобто синхронно з полем статора. Зворотне поле обертається відносно статора з швидкістю

$$n_{ze} = n_1(1-s) - n_1s = n_1(1-2s).$$

При $s > 0,5$ зворотне поле рухається відносно статора проти- лежно до напрямку обертання ротора; при $s = 0,5$ це поле нерухоме відносно статора; при $s < 0,5$ зворотне поле рухається в тому ж напрямку, що і ротор.

На рис.3.29. зображені криві обертових моментів під час асинхронного пуску синхронного двигуна.

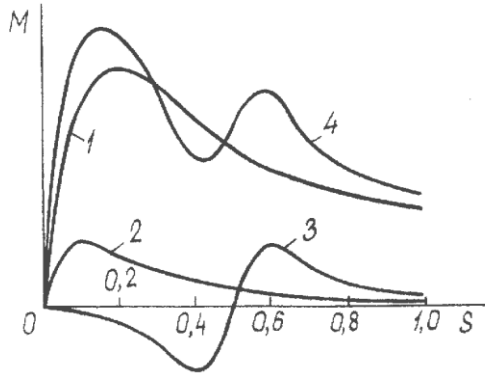


Рис.3.29. Залежність електромагнітного моменту від ковзання під час асинхронного пуску синхронного двигуна:

1- момент пускової обмотки; 2 – електромагнітний момент, створений прямим полем; 3 - електромагнітний момент, створений зворотнім полем; 4 – крива результуючого пускового моменту

Із рис.3.29 видно, що крива результуючого пускового моменту має провал при швидкості, яка дорівнює половині від синхронної. Через це ротор може зависнути при пуску на проміжній швидкості.

3.10. Регулювання швидкості обертання ротора синхронного двигуна

Швидкість обертання ротора синхронного двигуна дорівнює швидкості обертання магнітного поля $n_1 = 60f_1/p$. Отже, регулювати швидкість можна шляхом зміни частоти напруги живлення або числа полюсів. Регулювання швидкості шляхом зміни числа полюсів в синхронному двигуні є недоцільним, тому що тут необхідно змінювати число полюсів і на статорі, і на роторі. Тому практично використовують лише зміну частоти напруги живлення.

Однак в чистому вигляді частотне регулювання швидкості обертання ротора синхронного двигуна використовується лише при малих потужностях, коли мала інерція приводного механізму.

Для синхронних двигунів, що використовуються в електроприводах з великим моментом інерції приводного механізму, необхідно дуже плавно змінювати частоту напруги живлення, щоб двигун не випав із синхронізму. Для таких електроприводів найбільш придатним є метод частотного регулювання з самосинхронізацією, при якому двигун не може випасти із синхронізму. Це досягається за рахунок того, що керування перетворювачем частоти здійснюється від системи давачів положення ротора, внаслідок чого напруга подається на кожен фазу двигуна при кутах навантаження θ , менших 90° . Синхронні двигуни з частотним регулюванням і самосинхронізацією називають вентильними двигунами.

3.11. Синхронний компенсатор

Синхронний компенсатор виконує роль джерела реактивної потужності і використовується для регулювання $\cos\phi$ мережі. За режимом роботи він є синхронним двигуном, який працює тільки в режимі неробочого ходу. Синхронний компенсатор споживає з мережі активну потужність, що витрачається на покриття втрат всередині машини.

В конструктивному відношенні синхронні компенсатори мало відрізняються від синхронного двигуна. Відмінність полягає в тому, що вони не мають вихідного кінця вала. Оскільки вал не передає обертового моменту, то він має менший діаметр, що дає змогу зменшити підшипники. Так як від синхронного компенсатора не вимагається велика кратність перенавантаження за моментом, то M_{max} можна понизити за рахунок зменшення повітряного проміжку (збільшення X_d), що сприяє зменшенню обмотки збудження. Все це призводить до зменшення габаритів синхронного компенсатора.

В лініях електропередач значної довжини синхронні компенсатори використовують для регулювання напруги на споживачах. При великому індуктивному навантаженні напруга на споживачах значно менша від напруги на генераторах. Тоді синхронні компенсатори працюють з перезбудженням, звільняючи лінію від реактивних струмів, що зменшують напругу в лінії.

ТЕМА 4. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

4.1. Будова і принцип роботи машин постійного струму

Електричні машини постійного струму використовуються як в генераторному режимі роботи, так і в режимі роботи двигуна.

Генератори постійного струму перетворюють механічну енергію в електричну енергію постійного струму. В якості приводних двигунів генераторів застосовують асинхронні та синхронні двигуни змінного струму чи механічні двигуни. Електрична енергія, вироблена генераторами, використовується для двигунів постійного струму, електричних ванн, апаратури керування і контролю тощо.

Сьогодні для одержання електроенергії постійного струму широко застосовують напівпровідникові випрямлячі, які надійніші і дешевші від машин постійного струму такої самої потужності. Тому напівпровідникові випрямлячі, де тільки можливо за технічними умовами, практично витісняють генератори постійного струму.

Двигуни постійного струму використовуються для приводу деяких металорізальних верстатів, прокатних станів, підйомально-транспортних машин, екскаваторів тощо.

Головним недоліком найпростіших у виготовленні й обслуговуванні трифазних асинхронних двигунів є складність регулювання швидкості обертання. Тому в тих випадках, коли регулювання швидкості обертання є обов'язковою умовою технологічного процесу, застосовують складніші у виготовленні, але добре регульовані двигуни постійного струму. Область застосування й діапазон потужності цих двигунів досить широкі: від доли вата (для приводу пристроїв автоматики) до 12 МВт (для приводу прокатних станків, копальних підйомальників тощо), номінальною напругою до 1500 В.

Основні переваги двигунів постійного струму – це добрі пускові й регульовальні властивості. Наприклад, двигуни з частотою 1 оберт на добу (для пристроїв астрономічних обсерваторій дослідження за космічними об'єктами), двигуни з частотою 500-3000 об/хв (для приводу різноманітних робочих механізмів) та двигуни з підвищеною (надвисокою) частотою 10000-30000 об/хв (для приводу спеціальних механізмів).

До недоліків машин постійного струму належать складність виготовлення, висока ціна, понижена надійність. Всі ці недоліки зумо-

влені наявністю в машині щітково-колекторного вузла, який, крім того, є джерелом радішумів і пожежонебезпеки.

Електромашинобудівні заводи виготовляють машини постійного струму для роботи в найрізноманітніших галузях промисловості, тому окремі вузли цих машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема цих машин однакова.

На рис.4.1. схематично зображений поперечний переріз машини постійного струму.

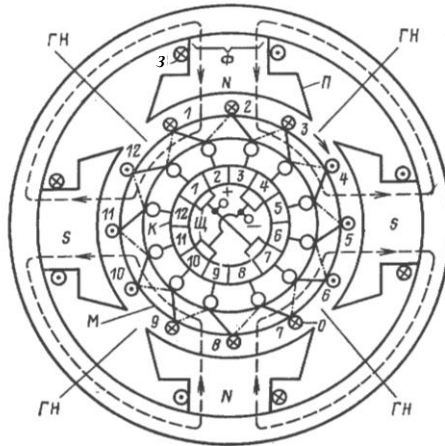


Рис.4.1. Загальний вигляд машини постійного струму в поперечному перерізі

На нерухомій частині машини (статорі) розташовані сталеві полюси П з насадженими на них котушками обмотки збудження З. Котушки з'єднуються між собою так, щоб при проходженні через обмотку постійного струму полюси набували почергову полярність (N, S, N, S і т. д.). Магнітний потік Φ , створений обмоткою збудження, постійний в часі і замикається так, як це наведено на рис.4.1. штриховими лініями.

На обертовій частині машини (якорі) розташована обмотка О, в якій індукуються ЕРС. Обмотка розміщена на сталевому сердечнику, що закріплений на валу. На зовнішній циліндричній поверхні сердечника в пазах розташовані провідники, що з'єднуються між собою, створюючи замкнений контур. Суцільні лінії показують з'єднання

провідників з боку переднього торця сердечника, а пунктирні – з заднього.

Зображений на рис.4.1 сердечник і обмотка називаються кільцевими. В даний час вони не використовуються, але їх часто використовують для наочності при аналізі робочих властивостей машини.

Від обмотки якоря виготовляються відводи до пластин колектора. Колектор К розташований на валу якоря і являє собою циліндричне тіло, що складається із електрично-ізованих між собою мідних пластин. Частина обмотки, що розташована між сусідніми відводами до колекторних пластин, називається секцією. Секція складається з одного або декількох витків. Число колекторних пластин дорівнює числу секцій. На рис.4.1 обмотка складається з 12 одновиткових секцій, а колектор має 12 пластин.

При обертанні якоря в провідниках його обмотки індукуються ЕРС, напрям якої визначається за правилом правої руки. ЕРС буде змінною, так як кожний провідник по чергово проходить під полюсами різної полярності. Якщо машина працює генератором, то змінна ЕРС обмотки повинна бути випрямлена. Це досягається за допомогою колектора. До колектора дотикаються нерухомі щітки Щ, через які обмотка якоря з'єднується з зовнішньою мережею.

Щоб ЕРС на виводах машини була максимальною, щітки необхідно розмістити в тих місцях, де ЕРС змінює напрям. Це відбувається під серединою міжполюсного проміжку. Уявна лінія, що проведена через середину міжполюсного проміжку, називається геометричною нейтраллю ГН. Отже, в машинах постійного струму щітки необхідно встановити на геометричній нейтралі. Оскільки число нейтралей дорівнює числу полюсів, то і число щіток дорівнює числу полюсів.

При обертанні якоря розміщення провідників і колекторних пластин в просторі буде змінюватися, при цьому буде змінюватися і напрям ЕРС, що індукуються в провідниках. Але завжди між колекторними пластинами, до яких дотикаються нерухомі щітки, будуть розміщені провідники з однаковим напрямом ЕРС, і щітки завжди будуть мати певну полярність. Полярність сусідніх щіток, як і полярність полюсів, буде чергуватися. Щітки однойменної полярності з'єднуються між собою, а до їх спільних точок під'єднується зовнішня мережа. Після колектора у зовнішній мережі генератора буде протікати постійний струм, а в обмотці якоря ЕРС і струм будуть змінними.

В двигунах постійного струму до щіток підводиться постійний струм. Роль колектора в даному випадку полягає в тому, щоб у будь-який момент часу забезпечити такий розподіл струму по обмотці якоря, при якому під полюсами різної полярності розміщалися б провідники з протилежним напрямом струму (рис.4.1). При такому розподілі струму електромагнітні сили всіх провідників будуть направлені в одну сторону. В результаті цього двигун буде створювати найбільший обертовий момент.

Відносно виводів мережі обмотка якоря розбивається на паралельні вітки. Паралельною віткою називають напругу послідовно з'єднаних провідників, що ввімкнені між щітками різної полярності. На рис.4.1 обмотка має чотири паралельні вітки. Її розгортка відносно виводів мережі зображена на рис.4.2 ЕРС на виводах машини дорівнює ЕРС однієї паралельної вітки, а струм в мережі дорівнює сумі струмів паралельних віток.

