

Лекція №8

РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРИФАЗНОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

План лекції:

1. Асинхронні машини при нерухомому роторі.
2. Режим неробочого (холостого) ходу АД.
3. Режим короткого замикання АД.
4. Асинхронний двигун при обертанні ротора.
5. Магнітні потоки та рівняння ЕРС АД при навантаженні
6. Приведений асинхронний двигун.
7. Векторно-потенціальна діаграма та схеми заміщення АД

1 Асинхронні машини при нерухомому роторі

Електромагнітні процеси в асинхронному двигуні аналогічні процесам, що відбуваються в трансформаторі. Обмотку статора асинхронного двигуна можна розглядати як первинну обмотку трансформатора, а обмотку ротора – як вторинну.

Якщо до обмотки статора двигуна підвести напругу мережі U_1 , а обмотку ротора розімкнути, що можна зробити в двигуні з фазним ротором, то магнітне поле статора, що обертається, пересікаючи нерухомі обмотки статора і ротора, індукуватиме в них ЕРС E_1 і E_2 . Величини цих ЕРС визначають за формулами:

$$E_1 = 4,44W_1f_1 K_{об1}\Phi_m \quad (8.1)$$

$$E_2 = 4,44W_2f_1 K_{об2}\Phi_m \quad (8.2)$$

де E_1 – ЕРС обмотки статора, В;

E_2 – ЕРС обмотки ротора, В;

$K_{об1}$ і $K_{об2}$ – відповідно обмоткові коефіцієнти обмоток статора і ротора;

W_1 і W_2 – число витків обмоток статора і ротора;

Φ_m – основний магнітний потік, Вб;

f_1 – частота струму мережі, Гц.

При нерухомому роторі $f_2 = f_1$.

Аналогічно, як і для трансформатора, для асинхронного двигуна можна написати рівняння рівноваги ЕРС.

$$\vec{U}_2 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_o r_1 + \vec{I}_o x_1, \quad (8.3)$$

де \vec{E}_1 – ЕРС, що індукована в обмотці статора основним магнітним потоком Φ_m ;

$\vec{I}_o r_1$ – падіння напруги на активному опорі обмотки статора r_1 ;

$\vec{I}_o x_1$ – падіння напруги на індуктивному опорі обмотки статора x_1 , що визначене величиною ЕРС розсіяння, як і в трансформаторі.

Режим роботи асинхронного двигуна, коли до обмотки статора підводять номінальну напругу при номінальній частоті, а обмотка ротора розімкнена, називають режимом неробочого (холостого) ходу. Цей режим аналогічний режиму неробочого ходу трансформатора, але струм неробочого ходу асинхронного двигуна більший, ніж трансформатора із-за повітряного зазору між сталлю статора і ротора що збільшує магнітні потоки розсіювання. Якщо струм холостого ходу трансформатора складає 5-10 % номінального, то в асинхронному двигуні його величина може дорівнювати 20-60 % номінального. Векторна діаграма асинхронного двигуна в режимі холостого ходу аналогічна відповідній діаграмі трансформатора.

Коефіцієнтом трансформації ЕРС асинхронного двигуна k_e називають відношення ЕРС статора E_1 до ЕРС ротора E_2

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_{o\sigma 1} W_1}{K_{o\sigma 2} W_2}. \quad (8.4)$$

Коефіцієнтом трансформації струмів називають відношення

$$k_i = \frac{m_1 K_{o\sigma 1} W_1}{m_2 K_{o\sigma 2} W_2}. \quad (8.5)$$

де m_1, m_2 – кількість фаз обмотки статора і ротора.

Коефіцієнтом трансформації асинхронного двигуна називають співвідношення між коефіцієнтами трансформації ЕРС і струмів

$$k = k_e k_i. \quad (8.6)$$

Тоді формули приведення вторинних величин до первинної обмотки матимуть, за аналогією з трансформатором, такий вигляд:

– приведена ЕРС

$$E'_2 = k_e E_2, \quad (8.7)$$

– приведений струм

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i}, \quad (8.8)$$

– приведені опори

$$r'_2 = r_2 k, \quad (8.9)$$

$$x'_2 = x_2 k, \quad (8.10)$$

$$z'_2 = z_2 k. \quad (8.11)$$

Якщо ротор асинхронного двигуна замкнути накоротко і загальмувати, а до обмотки статора підвести знижену напруга такої величини, щоб струми короткого замикання були рівні номінальним, то, включивши відповідні прилади в схему, можна провести дослід короткого замикання двигуна, аналогічний дослід короткого замикання трансформатора.

Для асинхронного двигуна в режимі короткого замикання можна зобразити трикутник короткого замикання, який буде майже таким же, як і в трансформатора.

Напруга короткого замикання в асинхронних двигунах дещо більша, ніж у трансформаторів, внаслідок великих магнітних потоків розсіювання.

Якщо ротор двигуна заморожений (обмотка), але не загальмований, а до статора підведена номінальна напруга, то в початковий момент струм короткого замикання буде в 4-7 разів більше номінального. В цьому випадку ротор двигуна розкручується і струм короткого замикання швидко зменшується. Таким чином, асинхронний двигун з коротко-замкненим ротором в початковий момент пуску знаходиться в режимі короткого замикання.

Вважають, що в асинхронному двигуні, як і в трансформаторі потужність при холостому ході йде на покриття втрат в сталі, а при короткому замиканні – на покриття втрат в міді.

