А. О. Бояркін, Е. А. Галіцин, О. М. Косиченко

АСИНХРОННІ МАШИНИ

2013

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

А. О. Бояркін, Е. А. Галіцин, О. М. Косиченко

АСИНХРОННІ МАШИНИ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2013

УДК 621.313.33(076.5)
Б86

Рецензенти: проф. Ю. Ф. Свергун,
канд. техн. наук, доц. М. В. Чернявська

Бояркін, А. О.

Б86 Асинхронні машини [Текст] : навч. посіб. / А. О. Бояркін, Е. А. Галіцин, О. М. Косиченко. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2013. – 74 с

Наведено відомості про конструкцію, принцип роботи і основні характеристики асинхронних машин, що працюють у режимі двигуна й генератора. Описано методику виконання лабораторних робіт, і подано запитання для самостійної роботи студентів, таблиці й графіки, необхідні для практичних розрахунків.

Для студентів спеціальності «Нетрадиційні джерела енергії».

Іл. 38. Табл. 21. Бібліогр.:7 назв

УДК 621.313.33(076.5)

© Бояркін А. О., Галіцин Е. А.,
Косиченко О. М., 2013
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2013

1. АСИНХРОННІ МАШИНИ

1.1. Будова асинхронних машин

Електричні машини перетворюють механічну енергію на електричну (генератори) або ж електричну енергію – на механічну (двигуни). У конструкції електричних машин реалізуються закони електромагнітної індукції й Ампера, правило Ленца.

Магнітна система асинхронної машини (АМ) складається з двох осердь: зовнішнього нерухомого, що має форму порожнього циліндра (рис. 1.1, а, д), і внутрішнього обертового циліндра (рис. 1.1, а, б, д, е). Їх збирають з листів електротехнічної сталі (рис. 1.1, в, г, д). Ці листи для зменшення втрат на вихрові струми