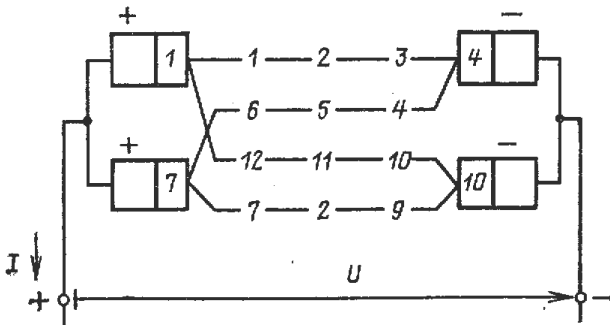


Рис.4.2. Паралельні вітки обмотки якоря машини постійного струму

В замкненому контурі самої обмотки якоря машини постійного струму сума ЕРС дорівнює нулю. Тому при розімкненому колі струм в обмотці протікати не буде.

4.2. Конструкція машини постійного струму

Статор складається із станини і прикріплених до неї головних і додаткових полюсів. Станину машин виготовляють із товстостінних труб, а у більш потужних машинах зварною із товстостінового сталю прокату. Для закріплення машини на фундаменті до нижньої

частини станини приварюють лапи, а для транспортування в станину вкручують рим-болт.

Сердечник головних полюсів рис.4.3 збирають із штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 1 мм. Листи пресують в пакет і скріплюють стальними заклепками, число яких є не менше чотирьох. Крайні листи полюса виготовляють із сталі товщиною $4 \div 10$ мм.

Щоб отримати синусоїдний розподіл магнітного поля в повітряному проміжку, полюс закінчують полюсним наконечником певної форми. Повітряний проміжок між полюсом і якорем може бути рівномірним або під краями наконечника роблять більшим.

На сердечнику полюса розміщують обмотку збудження. Її виготовляють у вигляді котушок із мідних ізольованих провідників круглого або прямокутного перерізу. Котушку ізолюють стрічкою і після просочення та сушки насаджують на сердечник полюса і закріплюють пружною рамкою.

Полюс разом з котушкою прикріплюють до станини болтами (рис.4.3,а). Для більш надійного кріплення полюса в машинах, що працюють в умовах вібрацій, болти вкручують в спеціальний стержень, вставлений в полюс (рис.4.3,б).

Якір складається із стержня, обмотки і колектора. Сердечник якоря виготовляють із одного або декількох пакетів, які складають із листів, виштампованих із електротехнічної сталі. Після штамповки листи лакують. При довжині сердечника менше 25 см його виготовляють із одного пакету, а при більшій довжині – з декількох.

Між пакетами за допомогою спеціальних прокладок створюють вентиляційні канали для кращого охолодження. В листах якоря вирубують пази, в які вкладають обмотку якоря. Зібраний сердечник якоря спресовують між двома натискними шайбами і закріплюють на валу втулкою або пружним розрізним кільцем.

Форму пазів вибирають овальною напівзакритою для машин невеликої потужності і прямокутну відкриту для машин середньої і великої потужності (рис.4.4). Між стінками пазу і провідниками обмотки вкладають пазову ізоляцію. Обмотку в пазу закріплюють клином із склотекстоліту або бандажами, що розміщують в кільцевих канавках сердечника якоря. В лобових частинах обмотку закріплюють бандажами із проводу або склострічки.

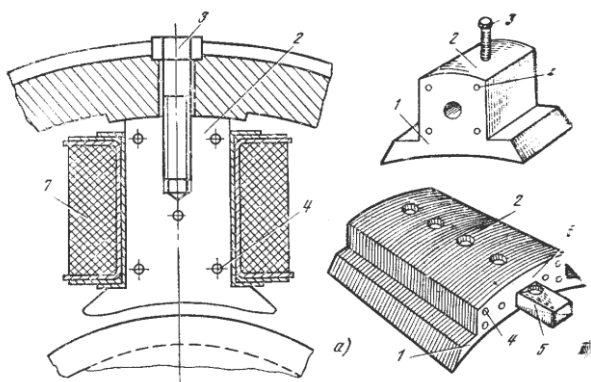


Рис.4.3. Головний полюс машин постійного струму з кріпленням до станини болтами, вкрученими в полюс (а) і в спеціальний стержень (б): 1 – полюсний наконечник; 2 – сердечник полюса; 3 – болт кріплення; 4 – заклепки; 5 – стержень; 6 – натискний лист; 7 – обмотка

Колектор складається із великого числа електрично ізольованих пластин, які штампують із профільної міді (рис.4.5). Ізоляцію між пластинами здійснюють прокладками, вирубанними із міканіту (пресована слюда), які закладають між мідними пластинами. Прокладки мають форму пластин. Набір колекторних пластин з прокладками повинен бути надійно закріплений і мати строго циліндричну форму.

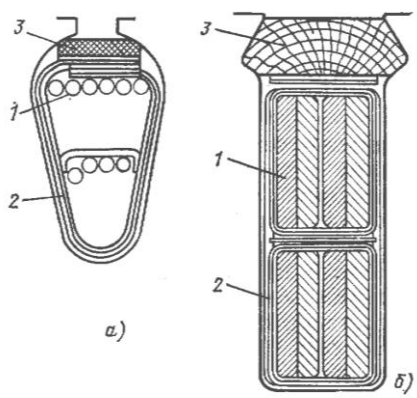


Рис.4.4. Пази машин постійного струму: а – овальний; б – прямокутний; 1 – провідники; 2 – ізоляція; 3 – клин

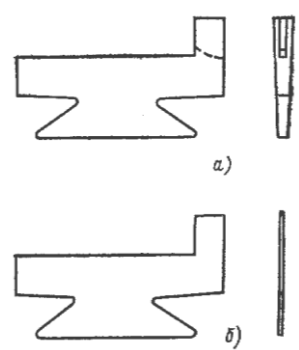


Рис.4.5. Колекторна частина (а) і ізоляційна прокладка (б)

За способом кріплення пластини існує багато конструкцій колекторів, дві із яких наведені на рис.4.6. На рис.4.6,а колекторні пластини затискують між корпусом і натискним фланцем.

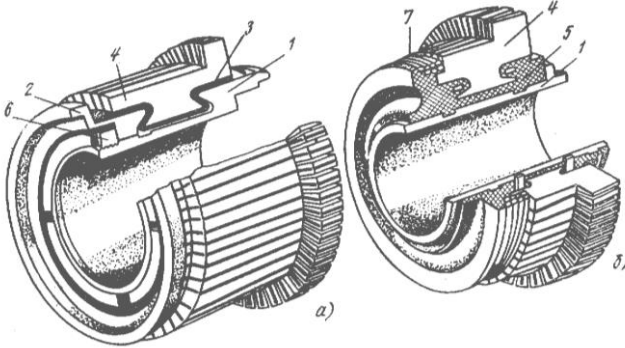


Рис.4.6. Колектор машини постійного струму з металевим (а) і пластмасовим (б) корпусами: 1 – корпус; 2 – натискний фланець; 3 – ізоляційні манжети; 4 – колекторні пластини; 5 – пластмаса; 6 – запірне кільце; 7 – бандаж

Корпус і натискний фланець виготовляють із сталі, а для ізоляції на них надягають міканітові манжети. На рис.4.6, б показано кріплення пластин за допомогою пластмаси.

Зібраний колектор насаджують на вал і закріплюють від повертання шпонкою. До кожної колекторної пластини під'єднують провідники від секцій. Для кращого під'єднання провідників в колекторних пластинах зі сторони якоря виготовляють виступи з шліцами. В ці шліци закладають і потім запаюють провідники обмоток.

Електричний контакт з колектором здійснюють за допомогою щіток, розташованих в щіткотримачі. Всі щіткотримачі однієї полярності з'єднують між собою збірними шинами, які під'єднують до виводів (клем) машини. Одна із основних умов безперебійної роботи машини – це щільний і надійний контакт між щіткою і колектором. Тиск пружини на щітку повинен бути відрегульований, тому що надмірний тиск призводить до передчасного стирання щіток і перегрівання колектора, а недостатній тиск викликає іскріння на колекторі.

При роботі машини може виникати іскріння щіток. Для покращення роботи щіткового вузла в машинах постійного струму використовують додаткові полюси. Сердечники додаткових полюсів виготовляють суцільними або зібраними із листової сталі товщиною 1 мм. На

сердечниках розташовані котушки обмотки додаткових полюсів. Додаткові полюси розміщують на геометричних нейтралях і прикріплюють до статора болтами. Якір обертається в підшипниках, які розташовані в підшипникових щитах.

Кінці обмоток збудження і якоря виведені на затискачі коробки виводів. Вентилятор, який жорстко закріплений на валу машини, призначений для самовентиляції машини: повітря надходить в машину переважно з боку колектора, обдуває нагріті частини і викидається в протилежний бік через решітку.

4.3. Електрорушійна сила обмотки якоря і електромагнітний момент машини постійного струму

Миттєве значення ЕРС (рис.4.7), що індукується в кожному провіднику обмотки якоря, визначається за формулою

$$e = B_x l_a v_a,$$

де B_x - індукція в даній точці x полюсного ділення; l_a - довжина провідника в магнітному колі; v_a - колова швидкість якоря.

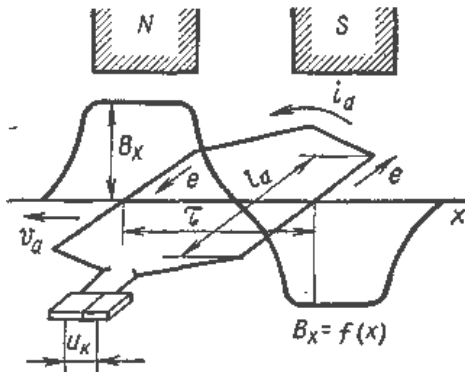


Рис.4.7. До визначення ЕРС обмотки якоря

Як вже відмічалось раніше, ЕРС між щітками протилежної полярності машини E дорівнює ЕРС однієї паралельної вітки. Паралельна вітка має $N/2a$ провідників (N – загальне число активних провідників якоря). Тоді для діаметрального кроку маємо

$$E = \sum_1^{N/2a} e = V_a l_a \sum_1^{N/2a} B_x.$$

При досить великій кількості колекторних пластин можна вважати, що

$$\sum_1^{N/2a} B_x \approx \frac{N}{2a} B_{cp},$$

де B_{cp} - середнє значення індукції протягом полюсного ділення τ .

Враховуючи, що

$$B_{cp} l_a \tau = \Phi; \tau = \pi D_a / 2p; V_a = \frac{\pi D_a n}{60} = 2\tau \frac{pn}{60},$$

отримаємо

$$E = \frac{pn}{60a} n\Phi = c_e n\Phi, \quad (4.1)$$

де $c_e = pN/(60a)$ - коефіцієнт, що визначається конструктивними параметрами машини і не залежить від режиму її роботи.