2 Режим неробочого (холостого) ходу АД

При розімкненій обмотці ротора асинхронного двигуна з фазним ротором виникає режим н. х., подібний до режиму н. х. трансформатора. При цьому первинною обмоткою є обмотка статора, а вторинною – обмотка ротора. Під дією прикладеної до обмотки статора напруги мережі U_1 протікає струм н. х. I_0 , що створює обертове магнітне поле, велика частина магнітних ліній якого зв'язана з витками обмоток статора і ротора, утворюючи основний магнітний потік Φ . Частина магнітних ліній буде зв'язана лише з витками обмотки статора, утворюючи потік розсіювання Φ_{s1} .

Основний магнітний потік індукує в обмотках статора та ротора ЕРС, фазні діючі значення яких визначаються із виразів:

$$E_1 = 4,44k_{o\delta 1}W_1f\Phi; \quad E_2 = 4,44k_{o\delta 2}W_2f\Phi,$$

де $k_{o\delta 1}$ і $k_{o\delta 2}$ – обмоткові коефіцієнти;

W_1 і W_2 – число витків обмоток статора і ротора відповідно.

Відношення

$$k_e = \frac{E_1 k_{o\delta 1} W_1}{E_2 k_{o\delta 2} W_2} \quad (8.12)$$

називають коефіцієнтом трансформації ЕРС, який наближено визначають дослідним шляхом ставленням фазних значень ЕРС обмоток статора і ротора при н. х. Так як струм н. х. відносно малий, то ЕРС обмотки статора можна вважати приблизно рівною напрузі:

$E_1 \approx U_1; \quad E_2 \approx U_2$. Отже, $k_e = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$. Коефіцієнт трансформації

ЕРС відрізняється від коефіцієнта трансформації трансформатора відношенням обмотувальних коефіцієнтів.

З (8.12) маємо

$$E_1 = k_e E_2 = E_2',$$

де E_2' – приведенне до обмотки статора діюче значення ЕРС фази обмотки ротора.

Потік розсіювання Φ_{s1} індукує в кожній фазі обмотки статора ЕРС розсіювання

$$\dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 x_1,$$

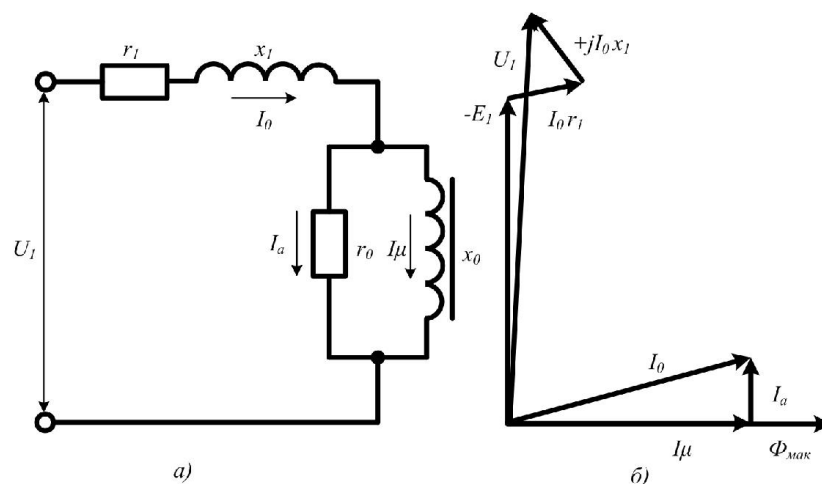
де x_1 – індуктивний опір фази обмотки статора.

Крім того, кожна фаза обмотки статора має активний опір r_1 , що викликає падіння напруги $I_0 r_1$.

Отже, для однієї фази статора рівняння рівноваги ЕРС буде мати наступний вигляд

$$\dot{U}_{s1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1. \quad (8.13)$$

Еквівалентна схема, що відповідає даному рівнянню, зображена на **рисунку 8.1, а**, а векторна діаграма асинхронного двигуна – на **рисунку 8.1, б**. Вони подібні до еквівалентної схеми і векторної діаграми трансформатора при н. х.



а – схема заміщення; *б* – векторна діаграма.

Рисунок 8.1 – Одна фаза статора АД при н.х.

Струм н.х. I_0 має реактивну або намагнічуючу складову I_μ , що споживається для збудження магнітного поля, і активну складо-

ву I_a , яка необхідна для покриття втрат в сталі статора та ротора, а також в обмотці статора. Так як асинхронний двигун має повітряний зазор між статором і ротором, то його струм н.х. I_0 завжди значно більший, ніж у трансформатора тієї ж потужності, де магнітний потік замикається в основному через сталь. Тому, якщо у трансформатора середньої потужності струм н. х. становить 5-10 %, то у асинхронного двигуна такої ж потужності він складе 20-35% номінального значення. Індуктивний x_1 та активний r_1 опір асинхронного двигуна також значно більший і, отже, падіння напруги $I_0 r_1$ і $I_0 x_1$, малі при н.х. трансформатора, в асинхронних двигунах досягають декількох відсотків номінальної напруги. Але і тут основний магнітний потік $\Phi_{\text{мак}}$ і відповідно ЕРС E_1 мають основне значення, а тому приблизно можна вважати $E_1 \approx U_1$.