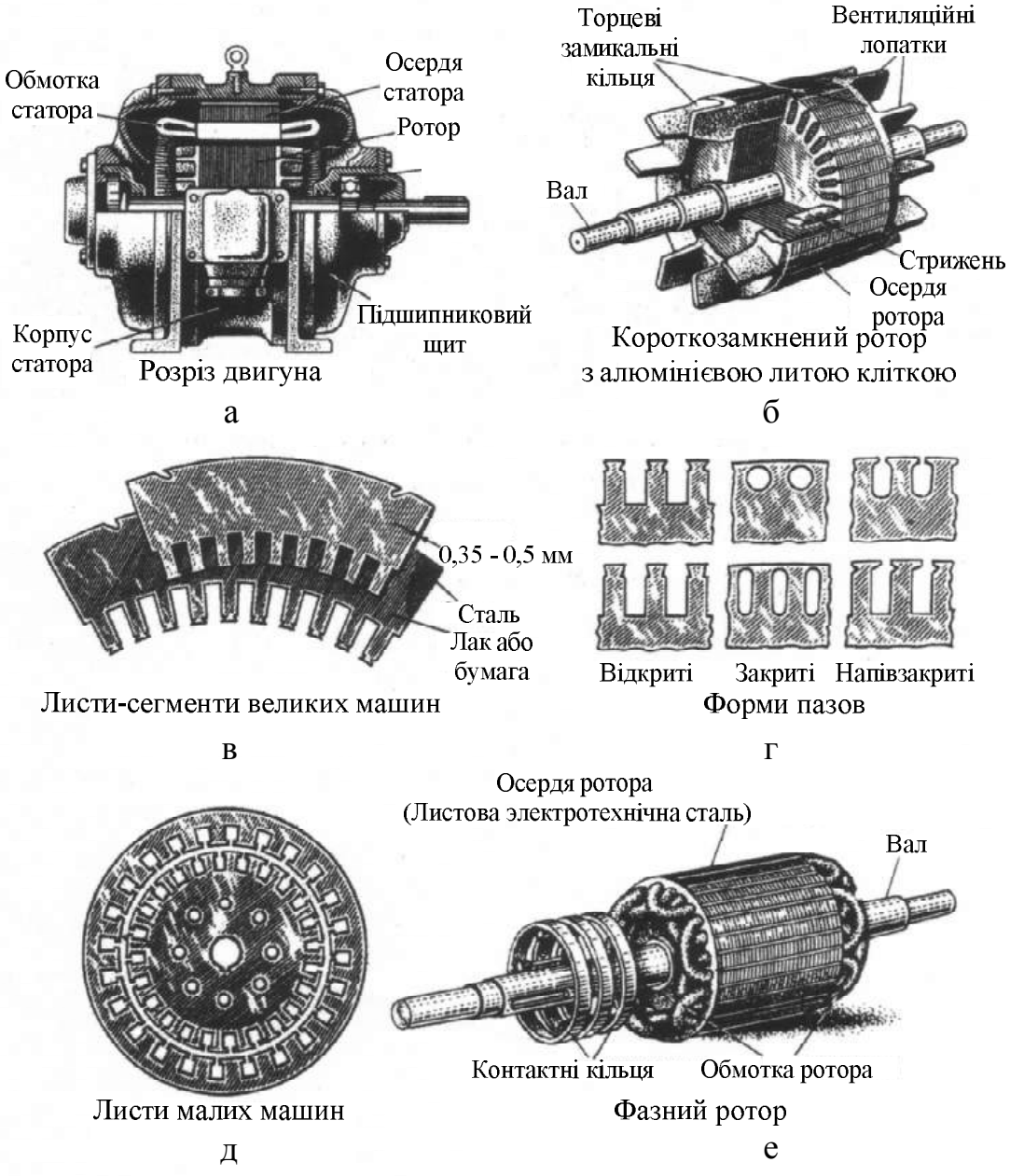


Рис. 1.1

ізолюються один від одного шаром лаку. Нерухому частину АМ називають статором, а обертову – ротором (див. рис. 1.1, а, б, е). У пазах із внутрішньої сторони статора викладено трифазну обмотку, з'єднану за схемою «зірка» або «трикутник» (див. рис. 1.1, а). У пазах ротора розміщено другу обмотку (див. рис. 1.1, а, б, е). Осердя статора розміщено в корпусі (див. рис. 1.1, а), який є зовнішньою частиною АМ, а осердя ротора закріплено на валу (див. рис. 1.1, а, б, е).

Асинхронна машина є оборотною, тобто вона може працювати як у режимі двигуна, так і в режимі генератора.

Ротори АМ виготовляють двох видів: короткозамкнені (див. рис. 1.1, б) і з контактними кільцями (рис. 1.1, е). Перші – простіші за будовою, їх застосовують частіше. Обмотка такого ротора являє собою циліндричну клітку, так зване «біляче колесо», і складається з мідних шин або алюмінієвих стрижнів, замкнених накоротко на торцях двома кільцями (див. рис. 1.1, б і 1.2). Ротор з контактними кільцями, який називають також фазним ротором, має обмотку, яку виконано з ізольованого проводу (див. рис. 1.1, е), у більшості випадків трифазну, з'єднану за схемою «зірка». Вільні кінці цієї обмотки підведено до контактних кілець на валу ротора. Контактні кільця ізольовано одне від одного й від вала. По кільцях ковзають щітки, через які обмотку ротора з'єднано із трифазним реостатом.

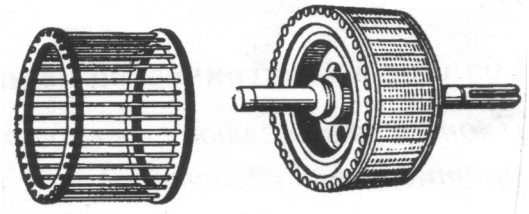


Рис. 1.2

1.2. Обертове поле статора

На рис. 1.3 схематично показано багатополюсну обмотку, що складається з дев'яти котушок. На кожну фазу припадає по три котушки. На схемі (рис.1.3) показано з'єднання тільки фази А, причому з'єднання на задній стороні осердя позначено пунктиром, а в кожній котушці показано тільки один виток.