Формулу (4.1) можна записати в іншому вигляді, для чого праву частину помножимо і поділимо на 2π , тоді

$$E = c\omega\Phi, \quad (4.2)$$

де $\omega = 2\pi n/60$ - кутова швидкість якоря; $c = pN/(2\pi a)$.

Із (4.1) і (4.2) видно, що ЕРС якоря пропорційна швидкості обертання, основному потоку і не залежить від форми розподілу індукції в повітряному проміжку машини.

Електромагнітна сила, що діє на один провідник обмотки якоря, дорівнює

$$f_x = B_x i_a l_a,$$

де $i_a = I_a/(2a)$ - струм провідника.

Сила f_x створить момент

$$M_x = f_x \frac{D_a}{2}.$$

Всі N провідників створять момент

$$M = \frac{D_a}{2} \sum_1^N (B_x i_a l_a) = \frac{D_a}{2} \frac{I_a}{2a} l_a \sum_1^N B_x. \quad (4.3)$$

Прийнявши, що

$$B_{cp} = \Phi / (\tau l_a) = 2p\Phi / (\pi D_a l_a),$$

отримаємо

$$\sum_1^N B_x = NB_{cp}. \quad (4.4)$$

Підставивши (4.4) в (4.3) отримаємо

$$M = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = c I_a \Phi. \quad (4.5)$$

При роботі машини в режимі двигуна електромагнітний момент є обертовим, а в генераторному режимі – гальмівним.

4.4. Генератори постійного струму

Генератори постійного струму перетворюють механічну енергію, що підводиться до валу машини, в електричну енергію постійного струму. Вони використовуються в тих галузях промисловості, де за умовами виробництва необхідний або є кращий постійний струм (металургія, електроліз, транспорт тощо.) Генератори постійного струму виготовляються на потужності від декількох кіловат до 10 МВт.

Для кожного генератора заводом – виготовлювачем встановлюється гранично допустимий режим роботи (номінальний режим). Номінальний режим роботи характеризується номінальними величинами, які наведені на заводському щитку машини: номінальна потужність, напруга, струм навантаження, швидкість обертання, ККД.

Властивості генераторів постійного струму визначаються в основному способом живлення обмотки збудження. За способом збудження генератори постійного струму поділяються на генератори:

- незалежного збудження (рис.4.8, а) – обмотка збудження отримує живлення від постороннього джерела;
- паралельного збудження (рис.4.8, б) – обмотка збудження під'єднана до обмотки якоря паралельно навантаженню;
- послідовного збудження (рис.4.8, в) – обмотка збудження під'єднана послідовно з обмоткою якоря і навантаженням;
- змішаного збудження (рис.4.8, г) – є дві обмотки збудження: одна під'єднана паралельно до обмотки якоря, а друга – послідовно з нею.

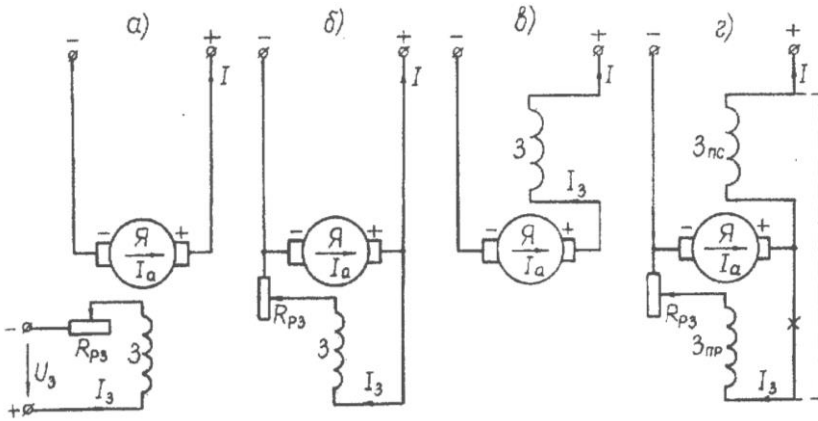


Рис.4.8. Принципові схеми генераторів: а – незалежного; б – паралельного; в – послідовного; г – змішаного збудження; Я – якір; З – обмотка збудження; Зпр – паралельна обмотка збудження; Зпс – послідовна обмотка збудження

Основні рівняння, що характеризують роботу генератора постійного струму, справедливі для всіх генераторів незалежно від способу їх збудження.

Рівняння рівноваги напруг. Напряга на затискачах генератора U завжди буде меншою за індуковану в обмотці якоря ЕРС E на величину спаду напруги, тобто

$$U = E - I_a \Sigma R_a - \Delta U_{щ}. \quad (4.6)$$

Спад напруги в колі якоря складається з двох складових: $I_a \Sigma R_a$ - спад напруги в обмотках, $\Delta U_{щ}$ - спад напруги в щітковому контакті. Опір ΣR_a дорівнює

$$\Sigma R_a = R_a + R_d + R_C + R_K, \quad (4.7)$$

де R_a , R_d , R_C , R_K - відповідно опори обмоток якоря, додаткових полюсів, послідовної (серієсної) і компенсаційної. Залежно від конкретної схеми генератора частина опорів в ΣR_a може бути відсутня.

Для наближених розрахунків рівняння (4.6) можна спростити:

$$U = E - I_a \Sigma R_a, \quad (4.8)$$

де $R_a = \Sigma R_a + R_{щ}$, $R_{щ} = \Delta U_{щ} / I_{aH}$.

Струм якоря генератора I_a дорівнює:

$$I_a = (E - U) / R_a. \quad (4.9)$$

Рівняння балансу потужності. Це рівняння отримаємо, якщо праву і ліву частину (4.6) помножити на струм I_a

$$U \cdot I_a = E \cdot I_a - I_a^2 \Sigma R_a - \Delta U_{щ} I_a. \quad (4.10)$$

Добуток $E \cdot I_a = P_{EM}$ називається електромагнітною потужністю і являє собою повну електричну потужність, яка отримується в результаті перетворення механічної потужності. Частина цієї потужності витрачається на електричні втрати в обмотках і в перехідному опорі щіткового контакту. Решта потужності, що дорівнює добутку $U \cdot I_a$, є потужністю, що віддає генератор.

До генератора підводиться механічна потужність P_1 . Більша частина цієї потужності перетворюється в електричну P_{EM} , а друга частина витрачається в генераторі на покриття механічних P_{MX} і магнітних P_M втрат в якорі і додаткових втрат P_D

$$P_1 = P_{EM} + P_{MX} + P_M + P_D. \quad (4.11)$$

Рівняння рівноваги моментів. Поділивши праву і ліву частини рівняння (4.11) на кутову швидкість якоря отримаємо рівняння моменту

$$P_1 / \omega = P_{EM} / \omega + (P_{MX} + P_M + P_D) / \omega \quad (4.12)$$

або

$$M_1 = M_{EM} + M_0$$

Електромагнітний момент в генераторі направлений проти обертання і має вигляд (4.5).

4.5. Характеристики генераторів постійного струму

Характеристика неробочого ходу. Це залежність ЕРС на затишках генератора E від струму збудження I_3 $U \approx E = f(I_3)$ при розімкненому колі якоря і постійній швидкості обертання ($I_a = 0$, $n = const$). В загальному випадку при зміні струму збудження в одному напрямку, а потім в зворотному залежність $U = f(I_3)$, побудована в чотирьох квадрантах, має вигляд петлі гістерезисну (рис.4.9). За розрахункову приймається середня крива (на рис.4.9 наведена пунктирною лінією). При $I_3 = 0$ в обмотці якоря індукується ЕРС від

залишкового магнетизму полюсів статора $E_{зал}$. Вона дорівнює $1 \div 3\%$ від номінальної напруги генератора.

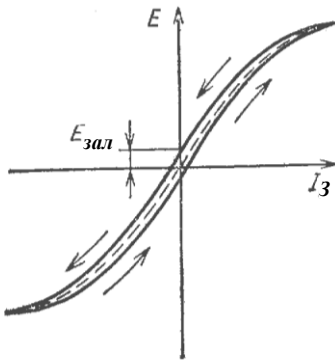


Рис.4.9. Повна петля характеристики неробочого ходу

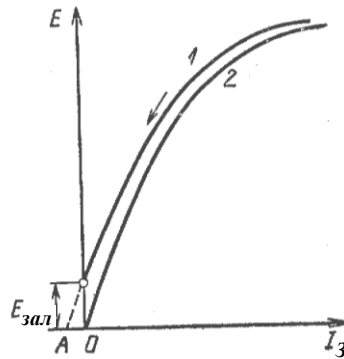


Рис.4.10. Характеристика неробочого ходу генератора незалежного збудження

Для практики звичайно обмежуються зняттям частини петлі, яку отримують при зменшенні струму I_3 від максимального значення до нуля (рис.4.10). Продовжуючи отриману криву 1 до перетину з віссю абсцис в точці А, а потім пересуваючи її паралельно самій собі вправо на відрізок ОА, отримують характеристику неробочого ходу 2 (рис.4.10). При знятті характеристики неробочого ходу слід звертати увагу на те, щоб струм збудження змінювався в одному напрямку (або тільки збільшувався, або тільки зменшувався), так як в протилежному випадку буде великий розкид точок через те, що вони будуть належати різним гістерезисним кривим.

В початковій частині характеристики неробочого ходу ЕРС змінюється пропорційно струму збудження, а потім зростання ЕРС сповільнюється, що пояснюється насиченням магнітного кола.

Практичне значення характеристики неробочого ходу полягає в тому, що по ній можна робити висновки про ступінь насичення магнітного кола машини. Крім цього вона використовується для побудови інших характеристик.

Навантажувальна характеристика. Ця характеристика являє собою залежність напруги на затискачах U від струму збудження I_3 ($U = f(I_3)$) при постійному струмі якоря I_a . Характеристика переваж-

но знімається при $I_a = I_{aH} = \text{const}$. Струм збудження змінюють в сторону зменшення, починаючи з його максимального значення.

Для співставлення навантажувальну характеристику 2 зручно побудувати на одному графіку з характеристикою неробочого ходу 1 (рис.4.11). Характеристику неробочого ходу можна розглядати як частковий випадок навантажувальної характеристики при $I_a = 0$.

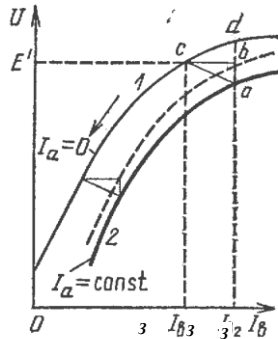


Рис.4.11. Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Навантажувальна характеристика розміщена на графіку нижче характеристики неробочого ходу через спад напруги в колі якоря і розмагнічуючу дію реакції якоря.