3 Режим короткого замикання АД

При загальмованому роторі і короткозамкненій його обмотці асинхронний двигун подібний короткозамкненому трансформатору з тією лише різницею, що струм к. з. $I_{\text{к.з}}$ двигуна перевищує номінальний струм $I_{\text{ном}}$ в 4-5 разів, тоді як у трансформаторі $I_{\text{к.з}} = (12 - 18)I_{\text{ном}}$. Проте двигун, так само як і трансформатор, тривало не можна залишати під повною напругою при к. з. щоб уникнути надмірного нагрівання. Тому для визначення параметрів к. з. проводять дослід к. з.: до двигуна підводять таку понижену напругу, при якій $I_{\text{к.з}} = I_{\text{ном}}$.

Так як між асинхронним двигуном і трансформатором при к.з. існує повна подібність, то еквівалентна схема і векторна діаграма асинхронного двигуна не мають принципової відмінності від еквівалентної схеми і векторної діаграми трансформатора. Однак умови приведення ротора до кола статора асинхронної машини складніше, ніж у трансформаторі, так як ротор конструктивно може сильно відрізнятися від статора. Під приведеною обмоткою ротора розуміють таку обмотку, яка має ті ж числа фаз і витків у фазі і те ж розташування обмотки, що і обмотка статора.

При дослідженні режиму к. з. асинхронного двигуна прикладена напруга значно менша номінальної, а струми, що виникають в обмотці ротора, створюють обертове магнітне поле, спрямоване зустрічно магнітному полю статора. Тому основний магнітний потік Φ малий і ним можна знехтувати. Тоді із умови рівноваги МРС $F_0 = m_1 k_{o\sigma 1} W I_0$ статора та ротора отримаємо

$$m_1 k_{o\sigma 1} W_1 I_1 = m_2 k_{o\sigma 2} W_2 I_2$$

де m_1 і m_2 – число фаз;

I_1 і I_2 – струми в фазах статора та ротора відповідно.

Коефіцієнт трансформації струмів

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 k_{o\sigma 1} W_1}{m_2 k_{o\sigma 2} W_2} \quad (8.14)$$

Приведений струм ротора $I'_2 = I_1 = \frac{I_2}{k_i}$.

При визначенні наведеного значення активного опору фази обмотки ротора будемо виходити з того, що втрати в обмотці ротора повинні залишитися незмінними $m_2 I_2^2 r_2 = m_1 (I'_2)^2 r'_2$, звідти

$$r'_2 = r_2 \frac{m_2 I_2^2}{m_1 (I'_2)^2} = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 k_{o\sigma 1} W_1}{m_2 k_{o\sigma 2} W_2} \right)^2 = r_2 \frac{k_{o\sigma 1} W_1}{k_{o\sigma 2} W_2} \cdot \frac{m_1 k_{o\sigma 1} W_1}{m_2 k_{o\sigma 2} W_2} = r_2 k_e k_i = r_2 k, \quad (8.15)$$

де $k = k_e k_i$ – коефіцієнт трансформації асинхронного двигуна.

При визначенні наведеного значення індуктивного опору фази обмотки ротора будемо виходити з того, що фазний кут між ЕРС і струмом в роторі має залишитися незмінним: $\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x'_2}{r'_2}$,

звідки

$$x'_2 = \frac{r'_2 x_2}{r_2} = k_e k_i x_2 = k x_2. \quad (8.16)$$

За аналогією з трансформаторами параметри к.з. асинхронної машини (активний і індуктивний опір) будуть

$$r_{\kappa} = r_1 + r_2'; \quad x_{\kappa} = x_1 + x_2', \quad (8.17)$$

де r_{κ} і x_{κ} – активний і індуктивний опір к. з. фази двигуна.

Потужність, що споживає двигун при к. з. практично витрачається на покриття втрат в обмотки статора та ротора:

$$P_{\kappa} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 (I_2')^2 r_2' = m_1 I_1^2 r_{\kappa} \quad (8.18)$$

Слід мати на увазі, що на відміну від трансформаторів параметри к.з. асинхронної машини r_{κ} і x_{κ} не завжди постійні.

4 Асинхронний двигун при обертанні ротора

Якщо до статора двигуна підвести номінальну напругу, то його короткозамкнений або замкнутий фазний ротор обертатиметься вхолосту, якщо на валу двигуна немає навантаження.

Ротор обертається у бік обертання магнітного поля статора із швидкістю $n_2 < n_1$. Тому швидкість обертання магнітного поля статора відносно ротора дорівнює різниці швидкостей

$$n = n_1 - n_2 \quad (8.19)$$

Магнітний потік статора Φ_1 випереджаючи ротор зі швидкістю $n = n_1 - n_2$, індукує в роторі ЕРС і струми частотою f_2 , яку називають **частотою ковзання**.

Частота ковзання f_2 може бути визначена з виразу

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Помножимо чисельник і знаменник дробу на n_1

$$f_2 = \frac{pn_1(n_1 - n_2)}{60n_1} = sf_1. \quad (8.20)$$

Таким чином, частота ЕРС і струму, що індукується в роторі магнітним полем, що обертається, дорівнює частоті мережі, помноженої на ковзання.

У зв'язку із зміною частоти струму в роторі змінюються і всі залежні від частоти величини: ЕРС, індуктивний опір x_2 , струм.