Асинхронний двигун (АД) для трифазної мережі є симетричним навантаженням. Отже, струми у фазах АД є однаковими, але їх зміщено один відносно одного на третину періоду (рис. 1.4):

$$i_A = I_m \sin \omega t;$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \qquad (1.1)$$

$$i_C = I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

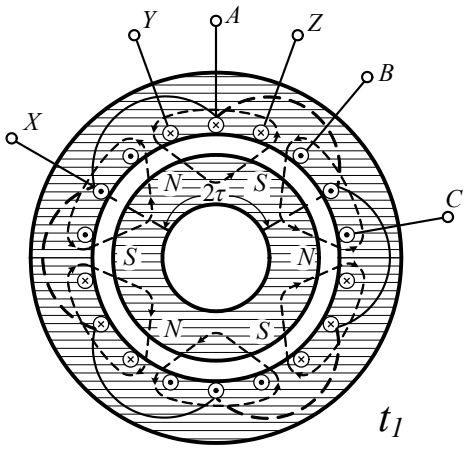


Рис. 1.3

У деякий момент часу t_1 (рис. 1.4), коли струм у фазі А має амплітудне значення, струми в провідниках будуть мати напрямок, показаний на рис. 1.3, відповідно до чого й розподіляється і магнітне поле АД. Силові лінії в трьох місцях входять

у ротор і у трьох місцях виходять із нього, утворюючи, таким чином, три пари полюсів *(p = 3)*.

На рис. 1.5 показано три моменти (t_2, t_3, t_4) положення поля залежно від змінення миттєвих значень струмів трифазної системи (див. рис. 1.4).

У загальному випадку, якщо поле має p пар полюсів, то його швидкість обертання буде

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f}{p}. \qquad (1.2)$$

Синхронна швидкість обертання поля в просторі Ω_1 є прямо пропорційною до кутової частоти змінного струму $\omega = 2\pi f$ й обернено пропорційною до кількості пар полюсів.

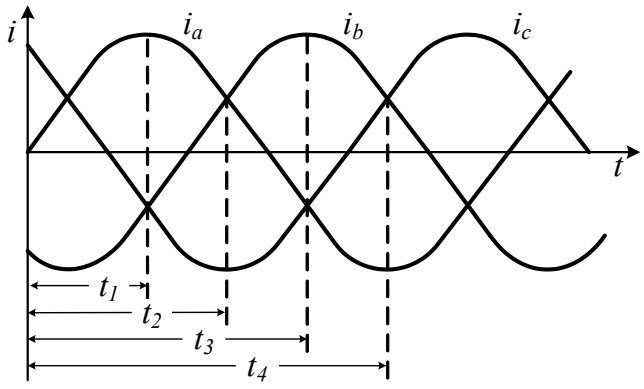


Рис. 1.4

Напрямок обертання магнітного поля АД визначається послідовністю фаз (A, B, C) трифазної системи, що живить обмотку статора.