Складову реакції якоря можна визначити таким чином. Додавши до напруги навантажувальної характеристики спад напруги в колі якоря $I_a R_a$, отримаємо залежність ЕРС, що індукується в обмотці якоря при навантаженні від струму збудження (штрихова крива на рис.4.11). Струм I_a при цьому дорівнює струму, при якому знімалась навантажувальна характеристика.

Для отримання однієї і тої ж ЕРС E' при неробочому ході необхідний струм збудження I_{31} , а при навантаженні – струм I_{32} . Різниця цих струмів іде на компенсацію розмагнічуючої дії реакції якоря. Відрізок bd відповідає зменшенню потоку і ЕРС, що індукується в обмотці якоря.

В загальному випадку різниця $(I_{32} - I_{31})$ пропорційна алгебраїчній сумі розмагнічуючої складової поперечної реакції якоря F_{qd} і

поздовжньої реакції якоря F_d . Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то можна вважати, що

$$I_{e2} - I_{e1} \approx F_{qd} / w_3 = I_{qd},$$

де w_3 - число витків котушки обмотки збудження.

З'єднуючи точки a , b і c , отримуємо трикутник, що носить назву характеристичний. Катет bc цього трикутника дорівнює I_{qd} , а катет ab дорівнює $I_a R_a$. Характеристичний трикутник іноді використовують для побудови інших характеристик машини.

Зовнішня характеристика. Вона показує як змінюється напруга U генератора при зростанні струму якоря I_a при постійному струмі збудження I_3 . Вихідною точкою цієї характеристики є точка, коли при $I = I_{aH}$ на затискачах генератора встановлена номінальна напруга U_H (рис.4.12).

Струм збудження, що відповідає $U = U_H$ при $I = I_H$, називають номінальним струмом збудження I_{3H} . В процесі експерименту цей струм підтримується постійним. Струм I_a поступово зменшується до $I_a = 0$. Напруга генератора при цьому збільшується, оскільки при зменшенні I_a зменшується спад напруги в колі якоря і розмагнічуюча дія реакції якоря. При неробочому ході $U = U_0$ (рис.4.12).

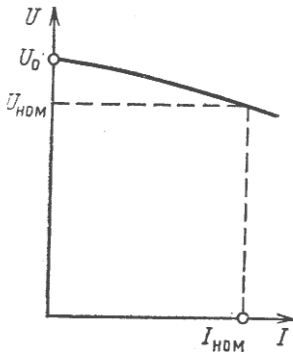


Рис.4.12 Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження

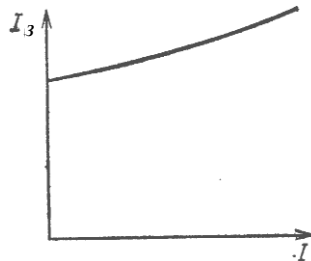


Рис.4.13 Регульовальна характеристика генератора незалежного збудження

Із зовнішньої характеристики визначають номінальну зміну напруги ΔU

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100\%,$$

яка для генераторів незалежного збудження складає 10÷15%.

При зміні навантаження від неробочого ходу до короткого замикання струм якоря $I_a = I_{aK}$ в 5÷10 разів перевищує номінальний.

Регульовальна характеристика. Вона являє собою залежність $I_3 = f(I)$ при $U = U_H = const$, тобто закон регулювання струму збудження для збереження незмінної напруги U при зміні навантаження (рис.4.13). Починають знімати регульовальну характеристику з неробочого ходу ($I_a = 0$). При збільшенні струму навантаження струм збудження необхідно також збільшувати, щоб скомпенсувати зменшення напруги через розмагнічуючу дію реакції якоря.

4.6. Характеристики генератора паралельного збудження

Самозбудження генератора. У генератора паралельного збудження обмотка збудження живиться від власного якоря (рис.4.8,б). Електрорушійна сила в якорі появляється внаслідок самозбудження машини.

Процес самозбудження протікає таким чином. При обертанні якоря від потоку залишкового магнетизму в обмотці якоря індукується ЕРС. Ця ЕРС невелика і складає 1-3% номінальної напруги. Так як обмотка збудження під'єднана до якоря, то $E_{звл}$ створює в ній невеликий струм. Цей струм протікає через обмотку збудження і збільшує потік полюса, який в свою чергу збільшує ЕРС в якорі. Збільшення ЕРС якоря викличе підвищення струму в обмотці збудження, який ще більше збільшить потік полюсів і ЕРС якоря і т.д.

Процес наростання струму в обмотці збудження при неробочому ході машини можна описати рівнянням

$$E = I_3 \Sigma R_3 + \frac{d(L_3 \cdot i_3)}{dt},$$

де L_3 - індуктивність обмотки збудження; ΣR_3 - опір кола збудження.

Процес самозбудження завершиться, коли $d(L_3 \cdot i_3) / dt = 0$

$$E = I_3 \Sigma R_3 .$$

На рис.4.14 наведені залежності $E = f(I_3)$ і $I_3 \Sigma R_3 = f(I_3)$. Перша залежність є характеристикою неробочого ходу (крива 1), а друга – характеристикою кола збудження, що являє собою пряму лінію 2 під кутом α до осі абсцис. При цьому

$$\operatorname{tg} \alpha = \Sigma R_3.$$

Перетин характеристик в точці А відповідає рівності $E = I_3 \Sigma R_3$, а ЕРС E в цій точці відповідає усталеному її значенню при заданому опорі ΣR_3 . При зміні I_3 буде змінюватися і ЕРС E . Якщо збільшити опір ΣR_3 , то кут α зросте і точка А зміститься ліворуч. При деякому опорі кола обмотки збудження R_K , що називається критичним, пряма $I_3 R_K$ співпадає з прямолінійною частиною характеристики неробочого ходу (пряма 3). Критичний опір є максимальним опором кола обмотки збудження, при якому ще можливе явище самозбудження.

При подальшому збільшенні опорі ΣR_3 самозбудження не буде, так як крива $I_3 \Sigma R_3 = f(I_3)$ (пряма 4) не перетинається з характеристикою неробочого ходу.

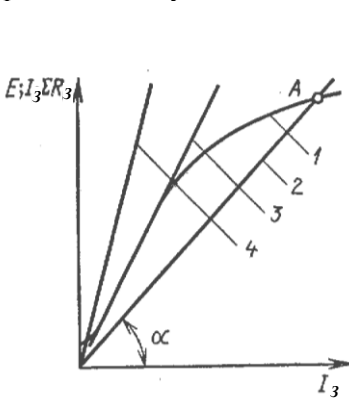


Рис.4.14. Самозбудження генератора з паралельним збудженням при $n = \text{const}$

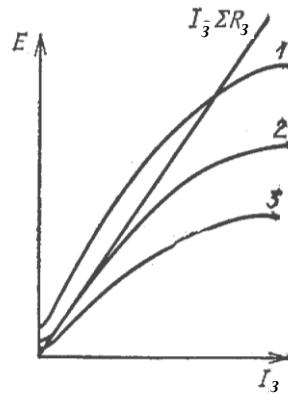


Рис.4.15. Самозбудження генератора з паралельним збудженням при $n = \text{var}$

Якщо генератор працює із змінною швидкістю обертання n , то для кожної швидкості обертання буде своя характеристика неробочого ходу (криві 1-3 на рис.4.15). Відповідно до цього кожній швидкості обертання буде своє значення критичного опорі, а для кожного опорі

R_3 існує критичне значення швидкості обертання, нижче якої самозбудження неможливо (крива 2).

Самозбудження генератора відбувається в тому випадку, коли струм збудження створює магнітний потік, який є узгоджений з потоком залишкового магнетизму. При неправильному ввімкненні обмотки збудження ці потоки будуть направлені зустрічно і самозбудження не буде відбуватися.

Отже, для самозбудження генератора необхідно виконати три умови:

- щоб був залишковий магнітний потік;
- щоб опір обмотки збудження був менший за критичний;
- щоб обмотка збудження була правильно під'єднана до якоря.

Характеристика неробочого ходу і навантажувальна. На відміну від генератора незалежного збудження в даного генератора струм якоря I_a не дорівнює струму навантаження. При від'єднаному навантаженні ($I=0$) струм $I_a = I_3$.

Через незначну величину струму збудження спад напруги, що викликаний ним в колі якоря, малий і суттєво не впливає на напругу машини при навантаженні. При неробочому ході можна прийняти, що напруга на затискачах практично дорівнює ЕРС якоря.

Тому характеристики неробочого ходу і навантажувальна мають такий самий характер як і у генератора незалежного збудження.

Зовнішня характеристика. Зовнішню характеристику $U = f(I)$ знімають за умови, що $\Sigma R_3 = const$ (рис.4.16).

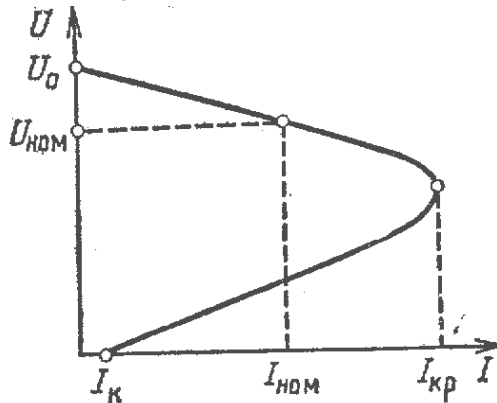


Рис.4.16. Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Як видно з рис.4.16, із збільшенням струму I напруга U зменшується. Пониження напруги відбувається більшою мірою, ніж у генератора з незалежним збудженням ($\Delta U = 15-20\%$), тому що напруга понижується не тільки за рахунок розмагнічуючої дії реакції якоря і спаду напруги в колі якоря, але і внаслідок зменшення струму збудження. Зменшення струму збудження $I_3 = U / \Sigma R_3$ при $\Sigma R_3 = const$ викликане зменшенням напруги U на затискачах машини, до яких під'єднана обмотка збудження.

При зменшенні опору навантаження струм I буде збільшуватися до певної величини, що називається критичним струмом I_{KP} . ($I_{KP} = 1,5 \div 2,5 I_N$). При подальшому зменшенні опору навантаження струм I починає зменшуватись. Це пояснюється тим, що генератор з паралельним збудженням сам себе розмагнічує, так як зменшується струм збудження. На початку цей процес протікає повільно (внаслідок насичення зменшення струму збудження не викликає великого зменшення потоку і ЕРС генератора), потім, коли магнітний стан відповідає лінійній (ненасиченій) частині характеристики неробочого ходу зменшення струму I_3 буде викликати великі зміни потоку і ЕРС. При короткому замиканні генератор практично буде розмагніченим і усталений струм короткого замикання I_K визначається тільки ЕРС залишкового магнетизму і переважно не перевищує номінального значення.

Регульовальна характеристика. Залежність $I_3 = f(I)$ при $U = const$ має такий же характер, що і для генератора незалежного збудження. Для одного і того ж генератора при незалежному і паралельному збудженні регульовальні характеристики будуть співпадати.