Величина ЕРС в роторі, що обертається, E_{2s} складає

$$E_{2s} = 4,44K_{об2}f_2W_2\Phi_m.$$

Підставляємо в цю формулу значення. $f_2 = sf_1$

$$E_{2s} = 4,44K_{об2}W_2\Phi_m f_1 s.$$

Оскільки ЕРС нерухомого ротора складе

$$E_2 = 4,44K_{об2}W_2f_1\Phi_m,$$

то

$$E_{2s} = sE_2, \quad (8.21)$$

тобто ЕРС, індукована у роторі E_{2s} , що обертається, рівна ЕРС нерухомого ротора E_2 , помноженою на ковзання s .

Індуктивний опір ротора, що обертається,

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = s x_2, \quad (8.22)$$

тобто індуктивний опір ротора x_{2s} , що обертається, дорівнює індуктивному опору нерухомого ротора x_2 помноженому на ковзання s .

Активний опір ротора r_2 не залежить від частоти.

За законом Ома струм в роторі дорівнює

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}}.$$

Розділивши чисельник і знаменник правої частини рівняння на s , отримаємо

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}. \quad (8.23)$$

З рівняння (8.23) видно, що сила струму в роторі, що обертається, залежить від ковзання.

У формулі (8.23) режим асинхронного двигуна з ротором, що обертається, приведений до еквівалентного режиму при нерухомому роторі, оскільки величини E_2 та x_2 , що входять у формулу, залежні від ковзання, відповідають нерухомому ротору. При цьому все відбувається так, як ніби ротор нерухомий і до його затисків підведена ЕРС E_2 , а його опори дорівнюють $\frac{r_2}{s}$ і x_2 .

Оскільки обмотка ротора трифазна і по ній протікає трифазний струм частотою f_2 , в роторі утворюється магнітне поле, що обертається, яке обертається відносно ротора зі швидкістю $n = n_1 - n_2$ відповідній частоті струму ротора, тобто

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Крім того, сам ротор обертається в просторі із швидкістю n_2 . Тому швидкість магнітного поля ротора, що обертається, в просторі дорівнює сумі швидкостей $n + n_2$.

З формули $f_2 = \frac{pn}{60}$ можна написати $n = \frac{60f_2}{p}$.

Підставивши значення $f_2 = sf_1$, отримаємо

$$n = \frac{60f_1}{p}s = n_1s,$$

але оскільки $n_2 = n_1(1 - s)$, то

$$n + n_2 = n_2s + n_1(1 - s) = n_1$$

Отже, поле ротора обертається в просторі з такою ж швидкістю і в ту ж сторону, що і поле статора.

Так само, як і для трансформатора, для асинхронного двигуна можна накреслити діаграму його МРС, яка подібна до діаграми МРС трансформатора, з тією різницею, що вектори МРС в двигуні обертаються в просторі із швидкістю n_1 **рисунок 8.2**.

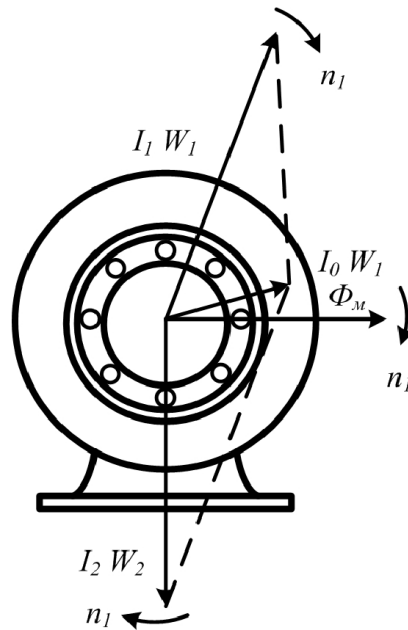


Рисунок 8.2 – Векторна діаграма м.д.с. асинхронного двигуна

Відповідно до рівняння МРС для трансформатора результуюча МРС асинхронного двигуна $I_0 \omega_1$ і створюваний нею результуючий магнітний потік Φ_m будуть постійними при будь-якому навантаженні і постійній напрузі і частоті мережі.

5 Магнітні потоки та рівняння ЕРС АД при навантаженні

Крім основного (головного) магнітного потоку Φ , який зв'язується з обмотками статора та ротора (**рисунок 8.3**), в асинхронній машині є ще два магнітних потоки, що називаються потоками розсіювання: магнітний потік розсіювання статора і магнітний потік розсіювання ротора $\Phi_{\sigma 2}$. Кожен з цих потоків розсіювання зв'язується лише з власною обмоткою і наводить в ній ЕРС розсіювання: у обмотці статора $E_{\sigma 1}$, в обмотці ротора $E_{\sigma 2}$.

Наявність магнітних потоків розсіювання обумовлює індуктивності розсіювання в обмотки статора $L_{\sigma 1}$ і в обмотці ротора $L_{\sigma 2}$, а отже, і індуктивні опори, що називаються індуктивними опорами розсіювання: $x_1 = \omega_1 L_{\sigma 1}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; $x_2 = \omega_2 L_{\sigma 2}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки ротора. Тут ω_1 і ω_2 – кутові частоти струмів в обмотки статора та ротора.