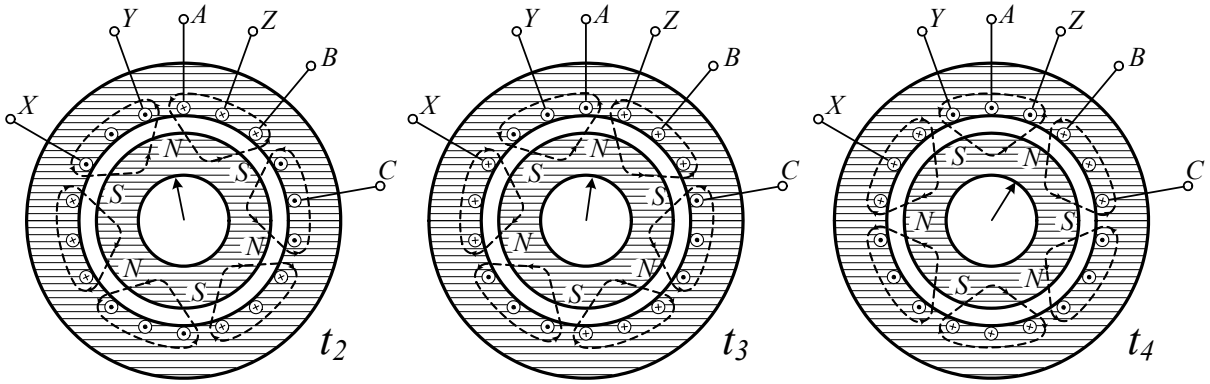


Рис. 1.5

1.3. Будова обмоток статора і ротора

Обмотку статора має бути складено таким чином, щоб можна було повніше використати окружність статора, одержати найбільший магнітний потік Φ_{1m} при найменшій магніторушійній силі й досягти, якщо можливо, синусоїдального розподілу магнітного поля вздовж кола статора. Щоб виконати першу вимогу, доцільно кожну зі сторін котушок обмотки розподілити в декількох пазах. На рис. 1.6 зображено трифазну двополюсну обмотку, причому сторони котушок кожної фази розташовано в трьох пазах. Таким чином, кожна котушка поділяється на секції. Котушки обмотки складаються із трьох секцій, кожна секція містить кілька витків. На рис. 1.7 показано розгорнуту на пло-

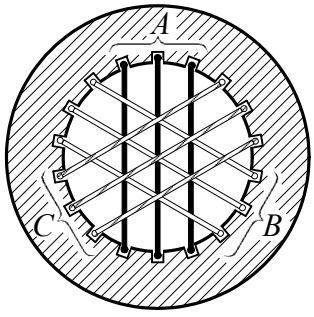


Рис. 1.6

щині котушкову групу, що складається із трьох секцій, причому кожна секція має три витки.

При відстані між осями полюсів (що має назву полюсного поділу)

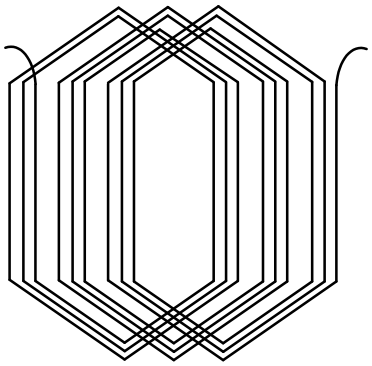


Рис. 1.7

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \tag{1.3}$$

де D – діаметр ротора, кількості пазів на колі статора z на один полюсний поділ припадає така кількість пазів:

$$Q = \frac{z}{2p}. \tag{1.4}$$

Кожен полюсний поділ повинен містити пази всіх трьох фаз обмотки, отже, на полюс і фазу трифазної обмотки припадає така кількість пазів:

$$q = \frac{Q}{3} = \frac{z}{6p}.$$

При виготовленні обмотки головки котушок на торцевих сторонах статора слід відігнути вбік, інакше не можна буде вставити або вийняти ротор. Ці відігнуті головки котушок утворюють лобові з'єднання. Провідники лобових з'єднань у робочому процесі АД не беруть участі а силові лінії, що замикаються навколо них, утворюють значну частину потоку розсіювання Тому бажано, щоб лобові з'єднання обмоток були якомога коротшими.

Секції обмотки вставляються в пази (див. рис. 1.1, в, г), причому якщо в кожному пазу розташовано тільки одну сторону однієї секції, то обмотку називають одношаровою, якщо ж у кожному пазу в два шари вставлено сторони двох секцій, то двошаровою.

При розрахунку обмотки відстань між сторонами витка котушки вимірюється в частках полюсного поділу, що є шагом обмотки. Обмотку закріплюють в пазах з допомогою клинів.