4.7. Характеристики генератора послідовного збудження

У генераторів з послідовним збудженням струм збудження I_3 дорівнює струму якоря I_a . Тому при неробочому ході, коли $I_3 = I_a = 0$, ЕРС, що індукуюється в обмотці якоря, дорівнює $E_{зал}$.

Характеристика неробочого ходу і навантажувальна для такого генератора можуть бути зняті при живленні обмотки збудження від незалежного джерела і матимуть такий же вигляд, що і в генератора незалежного збудження.

Самозбудження генератора відбуватиметься, якщо опір навантаження буде менший за критичний. Зовнішня характеристика генератора наведена на рис.4.17 (крива 2). Крива 1 відповідає характеристиці неробочого ходу.

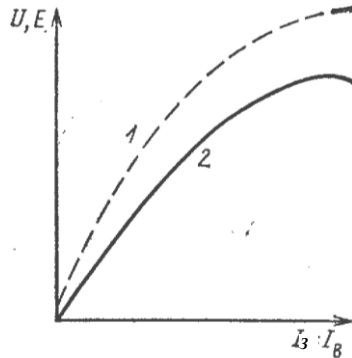


Рис.4.17. Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження

Напруга на затискачах генератора зростає пропорційно струму I . При великих струмах відбувається насичення магнітного кола машини, внаслідок чого ЕРС при збільшенні струму I буде змінюватись мало. При дуже великих струмах, внаслідок розмагнічуючої дії реакції якоря, напруга буде зменшуватись.

Внаслідок значної залежності напруги від струму навантаження генератори послідовного збудження не знайшли практичного використання.

4.9. Характеристики генератора змішаного збудження

Самозбудження генератора протікає так як і в генератора паралельного збудження. Струм якоря $I_a = I + I_3$.

Найбільшого використання набули генератори з узгодженим вмиканням обмоток збудження. Найбільшу долю МРС збудження створює паралельна обмотка. Послідовна обмотка розрахована так, щоб її МРС дещо перевищувала МРС розмагнічуючої складової реакції якоря. В цьому випадку послідовна обмотка не тільки компенсує розмагнічуючу складову реакції якоря, але й створить надлишкову МРС, яка буде збільшувати потік збудження і ЕРС якоря при збільшенні струму навантаження. Внаслідок підмагнічуючої дії

послідовної обмотки напруга генератора із зростанням струму I буде зростати, як це видно із зовнішньої характеристики $U = f(I)$ при $\Sigma R_3 = \text{const}$ (рис.4.18). Підвищення напруги генератора із зростанням струму I залежить від числа витків послідовної обмотки. Обмотку можна розрахувати так, щоб напруга збільшувалась на величину, яка необхідна для компенсації спаду напруги в лінії. Тоді у споживача при будь-якому навантаженні напруга буде автоматично підтримуватися наближено постійною.

Характеристики неробочого ходу і навантажувальну генератора змішаного збудження знімають так, як і генератора паралельного збудження. Вони мають аналогічний характер.

На рис.4.19 наведена регулювальна характеристика $I_3 = f(I)$ при $U = \text{const}$ генератора змішаного збудження, яка залежить від вигляду зовнішньої характеристики. Якщо напруга генератора зростає з ростом струму навантаження, то регулювальна характеристика матиме вигляд, зображений на рис.4.19.

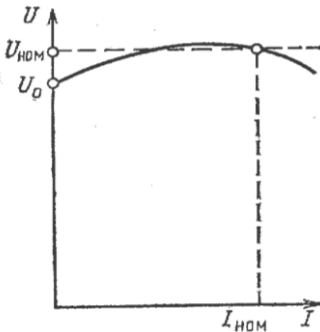


Рис.4.18. Зовнішня характеристика генератора змішаного збудження

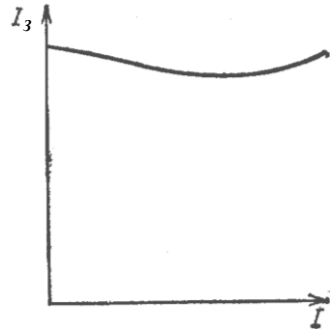


Рис.4.19. Регулювальна характеристика генератора змішаного збудження

4.8. Класифікація двигунів постійного струму за способами збудження

Завдяки своїм хорошим регулювальним властивостям двигуни постійного струму широко використовуються в промисловості (металургійна промисловість, верстатобудування, транспорт, автомобілебудування). Потужності, на які випускаються двигуни постійного струму, лежать в межах від декількох ват до декількох тисяч кіловат.

За номінальну потужність двигуна приймається механічна потужність на валу P_2 , що вказується на щитку, закріпленому на корпусі машини. Там вказується також напруга U , струм I , швидкість обертання n .

Властивості двигунів постійного струму, як і генераторів, визначаються способом живлення обмотки збудження. За способом вмикання обмотки збудження двигуни поділяються на: незалежного, паралельного (шунтового), послідовного (серієсного) і змішаного збудження (компаундні), що мають дві обмотки збудження.

Принципові схеми цих двигунів зображені на рис.4.20.

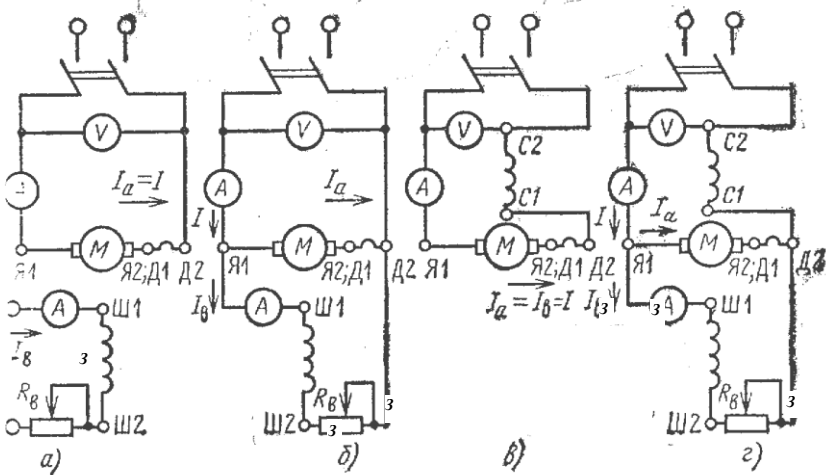


Рис.4.20. Схеми двигунів постійного струму з незалежним (а), паралельним (б), послідовним (в) і змішаним (г) збудженням

Струм якоря I_a в двигунах послідовного і незалежного збудження дорівнює струму I , що споживає двигун із мережі. В двигунах паралельного і змішаного збудження $I_a = I - I_3$.

Практичне використання мають двигуни всіх систем збудження. Рівняння рівноваги напруг має вигляд

$$U = E + I_a \Sigma R_a + \Delta U_{\text{щ}}, \quad (4.13)$$

де $I_a \Sigma R_a$ - спад напруги в обмотках; $\Delta U_{\text{щ}}$ - спад напруги в контакті; $\Sigma R_a = R_a + R_d + R_c + R_k$ (R_a, R_d, R_c, R_k - опори обмоток якоря, додаткових полюсів, послідовної і компенсаційної).

Для наближених розрахунків більш проста формула

$$U = E + I_a R_a, \quad (4.14)$$

де $R_a = \Sigma R_a + \Delta U_{щ} / I_{a.H}$.

Струм якоря

$$I_a = (U - E) / R_a \quad (4.15)$$

має напрям, що співпадає з напрямом прикладеної напруги і зустрічний з E .

Рівняння балансу потужностей має вигляд

$$U I_a = E I_a + I_a^2 \Sigma R_a + \Delta U_{щ} I_a. \quad (4.16)$$

Добуток $U I_a$ є потужністю, що підводиться із мережі до якоря двигуна. Частина цієї потужності витрачається на втрати в обмотках кола якоря $I_a^2 \Sigma R_a$ і на електричні втрати в щітковому контакті. Решта, що дорівнює добутку $E I_a = P_{EM}$, буде перетворюватись в механічну потужність. Частина механічної потужності піде на втрати всередині двигуна: механічні P_{MX} , магнітні P_M і додаткові P_D . Решта з валу машини передається виробничому механізму. Ця частина потужності P_2 називається корисною потужністю

$$P_2 = P_{EM} - P_{MX} - P_M - P_D.$$

Споживана потужність із мережі дорівнює:

$P_1 = U I_a$ - для двигунів незалежного і постійного збудження;

$P_1 = U (I_a + I_3) = U I$ - для двигунів паралельного і змішаного збудження.

Рівняння рівноваги моментів. З урахуванням співвідношення $M = P / \omega$ отримаємо

$$M_{EM} = M_2 + M_0 = M_C, \quad (4.17)$$

де M_C - момент статичного опору;

$M_{EM} = C I_a \Phi$ - електромагнітний момент, що створюється двигуном;

$M_2 = P_2 / \omega$ - гальмівний момент навантаження на валу;

$M_0 = (P_{MX} + P_M + P_D) / \omega$ - гальмівний момент обумовлений втратами;

$\omega = 2\pi n / 60$ - кутова швидкість якоря.

Рівняння (4.17) справедливе при постійній швидкості якоря. При будь-яких змінах швидкості виникає динамічний момент $M_j = J d\omega / dt$, який іде на розгін або гальмування обертових мас двигуна і виконав-

чого механізму. З урахуванням динамічної складової рівняння моментів має вигляд

$$M = M_2 + M_0 + M_j .$$

Рівняння кутової швидкості. Із (4.14) можна отримати

$$U \cdot I_a R_a = E = c\omega\Phi . \quad (4.18)$$

Із рівняння (4.18) отримаємо рівняння кутової швидкості

$$\omega = (U - I_a R_a) / (c\Phi) . \quad (4.19)$$

4.9. Характеристики двигунів постійного струму

Робочі властивості двигунів постійного струму оцінюють за такими характеристиками:

- 1) швидкісна характеристика $\omega = f(I_a)$;
- 2) механічна характеристика $\omega = f(M)$;
- 3) моментна характеристика $M = f(I_a)$.

Швидкісні і механічні характеристики знімають при постійній напрузі, а для двигунів незалежного, паралельного і змішаного збудження, крім цього, ще і при постійному струмі збудження.

Схеми для експериментального дослідження двигунів незалежного і паралельного збудження зображені на рис.4.20,а,б.

Швидкісна характеристика $\omega = f(I_a)$ при $I_3 = const$ і $U = const$.

Швидкісну характеристику знімають при $U = U_H$ і $I_3 = I_{3H}$. Номінальний струм збудження I_{3H} встановлюють так, щоб забезпечити номінальну швидкість ω_H при $I_a = I_{aH}$ і номінальній напрузі U_H .

Рівняння механічної характеристики отримаємо із (4.19) з урахуванням того, що при $U = U_{ном} = const$ на кутову швидкість будуть впливати два фактори: спад напруги і розмагнічуюча дія реакції якоря, що зменшує потік

$$\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi ,$$

де Φ_0 - потік створений струмом збудження; $\Delta\Phi$ - зменшення потоку за рахунок реакції якоря.