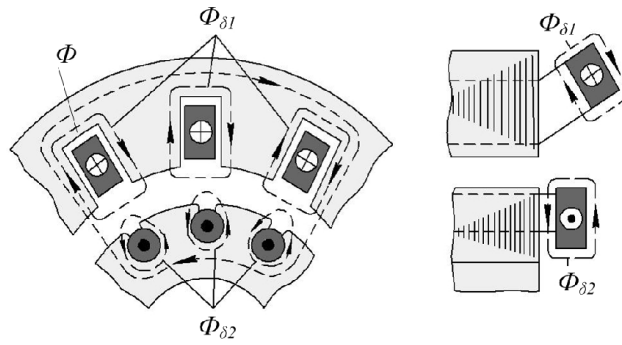


Рисунок 8.3 – Магнітні потоки розсіювання асинхронного двигуна

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора

$$x_1 = \frac{1,58 \cdot 10^{-8} f_1 l_{i1} W_1^2 \lambda_1}{pq_1}, \quad (8.24)$$

тут

$$\lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\delta 1} + \lambda_{\lambda 1}. \quad (8.25)$$

– коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора; λ_{n1} , $\lambda_{\delta 1}$, $\lambda_{\lambda 1}$ – коефіцієнти магнітної провідності пазів, диференціального і лобового розсіювання статора.

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора визначається виразами, залежать від типу обмотки ротора. Для короткозамкненої обмотки при нерухомому роторі

$$x_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} f_1 l_{i2} \lambda_2 \quad (8.26)$$

тут

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{\kappa 1} + \lambda_{\kappa 2} \quad (8.27)$$

– коефіцієнт магнітної провідності розсіювання коротко-замкнутої обмотки ротора; λ_{n2} , $\lambda_{\delta 2}$, $\lambda_{\kappa 1}$ і $\lambda_{\kappa 2}$ – коефіцієнти магнітної провідності розсіювання пазів, диференціального, короткозамикаючих кілець і скошу пазів короткозамкненого ротора.

Якщо ж ротор фазний і його обмотка виконана за типом обмотки статора, то індуктивний опір (Ом) розсіювання цієї обмотки $x_{2\phi}$ при нерухомому роторі ($s = 1$) визначається виразом, аналогічним (8.24)

$$x_2 = \frac{1,58 \cdot 10^{-8} f_1 l_{i2} W_2^2 \lambda_{2\phi}}{pq_2} \quad (8.28)$$

де

$$\lambda_{2\phi} = \lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{r2} \quad (8.29)$$

У виразах (8.24) і (8.28) розрахункова довжина осердь статора l_{i1} і ротора l_{i2} – в міліметрах.

Для розрахунку коефіцієнтів магнітної провідності користуються виразами, що приводяться в **керівництві** з розрахунку електричних машин.

6 Приведений асинхронний двигун

Проводити розрахунки для реального двигуна досить складно: між обмотками статора і ротора існує тільки магнітний зв'язок, різні за величиною ЕРС та струми в обмотках ротора і статора, різні частоти струмів та ЕРС і різна кількість фаз на статорі та роторі – все це практично унеможлиблює розрахунки необхідних величин машини.

Враховуючи це, реальний асинхронний двигун замінюється уявним, теоретичним, так званим, **приведеним**, параметри обмотки ротора якого перераховані, приведені, до обмотки статора (по аналогії зі приведеним трансформатором).

Приведемо вторинну обмотку асинхронної машини до первинної. Для цього можна уявити собі, що реальна вторинна обмотка замінюється приведеною, яка складається так же як і первинна обмотка, і має з нею однакові числа фаз і витків у фазі, а також однаковий обмотковий коефіцієнт основної гармоніки.

Приведені величини позначимо штрихами. Приведені напруги і струми вторинної обмотки повинні бути розраховані так, щоб енергетичні і основні електромагнітні співвідношення в машині не порушувались.

В загальному випадку необхідно мати на увазі, що пази ротора і статора асинхронної машини можуть бути скошені відносно друг друга. Зазвичай в асинхронних машинах скошені пази ротора, а пази

статора є прямими. Тому при приведенні обмотки ротора до обмотки статора необхідно уявити собі, що приведена обмотка ротора також має прямі пази. Таким чином, в приведеній машині основні гармоніки полів статора і ротора і їх результуючого поля будуть орієнтовані вдовж прямих пазів, в осьовому напрямку, тобто ці поля будуть скошені в тангенційному напрямку. Тому співвідношення між неприведеними і приведеними величинами доцільно встановити, виходячи із нескошеного магнітного поля. Для ясності допустимо, що вираз для обмотки коефіцієнтів статора $k_{o\sigma 1}$ і ротора $k_{o\sigma 2}$ має в якості співмножників тільки коефіцієнти скорочення і розподілення обмотки, а вплив скосу k_c вводимо в якості додаткового множника.

Нескошене магнітне поле основної гармоніки з потоком величини Φ індукуює в обмотці нерухомого ротора зі скошеними пазами ЕРС

$$E_2 = \pi\sqrt{2}f_1W_2k_{o\sigma 2}k_c\Phi. \quad (8.30)$$

А в приведеній обмотці ротора і в обмотці статора – однакові за величиною ЕРС

$$E'_2 = E_1 = \pi\sqrt{2}f_1W_1k_{o\sigma 2}\Phi. \quad (8.31)$$

Назвемо коефіцієнтом трансформації або коефіцієнтом приведення ЕРС і напруг k_u відношення

$$k_u = \frac{E'_2}{E_2} = \frac{E_1}{E_2}. \quad (8.32)$$

Згідно з виразами (8.18) і (8.19)

$$k_u = \frac{W_1k_{o\sigma 1}}{W_2k_{o\sigma 2}} \cdot \frac{1}{k_c}. \quad (8.33)$$