З урахуванням сказаного, отримаємо

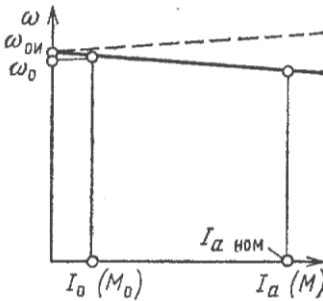
$$\omega = \frac{U_H - I_a R_a}{c(\Phi_0 - \Delta\Phi)} . \quad (4.20)$$

При зростанні струму якоря спад напруги $I_a R_a$ буде прагнути зменшити швидкість, а $\Delta\Phi$ – збільшити. Вигляд швидкісної характеристики залежить від того, який з цих факторів буде діяти сильніше. При більшому впливі спаду напруги характеристика матиме похилий характер (суцільна лінія на рис.4.21), а якщо буде переважати дія реакції якоря, то вона матиме зростаючий характер (штрихова лінія). Слід відмітити, що нормальна робота двигуна можлива при спадаючій характеристиці.

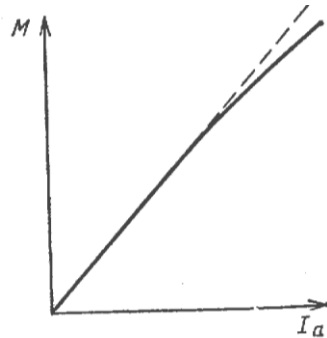
Моментна характеристика $M = f(I_a)$ при $I_3 = const$. Цю залежність можна отримати з рівняння

$$M = c\Phi I_a = c(\Phi_0 - \Delta\Phi)I_a. \quad (4.21)$$

Якби при $I_3 = const$ потік Φ залишався б постійним, то залежність $M = f(I_a)$ являла б пряму лінію, що виходить з початку координат (штрихова лінія на рис.4.22). Реальна характеристика відхиляється від лінійної залежності (суцільна лінія на рис.4.22). Однак розбіжність між цими характеристиками невелика і в багатьох випадках неухтують.



4.21. Швидкісні характеристики двигуна незалежного збудження



4.22. Моментна характеристика двигуна незалежного збудження

Механічна характеристика $\omega = f(M)$ при $I_3 = const$, $U = U_H = const$. Аналітичний вираз механічної характеристики отримаємо із (4.19), якщо струм I_a виразимо через момент

$$I_a = \frac{M}{c(\Phi_0 - \Delta\Phi)},$$

тоді

$$\omega = \frac{U_H}{c(\Phi_0 - \Delta\Phi)} - \frac{M \cdot R_a}{c^2(\Phi_0 - \Delta\Phi)^2}. \quad (4.22)$$

Враховуючи пропорційну залежність між M і I_a , то при однакових значеннях U і I_3 швидкісна характеристика в іншому масштабі буде і механічною характеристикою.

Якщо відсутній момент навантаження ($M_2=0$), то двигун буде працювати в неробочому режимі, при цьому $I_a=I_0$, а швидкість $\omega = \omega_0$ (рис.4.21). Струм I_0 - струм неробочого ходу – створює момент M_0 необхідний для подолання в самому двигуні гальмівного моменту, обумовленого силами тертя і магнітними втратами. Струм I_0 складає 2÷5% від номінального.

Робота двигуна при $I_a=0$ і $M=0$ називається ідеальним неробочим ходом. Швидкість при ідеальному неробочому ході дорівнює

$$\omega_0 = U_H / (c \cdot \Phi_0). \quad (4.23)$$

Зміна швидкості при переході від неробочого ходу до номінального навантаження мала і складає 2÷5%. Такі повільно спадаючі механічні і швидкісні характеристики називаються жорсткими.

Робота двигуна незалежного збудження може бути стійкою і нестійкою. Нестійка робота має місце при наростаючих механічних характеристиках двигунів. На рис.4.23 наведена така характеристика двигуна (пряма 1). Там же наведена механічна характеристика для механізму, що приводиться в рух двигуном (пряма 2). Перетин цих прямих є точкою рівноваги моментів $M = M_C$ (точка а) і відповідає усталеному режиму.

Нехай внаслідок дії яких-небудь збурюючих сил швидкість збільшилась на $\Delta\omega$. Тоді момент двигуна збільшиться до M_1 і виникне додатній динамічний момент ($M_1 - M_C > 0$). Під дією надлишкового моменту двигуна швидкість ω почне наростати, різниця $M - M_C$ ще більше зростає, що призведе до подальшого зростання ω і т.д. Якщо в результаті збурення швидкість зменшиться, то $M - M_C < 0$ і ω буде неперервно зменшуватись. Отже точка а є точкою нестійкої рівноваги і нормальна робота двигуна з такою механічною характеристикою неможлива.

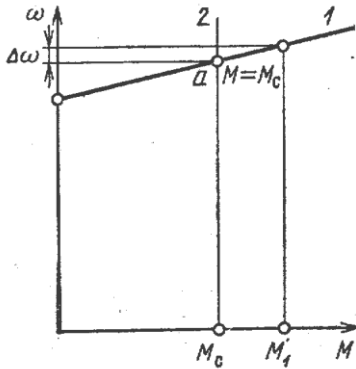


Рис.4.23. До визначення стійкої роботи двигуна незалежного збудження

Аналогічно можна показати, що при спадаючій механічній характеристиці робота буде проходити стійко, так як всяке відхилення швидкості на $\pm \Delta\omega$ викличе появу надлишкового моменту, направленого на відновлення рівноваги.

Іноді при проектуванні двигунів незалежного збудження з метою зменшення його розмірів і маси завищують лінійне навантаження A і індукцію в повітряному проміжку B_δ . В таких двигунах дуже проявляється розмагнічуюча дія реакції якоря і механічна характеристика має наростаючий характер. Тому тут передбачають спеціальну обмотку збудження (стабілізуючу обмотку), яка розташована на полюсах і вмикається послідовно з якорем. Вона має декілька витків і призначена для компенсації розмагнічуючої дії реакції якоря. При наявності такої обмотки механічна характеристика буде мати спадаючий характер.

Характеристики двигуна паралельного збудження будуть такими ж, як і у двигуна незалежного збудження.

На рис.4.20, в зображена схема двигуна послідовного збудження. Характерною особливістю двигуна є те, що його струм якоря дорівнює струму збудження: $I_a = I_z = I$.

Швидкісна характеристика $\omega = f(I_a)$ $U = U_H = const$. Для двигуна послідовного збудження рівняння швидкісної характеристики таке ж саме, як і для двигуна незалежного збудження. Магнітний потік у цього двигуна залежить від струму якоря $I_a = I_z$. Залежність $\Phi = f(I_a)$, наведена на рис.4.24, називається магнітною характеристикою.

Оскільки величина $I_a R_a$ мала (при $I_a = I_{aH}$ складає 2÷4% від U_H), то зменшення чисельника при зміні струму якоря незначне і тому залежність $\omega = f(I_a)$ має гіперболічний характер (штрихова лінія на рис.4.25). Значне збільшення швидкості при малому навантаженні обумовлене відповідним зменшенням магнітного потоку.

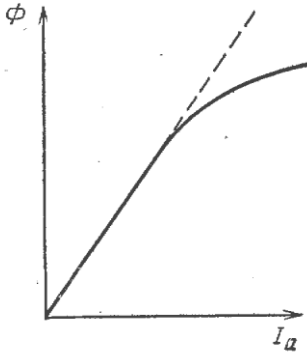


Рис.4.24. Магнітна характеристика двигуна послідовного збудження

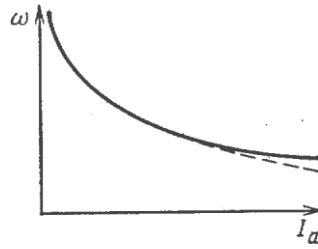


Рис.4.25. Швидкісна характеристика двигуна послідовного збудження

Реальна характеристика $\omega = f(I_a)$ при струмах більших за $0,7 I_{aH}$ буде відхилятися від гіперболічної залежності. Пояснюється це насиченням магнітного кола і розмагнічуючою дією реакції якоря, що зменшує потік і дещо збільшує швидкість (суцільна крива на рис.4.25).

Моментна характеристика $M = f(I_a)$ має параболічну залежність (штрихова лінія на рис.4.26). З урахуванням насичення і реакції якоря магнітний потік в дійсності буде менший, що викличе відповідне зниження моменту, і крива $M = f(I_a)$ при великих струмах I_a піде нижче (суцільна крива на рис.4.26).

Механічна характеристика $\omega = f(M)$ при $U = U_{ном} = const.$
Струм якоря

$$I_a = \sqrt{M / (cK_\phi)} \quad (4.24)$$

Звідки, урахувавши (4.22)

$$\omega = \frac{U_H}{K_M \sqrt{M}} - \frac{R_a}{K_M^2}, \quad (4.25)$$

де $K_M = \sqrt{cK_\phi}$.

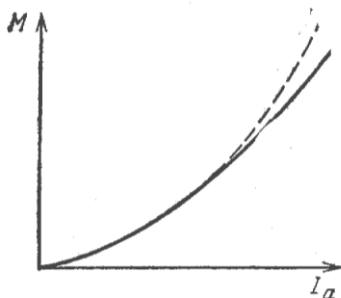


Рис.4.26. Моментна характеристика двигуна послідовного збудження

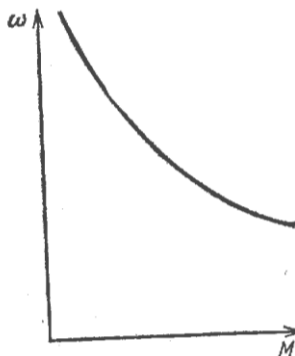


Рис.4.27. Механічна характеристика двигуна послідовного збудження

Із (4.25) слідує, що механічна характеристика має гіперболічний характер (так як і швидкісна характеристика (рис.4.25)).

Внаслідок значної залежності кутової швидкості від навантаження механічні і швидкісні характеристики двигуна послідовного збудження називають м'якими. При $M=0$ і $I_a=0$ теоретично швидкість дорівнює безкінечності, тобто двигун іде в „рознос”. І може вийти з ладу. Тому цього допустити не можна. Навантаження не повинно бути меншим 25-30% номінального.

На рис.4.8, г зображена схема двигуна змішаного збудження. Характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження. При слабкій послідовній обмотці вони будуть наближатися до характеристик двигуна послідовного збудження.

На рис.4.28 і рис.4.29 наведені характеристики двигуна змішаного збудження (крива 1). Для співставлення наведені відповідні характеристики двигунів паралельного (крива 2) і послідовного (крива 3) збудження. При цьому припускається, що всі три двигуни мають однакові номінальні дані.