Приведена обмотка ротора з приведеним струмом I'_2 створює основну гармоніку, яка орієнтована в осьовому напрямку і має амплітуду.

$$F'_2 = \frac{m_1\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_1k_{o\sigma 1}}{p} I'_2.$$

Неприведена обмотка ротора створює основну гармоніку, яка орієнтована впродовж скошених пазів ротора і має амплітуду

$$F = {}_2 \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_2 k_{o\delta 2}}{p} I_2.$$

Цей вираз не має коефіцієнта k_c . Однак при розрахунку потокозчеплення взаємної індукції з обмоткою статора, що створюється н. с. F_2 , необхідно враховувати коефіцієнт скосу k_c так як н. с. F_2 і створює мий нею потік скошені відносно обмотки статора. Тому у відношенні статора ефективним є н. с. $k_c F_2$ і при приведенні повинна бути рівність.

$$F'_2 = k_c F_2.$$

Виходячи з даної нерівності і використовуючи написані раніше вирази для F'_2 і F_2 , знайдемо для коефіцієнта трансформації, або приведення струмів

$$k_1 = \frac{I_2}{I'_2}. \quad (8.34)$$

наступний вираз

$$k_1 = \frac{m_1 W_1 k_{o\delta 1}}{m_2 W_2 k_{o\delta 2}} \cdot \frac{1}{k_c}. \quad (8.35)$$

Для короткозамкненої обмотки в вигляді білячої клітки $m_2 = Z_2$, $W_2 = \frac{1}{2}$, $k_{o\delta 2} = 1$ та I_2 являє собою струм **стержня**.

Коефіцієнти трансформації k_u і k_1 при $m_1 \neq m_2$ не рівні, так як при заданому струмі I намагнічуючу дію і н. с. обмотки залежать від кількості фаз m і при приведенні вторинна обмотка з числом фаз m_2 замінюється обмоткою з числом фаз m_1 . На відміну від трансформатора для асинхронної машини у виразі для k_u і k_1 входять також **обмоткові** коефіцієнти.

За відсутності взаємного скосу пазів в нерівностях (8.33) і (8.35) необхідно **покласти** $k_c = 1$.

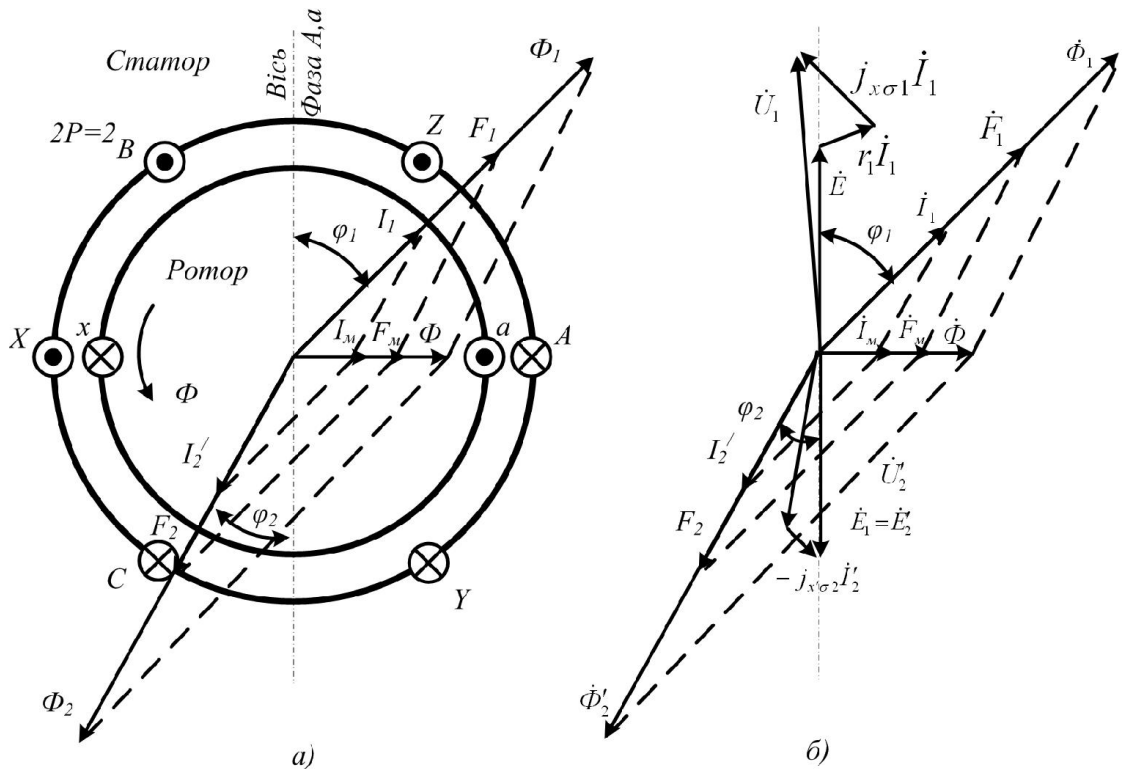


Рисунок 8.4 – Просторова (а) і тимчасова (б) векторні діаграми асинхронної машини з **загальмованим** ротором при співпаданні вісі фаз статора і ротора

Зазвичай скіс пазів відносно невеликий і коефіцієнт k_c близький до одиниці. Якщо, наприклад, скіс пазів ротора b_c дорівнює зубцевій поділці статора, то при кількостях пазів статора на полюс $\frac{Z_1}{2p} = 3$ і 6 відповідно має $\frac{b_c}{\tau} = \frac{1}{3}$ і $\frac{1}{6}$. При цьому отримаємо $k_c = 0,955$ і $0,989$. Тим паче при відносно невеликому скосі, помітним чином зростає електромагнітне розсіювання.