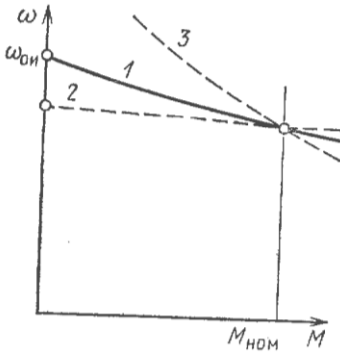


Рис.4.28. Механічна характеристика двигуна змішаного збудження

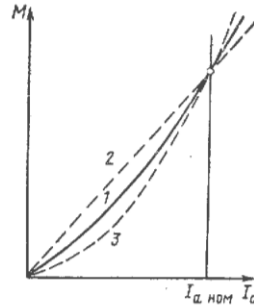


Рис.4.29. Моментні характеристики двигуна змішаного збудження

Швидкість при неробочому ході ($I_a=0$) у двигуна змішаного збудження має кінцеве значення і визначається потоком Φ_0 , що створюється паралельною обмоткою збудження.

4.10. Пуск двигунів постійного струму

Струм якоря двигуна визначається з рівняння

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

При пуску, коли якір нерухомий, $E=0$. Пусковий струм дорівнює $I_{II} = U / R_a$. Опір кола обмотки якоря невеликий, тому пусковий струм в $10 \div 50$ раз більший номінального. Такий струм погано впливає на роботу щіток (велике іскріння), на обмотки (великі електродинамічні зусилля), на мережу (великі спади напруги). Тому пряме вмикання в мережу допускається тільки для двигунів, у яких відносно великий опір R_a . Для потужних двигунів необхідно вживати заходів по зменшенню пускового струму. Цього досягнути можна або пониженням напруги живлення або вмикання послідовно з якорем пускового реостату (рис.4.30). Опір пускового реостату вибирають так, щоб в перший момент пуску ($\omega=0$) струм якоря дорівнював

$$I_{II} = \frac{U_H}{R_a + R_{II}} \leq (2 \div 2,5) I_{aH}.$$

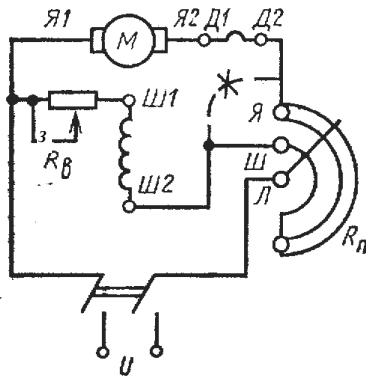


Рис.4.30. Схема пуску двигуна паралельного збудження

Під дією моменту, що створюється струмом I_{II} , якір почне обертатися, в його обмотці почне індукуватись ЕРС, внаслідок чого струм буде зменшуватись. Тому в міру розгону двигуна опір пускового реостату поступово зменшують, а коли швидкість досягне усталеного значення, виводять повністю. Пускові реостати розраховують на короткочасне протікання струму і залишати їх ввімкненими після закінчення пуску не рекомендується.

Пониження пускового струму зменшенням напруги живлення можна виконати, якщо двигун вмикається на окреме джерело живлення, як це робиться, наприклад, в системах Г-Д. В цьому випадку напругу генератора піднімають плавно і великі стрибки струму відсутні.

Збільшити M_{II} при обмеженому струмі можна за рахунок потоку Φ . Тому в двигунах паралельного і змішаного збудження паралельну обмотку збудження слід вмикати на повну напругу мережі, вивівши регульовальний опір R_3 . Не можна вмикати цю обмотку після пускового реостату (штрихова лінія на рис.4.30).

Якщо пуск відбувається з навантаженням на валу, то може статися, що $M_{II} < M_2$, і двигун не буде обертатися. При пуску при неробочому ході ($M_2=0$) через малий магнітний потік буде дуже зростати швидкість (двигун піде в „рознос”), що є недопустимим. Тому вмикання паралельної обмотки збудження безпосередньо до якоря (після пускового реостату) не дозволяється.

При пуску двигуна послідовного збудження необхідно слідкувати за тим, щоб до його валу був прикладений момент навантаження. Пуск без навантаження не допускається, так як при $M_2 = 0$ струм $I_a = I_3$ (відповідно і потік Φ) в міру розгону двигуна будуть зменшуватися, а швидкість збільшуватись (двигун піде в „рознос“).

Щоб змінити напрям обертання якоря необхідно змінити напрям магнітного потоку або напрям струму в обмотці якоря. Для цього необхідно поміняти місцями провідники на обмотці збудження або на обмотці якоря разом з обмоткою додаткових полюсів. Зміна напрямку струму одночасно в обмотці збудження і в обмотці якоря, що має місце при зміні полярності напруги, не дасть зміни напрямку обертання.

У двигунів змішаного збудження при зміні напрямку обертання необхідно міняти провідники місцями одночасно на паралельній і послідовній обмотках збудження.

4.11. Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму

Згідно з (4.20) швидкість двигунів можна регулювати трьома способами:

- 1) зміною опору кола якоря;
- 2) зміною магнітного потоку (струму збудження);
- 3) зміною напруги живлення.

При співставленні характеристик двигуна в процесі регулювання швидкості за вихідну будемо приймати швидкісну або механічну характеристику, отриману при номінальних значеннях напруги і струму збудження, а також при відсутності додаткових опорів в колі якоря. Такі характеристики називаються природними. В іншому випадку характеристики називаються штучними.

Регулювання швидкості зміною опору кола якоря. При вмиканні послідовно в коло якоря регулювального резистора $R_{ад}$ (рис.4.31) збільшиться спад напруги, що призведе до зменшення ЕРС якоря $E = c\omega\Phi$. При $\Phi = const$ зменшення ЕРС може відбутися за рахунок зниження швидкості. Отже резистором $R_{ад}$ можна регулювати швидкість в бік її зменшення.

Рівняння швидкісної і механічної характеристики мають вигляд

$$\omega = \frac{U - I_a (R_a + R_{ад})}{c\Phi};$$

$$\omega = \frac{U - I_a(R_a + R_{ад})}{c\Phi} - \frac{M(R_a + R_{ад})}{c^2\Phi^2}, \quad (4.26)$$

де $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$.

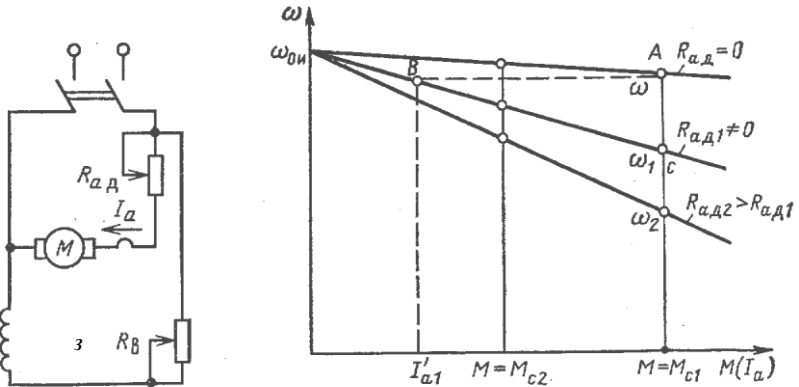


Рис.4.31. Схема регулювання (а) і механічні характеристики (б) двигунів незалежного і паралельного збудження при різних значеннях $R_{ад}$

За рівняннями (4.13) на рис.4.31, б побудовані механічні (швидкісні) характеристики для двигунів незалежного (паралельного) збудження при різних значеннях $R_{ад}$ і $U = const$, $I_3 = const$.

Із (4.20) слідує, що всі характеристики виходять з однієї точки, що відповідає швидкості при ідеальному неробочому ході ($I_a = 0$ і $M = 0$)

$$\omega_0 = U / (c\Phi_0) \quad (4.27)$$

і чим більше значення $R_{ад}$, тим більше змінюється швидкість із збільшенням навантаження (характеристики стають менш жорсткими).

Швидкість, з якою буде працювати двигун на штучній характеристиці в усталеному режимі, визначається точками перетину механічних характеристик двигуна і виробничого механізму.

Якщо прийняти характеристику статичного опору $M_{с1} \approx M_2 = const$, то згідно з рис.4.31, б кутові швидкості будуть дорівнювати ω , ω_1 , ω_2 і т.д. Отже, даним способом можна зменшувати швидкість у широких межах, аж до нульового її значення.

Перехід з однієї швидкості на іншу, наприклад з ω на ω_1 , відбувається таким чином. Припустимо, що на природній характеристиці

двигун працює в точці A з моментом $M = M_{C1}$. Швидкість при цьому дорівнює ω , а струм в колі якоря $I_a = (U - E) / R_a$. При вмиканні резистора $R_{ад1}$ в перший момент часу через механічну інерцію якоря швидкість не зміниться (двигун з точки A перейде в точку B). Тоді струм в колі якоря зменшиться і буде дорівнювати $I'_{a1} = (U - E) / (R_a + R_{ад1})$.

Електромагнітний момент M , що розвиває двигун при струмі I'_{a1} , стане меншим M_{C1} , і швидкість почне зменшуватись. Із зменшенням швидкості ЕРС також зменшиться, а струм в якорі збільшиться. Це буде відбуватися до тих пір, коли не наступить рівновага моментів $M = M_{C1}$, при цьому струм в якорі буде дорівнювати попередньому значенню I_{a1} , а швидкість $\omega_1 < \omega$.

При даному способі регулювання виникають значні втрати в регулювальному реостаті, що викликає пониження ККД.

Регулювання швидкості зміною опору кола якоря розглядалось для двигунів паралельного і незалежного збудження, але все сказане можна використати і для двигунів послідовного і змішаного збудження.

Регулювання швидкості зміною магнітного потоку. Регулювання магнітного потоку здійснюється зміною струму збудження. Оскільки в номінальному режимі двигун розрахований на роботу майже з найбільшим значенням потоку і струму збудження, то регулювання можна здійснити лише в сторону їх зменшення. Зменшення магнітного потоку призведе до збільшення швидкості, тобто в даному випадку здійснюється регулювання швидкості ввєрх від основної. Якщо не враховувати вплив реакції якоря, то швидкісні характеристики $\omega = f(I_a)$ двигунів незалежного і паралельного збудження при $U = const$ і $I_3 = const$ будуть являти собою прямі лінії (суцільні лінії на рис.4.32,а).

Відповідно до певного значення потоку кожна із характеристик при ідеальному неробочому ході має свою швидкість. Всі швидкісні характеристики перетинаються з віссю абсцис в одній точці ($\omega = 0$), що відповідає струму короткого замикання $I_K = U / R_a$.

Механічні характеристики, що наведені на рис.4.32, б мають при ідеальному неробочому ході ті ж швидкості, що і швидкісні. Однак з віссю абсцис вони будуть перетинатися в різних точках, так як при однаковому струмі I_K і $\Phi = var$ пускові моменти будуть різними.

Суцільними лініями на рис.4.32, б наведені характеристики без урахування впливу реакції якоря.