7 Векторно-потенціальна діаграма та схеми заміщення АД

Режим асинхронного двигуна з ротором, що обертається, приведений до еквівалентного режиму при нерухомому роторі, на підставі векторної діаграми МРС асинхронного двигуна можна на-

креслити векторну діаграму приведеного асинхронного двигуна при навантаженні **рисунок 8.5**.

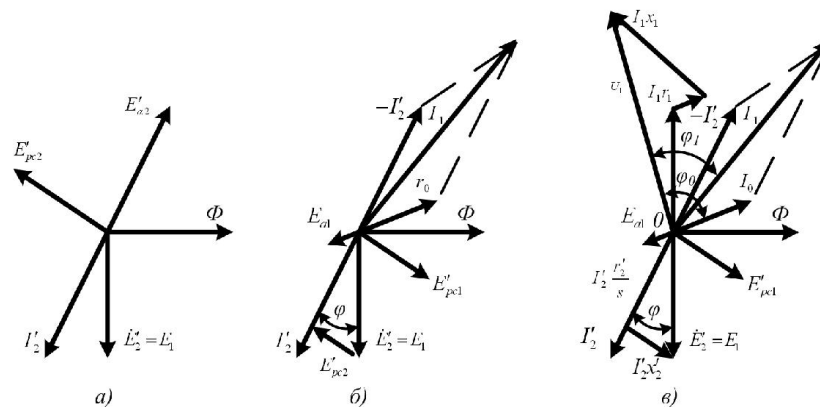


Рисунок 8.5 – Векторна діаграма асинхронного двигуна при навантаженні: а) – зворотні ЕРС в обмотці ротора, б) – зворотні ЕРС в двигуні, в) – повна діаграма

Оскільки обмотка ротора при роботі асинхронного двигуна замкнена накоротко, то напруга на затискачах ротора дорівнює нулю $U'_2 = 0$, ЕРС. E'_2 що індукуюється в роторі, повністю врівноважується зворотною ЕРС розсіяння E'_{pc2} ЕРС E'_{pc2} індукуюється магнітним потоком розсіяння Φ_{pc2} , що створюється струмом ротора I'_2 і зворотною ЕРС активного опору E'_{a2} , яка наводиться струмом ротора I'_2 в активному опорі обмотки ротора $\frac{r'_2}{s}$.

На **рисунку 8.5, а** зображені зворотні ЕРС у вторинній обмотці, а на **рисунку 8.5, б** — зворотні ЕРС в первинній обмотці і показано, що сума всіх ЕРС в обмотці ротора дорівнює нулю.

Векторна діаграма для первинної обмотки двигуна не відрізняється від відповідної векторної діаграми трансформатора.

Оскільки $E'_{pc2} = I'_2 x'_2$, а $E'_{a2} = I'_2 \frac{r'_2}{s}$, то на векторній діаграмі асинхронного двигуна вектор ЕРС обмотки ротора E'_2 зображують таким, що складається з двох складових, кожна з яких врівноважує відповідну зворотню ЕРС. Падіння напруги на активному опорі $I'_2 \frac{r'_2}{s}$

врівноважує зворотну ЕРС активного опору E'_{a2} , а падіння напруги на індуктивному опорі $I'_2 x'_2$ врівноважує ЕРС розсіяння E'_{pc2} .

$$\vec{E}'_2 + \vec{I}'_2 x'_2 + \vec{I}'_2 \frac{r'_2}{s} = 0 \quad (8.36)$$

Так само і в трансформаторі

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_1 x_1 + \vec{I}_1 r_1 \quad (8.37)$$

Повна векторна діаграма асинхронного двигуна представлена на **рисунку 8.5, в**.

На цій діаграмі кут φ_1 між векторами напруги U_1 і струму двигуна I_1 при навантаженні значно менше кута φ_0 між відповідними векторами при холостому ході, а отже $\cos \varphi_1$ значно вище $\cos \varphi_0$. Звідси витікає, що незавантажені асинхронні двигуни значно погіршують коефіцієнт потужності в мережі, тому потрібно уникати роботи асинхронних двигунів вхолосту або неповного їх завантаження.

На підставі векторної діаграми, рівнянь струму і ЕРС (8.36), (8.37) можна побудувати схему заміщення асинхронного двигуна аналогічно схемі заміщення трансформатора.

На схемі заміщення електромагнітний зв'язок між обмотками статора і ротора замінений електричним - введенням контура, що намагнічує, з опорами r_0 і x_0 (**рисунок 8.6**). Опір $\frac{r'_2}{s}$, величина якого залежить від ковзання, є єдиним змінним параметром в схемі, від якого залежить робота двигуна при зміні навантаження.

Наприклад, при холостому ході двигуна ковзання $s \approx 0$, а $\frac{r'_2}{s} \approx \infty$. Теж саме спостерігається при розімкненому роторі, тоді $I'_2 = 0$.

При роботі двигуна на навантаження величини струму I_1 і I'_2 залежать від навантаження. При збільшенні навантаження ковзання s збільшується, внаслідок чого $\frac{r'_2}{s}$ зменшується, струм I'_2 збільшується, що викликає відповідне збільшення струму статора I_1 .

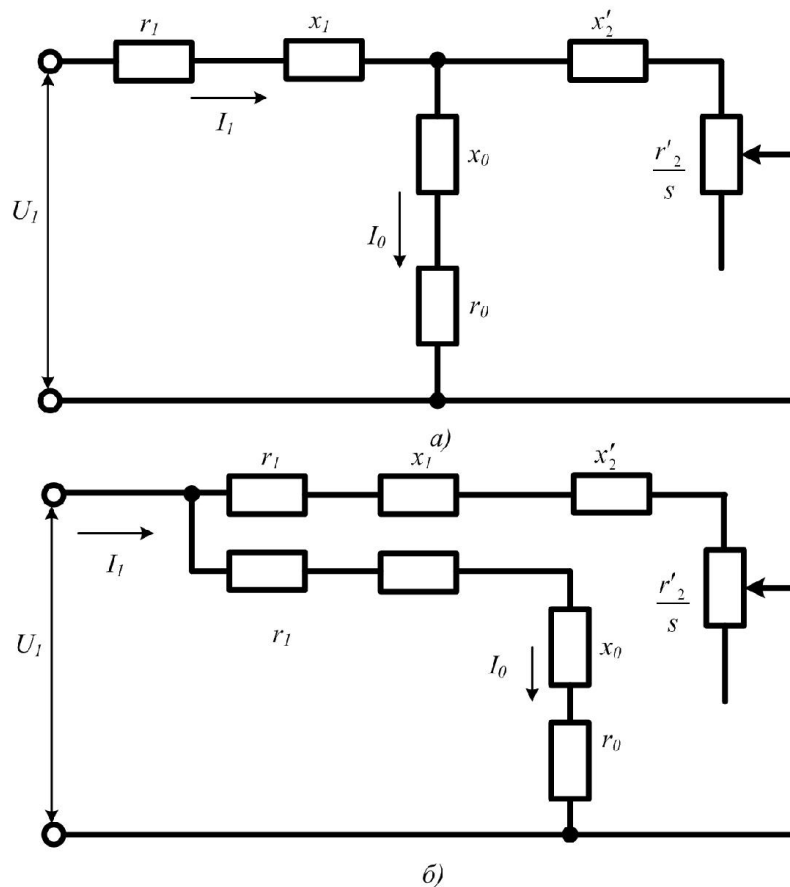


Рисунок 8.6 – Схеми заміщення асинхронних двигунів: а) – Т-подібна; б) – спрощена Г-подібна

Справжню схему заміщення **рисунок 8.6, а** називають Т-подібною, складається вона з трьох кіл і є складною. Її можна спростити шляхом винесення контура, що намагнічує, на затискачі двигуна. Тоді виходить простіша, Г-подібна схема заміщення, що складається лише з двох кіл: що намагнічується із струмом I_0 робочого із струмом I'_2 . Обидва кола незалежні одне від одного, оскільки вони обидва включені паралельно на напругу мережі U_1 **рисунок 8.6, б**.

Щоб при винесенні контура, що намагнічує, на затискачі двигуна величина струму I_0 не змінилася, в контур, що намагнічує, включають послідовно опори r_1 і x_1 . При цьому дозволяється незначна похибка, яка істотного впливу на результати дослідження двигуна не робить.

На підставі спрощеної схеми заміщення можна визначити величину струму в робочому контурі двигуна

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (8.38)$$

Контрольні запитання

1. Напишіть рівняння ЕРС обмотки нерухомого ротора асинхронного двигуна, поясніть яка частота ЕРС і струмів у цьому рівнянні ?
2. Чому і як відрізняється частота струмів і ЕРС обмотки ротора, що обертається, від частоти при $s = 1$?
3. Як залежать ЕРС та індуктивний опір обмотки ротора при обертанні від частоти f_2 та ковзання?
4. Навіщо в теорію асинхронних двигунів уведено поняття двох коефіцієнтів трансформації, чи можуть вони будь рівними?
5. Напишіть рівняння струмів асинхронного двигуна, поясніть які величини в нього входять, чому це рівняння не відрізняється від аналогічного рівняння трансформатора?
6. Чому виникає необхідність замінювати реальний асинхронний двигун зведеним?
7. Які величини залишаються без зміни при зведенні параметрів обмотки ротора до обмотки статора?
8. Якими формулами визначають зведені величини обмотки ротора?
9. Чим відрізняється математична модель асинхронного двигуна (система рівнянь, що описує його роботу) від аналогічної трансформатора?
10. Що є основою для побудови векторно-потенційної діаграми асинхронного двигуна?
11. Поясніть послідовність побудови векторно-потенціальної діаграми асинхронного двигуна.
12. Чому на векторно-потенціальній діаграмі вектор магнітного потоку відстає від намагнічувального струму?
13. Як визначається кут між ЕРС та струмом зведеної обмотки ротора асинхронного двигуна?
14. Що уявляє собою Т-подібна схема заміщення АД і чим вона відрізняється від аналогічної схеми трансформатора?
15. Чому не можна спростити схему заміщення асинхронного двигуна так, як спрощується схема заміщення трансформатора?
16. Як можна визначити струм ротора асинхронного двигуна, користуючись Г-подібною схемою заміщення?