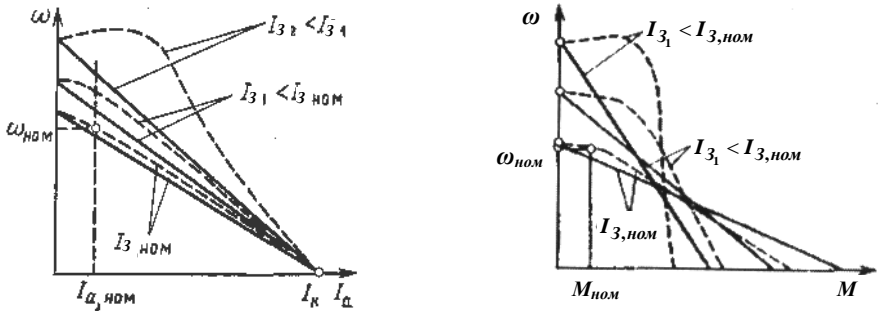


Рис.4.32. Швидкісні (а) і механічні (б) характеристики двигунів незалежного і паралельного збудження при різних струмах збудження

Як видно з рис.4.32,б характеристики перетинаються між собою, тому при навантажувальних моментах, що лежать за точками перетину, зменшення потоку спричинять не збільшення швидкості, а її зменшення.

Характеристики на рис.4.32 побудовані при припущенні, що при зміні I_a і M потік $\Phi = const$. Якщо врахувати розмагнічуючу дію реакції якоря, то вони будуть розміщені дещо вище і при малих струмах збудження можуть набути зростаючого характеру (штрихові криві на рис.4.32). Як вже відмічалось раніше, робота двигуна при зростаючих характеристиках має нестійкий характер. Розмагнічуюча дія реакції якоря призводить також до зниження пускового моменту.

Регулювання швидкості зміною магнітного потоку є одним з найбільш простих способів і тому має широке застосування.

В двигунах послідовного збудження регулювання швидкості відбувається шунтуванням обмотки збудження (рис.4.33,а). Струм в обмотці збудження при цьому дорівнює

$$I_3 = I_a \frac{R_{ш.с}}{R_{ш.с} + R_c} = I_a \frac{1}{1 + R_c / R_{ш.с}}, \quad (4.28)$$

де R_c , $R_{ш.с}$ - опір послідовної обмотки і шунтуючого резистора. Чим менший опір $R_{ш.с}$, тим меншими будуть струм I_3 і потік Φ . Із зменшенням потоку Φ швидкість зростає. На рис.4.33,б наведені швидкісні характеристики двигуна послідовного збудження.

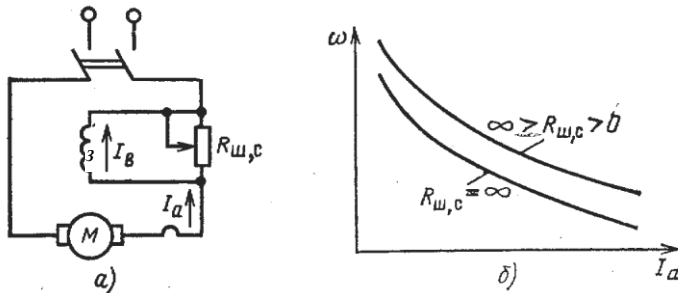


Рис.4.33. Схема регулювання швидкості двигуна послідовного збудження зміною магнітного потоку (а) і швидкісні характеристики (б)

В двигунах змішаного збудження зменшення потоку відбувається зменшенням струму в паралельній обмотці збудження.

Регулювання швидкості зміною напруги живлення. Згідно з рівнянням (4.20) швидкість двигуна постійного струму наближено пропорційна прикладеній напрузі U . Отже, зміною U можна регулювати швидкість двигуна. Оскільки робота двигуна при $U > U_H$ недопустима, то даний спосіб дає можливість регулювати швидкість в сторону її пониження.

Для реалізації цього способу необхідно, щоб двигун отримував живлення від окремого джерела. В якості джерела можна використати генератор постійного струму незалежного збудження. Системи, що складаються із генератора і під'єданого до нього двигуна, називаються системою генератор-двигун, або системою Г-Д (рис.4.34).

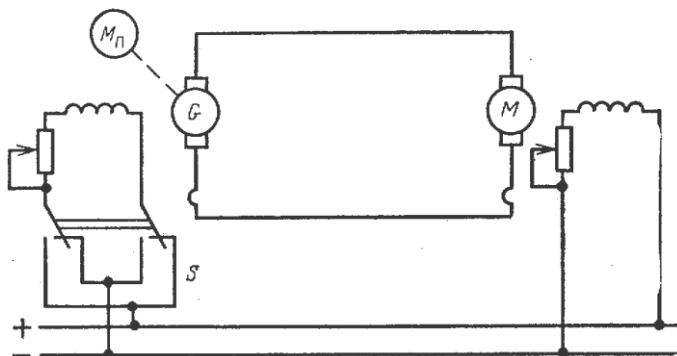


Рис.4.34. Система генератор-двигун

Якір генератора G з'єднаний електрично з якорем двигуна M безпосередньо без пускових і регульовальних реостатів. Обмотки збудження генератора і двигуна живляться від окремого джерела. Генератор обертається з постійною швидкістю допоміжним двигуном M_{II} , переважно двигуном змінного струму.

Зміна напруги у двигуна постійного струму досягається регулюванням струму збудження генератора. Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно перемикачем S змінити полярність напруги на обмотці збудження генератора.

Пуск двигуна здійснюється за рахунок поступового зростання напруги на його обмотці якоря, що досягаються плавним збільшенням струму збудження генератора. Так як всі операції керування двигуном проводяться в малопотужних колах збудження, то необхідна для цього апаратура є легкою і компактною, що є однією із переваг цієї схеми.

Останнім часом широкого використання набули системи, в яких генератор замінюється напівпровідниковим перетворювачем, що перетворює змінну напругу мережі в регульовану випрямлену напругу (рис.4.35). Порівняно з системою Г-Д такі установки мають меншу масу і більший ККД. Для регулювання напруги використовують також системи, в яких постійна за амплітудою і напрямом напруга періодично подається на якір у вигляді окремих імпульсів. При такому живленні середнє значення напруги на якорі буде визначати швидкість обертання якоря двигуна.

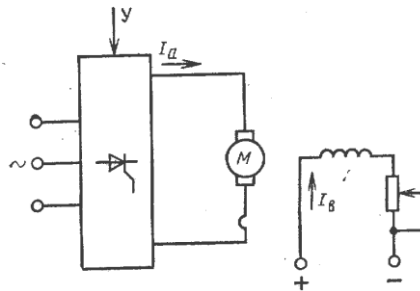


Рис.4.35. Система з напівпровідниковим перетворювачем

За рахунок зміни напруги живлення, що подається на напівпровідниковий перетворювач можна отримати діапазон регулювання 10:1. При регулюванні швидкості зміною напруги ККД двигуна залишається практично незмінним.

Література

1. Брускин Д.З. и др. Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. Вузов /Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. уч. заведений / А.И.Вольдек– Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Лябук М.Н. Електричні машини. Навчальний посібник / М.Н. Лябук. – Луцьк РВВ ЛНТУ, 2005. – 445 с.
4. Лябук М.Н. Електротехніка. Лабораторні роботи. Навчальний посібник / М.Н. Лябук. – К.: ІЗМН, 1998. -284 с.
5. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини: Навчальний посібник для електротехн. спец. ВНЗів / В.П. Метельський; наук. ред. А.М. Кравченко. – 2-е вид, доповнене й перероблене. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.
6. Півняк Г.Г. та ін. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2003. – 327 с.
7. Токарев Б.Ф. Электрические машины / Б.Ф. Токарев – М.: Энергоиздат, 1990. – 624 с.
8. Яцун М.А. Електричні машини: навч. посібник / М.А. Яцун. – Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.

Зміст

Передмова.....	3
ТЕМА 1. ТРАНСФОРМАТОРИ.....	4
1.1. Призначення, область застосування і номінальні дані трансформаторів.....	4
1.2. Електромагнітні процеси в трансформаторі при неробочому ході.....	7
1.3. Заступна схема та втрати в трансформаторі при неробочому ході.....	10
1.4. Дослід неробочого ходу трансформатора.....	11
1.5. Електромагнітні процеси в трансформаторах при навантаженні.....	12
1.6. Рівняння напруг обмоток трансформатора при навантаженні. Зведення вторинних величин до первинної обмотки.....	14
1.7. Дослід короткого замикання трансформатора.....	15
1.8. Характеристики трансформаторів. Зміна вторинної напруги трансформатора при навантаженні.....	17
1.9. Зовнішні характеристики трансформатора.....	19
1.10. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії трансформатора.....	21
1.11. Магнітні системи і способи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів.....	23
1.12. Групи з'єднань обмоток трансформаторів.....	25
1.13. Паралельна робота трансформаторів.....	26
1.14. Трансформатори спеціального призначення. Автотрансформатори.....	27
ТЕМА 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ.....	29
2.1. Области використання, конструкція та принцип роботи асинхронних машин.....	29
2.2. Електромагнітні процеси в асинхронній машині при рухомому роторі.....	33
2.3. Механічна характеристика асинхронного двигуна.....	38
2.4. Робочі характеристики асинхронного двигуна.....	40
2.5. Пуск асинхронних двигунів.....	42
2.6. Регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронних двигунів.....	46

ТЕМА 3. СИНХРОННІ МАШИНИ.....	49
3.1. Конструктивні схеми і принцип роботи синхронної машини.....	49
3.2. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при неробочому ході.....	52
3.3. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при навантаженні.....	56
3.4. Параметри і характеристики синхронного генератора при автономному режимі.....	60
3.5. Паралельна робота синхронних генераторів.....	66
3.6. Робота синхронної машини в режимі двигуна.....	70
3.7. Характеристики синхронного двигуна.....	71
3.9. Пуск синхронних двигунів.....	74
3.10. Регулювання швидкості обертання ротора синхронного двигуна.....	76
3.11. Синхронний компенсатор.....	77
ТЕМА 4. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	78
4.1. Будова і принцип роботи машин постійного струму....	78
4.2. Конструкція машини постійного струму.....	81
4.3. Електрорушійна сила обмотки якоря і електромагнітний момент машини постійного струму.....	85
4.4. Генератори постійного струму.....	87
4.5. Характеристики генераторів постійного струму.....	89
4.6. Характеристики генератора паралельного збудження....	93
4.7. Характеристики генератора послідовного збудження....	96
4.8. Характеристики генератора змішаного збудження.....	97
4.8. Класифікація двигунів постійного струму за способами збудження.....	98
4.9. Характеристики двигунів постійного струму.....	101
4.10. Пуск двигунів постійного струму.....	107
4.11. Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму.....	109
Література	115

Електричні машини [Текст]: Курс лекцій для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання / уклад. Лишук В.В. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2016. – 120 с.

Комп'ютерний набір та верстка: В.В. Лишук.

Видається в авторській редакції

Підп. до друку _____
Формат 60x80/16. Папір офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк. арк. Обл. вид. арк.
Тираж прим. Зам.

Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75.
Друк – РВВ Луцького НТУ