Обмотка ротора виконують короткозамкненою або фазною з контактними кільцями.

1.4. Принцип дії асинхронного двигуна

Відповідно до закону електромагнітної індукції обертове магнітне поле індукує в обмотці ротора ЕРС взаємної індукції. Коло обмотки ротора замкнено. Відповідно до закону Ампера на провідники зі струмом обмотки ротора, що знаходяться в обертовому магнітному полі, діють сили, які створюють електромагнітний момент. Під дією електромагнітного моменту ротор починає обертатися. Напрямок обертання визначається за правилом Ленца, тобто ротор рухається за по-

лем і виконує механічну роботу. Швидкість обертання ротора Ω_2 менша за швидкість обертання поля, що й визначає назву двигуна – асинхронний, тобто ротор несинхронно обертається з полем. Відносна швидкість обертання поля дорівнює різниці $\Omega_1 - \Omega_2$. Характерною величиною, що визначає робочі умови АД, є ковзання

$$S = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}, \tag{1.5}$$

значення якого є додатним при роботі АМ як двигуна (0 < S < 1) і від`ємним при генераторному режимі (-∞ < S < 0).

Таким чином, вираз (1.5) дає змогу визначити швидкість обертання ротора при заданих частоті живильної мережі, кількості пар полюсів і ковзанні:

$$\Omega_2 = \frac{2\pi f}{p}(1 - S). \tag{1.6}$$

1.5. Електрорушійні сили статора і ротора

При нерухомому роторі магнітний потік Φ_{1_m} створюється магніторушійною силою (МРС) статора:

$$\dot{F}_{1_н} = m_1 \dot{I}_{1_0} w_1 k_{об_1}, \tag{1.7}$$

де m_1 – кількість фаз обмотки статора;

$\dot{I}_{1_0}$ – комплекс діючого значення струму фази обмотки статора;

w_1 – кількість витків фази обмотки статора;

$k_{об_1}$ – обмотковий коефіцієнт, при якому враховується зсув фаз між електрорушійними силами окремих витків котушки.

Величина Φ_{1_m} визначається МРС $\dot{F}_{1_н}$ і магнітним опором магнітного кола АД.

Відповідно до закону електромагнітної індукції обертове магнітне поле індукує у фазі обмотки статора ЕРС самоіндукції, діюче значення якої обчислюється за формулою

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_{1_m} k_{об_1}, \tag{1.8}$$

де f – частота струму трифазної живильної мережі.

При нерухомому роторі Φ_{1_m} індукує у фазі обмотки ротора ЕРС взаємної індукції із частотою

$$f_2 = \frac{p\Omega_1}{2\pi} = f. \tag{1.9}$$

Таким чином, діюче значення ЕРС обмотки нерухомого ротора обчислюється за формулою

$$E_{2_н} = 4{,}44 f w_2 \Phi_{1_m} k_{об_2}, \tag{1.10}$$

де w_2, $k_{об_2}$ – кількість витків і обмотковий коефіцієнт ротора.

Однак коли сам ротор обертається слідом за полем, тоді швидкість обертання поля відносно ротора визначається тільки різницею швидкостей обертання поля Ω_1 і Ω_2. Отже, поле робить відносно ротора $\Omega_1 - \Omega_2$ обертів, рад/с, і частота ЕРС ротора зменшується до значення

$$f_2 = \frac{p(\Omega_1 - \Omega_2)}{2\pi}. \tag{1.11}$$

Цю частоту ЕРС ротора легко виразити через частоту мережі, оскільки

$$f_2 = \frac{p\Omega_1}{2\pi} \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}, \tag{1.12}$$

або

$$f_2 = fS. \tag{1.13}$$

Отже, частота ЕРС ротора дорівнює добутку частоти мережі (статора) і ковзання.

Таким чином, ЕРС обертового ротора буде такою:

$$E_2 = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_{1_m} k_{об_2}, \tag{1.14}$$

або

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_{1_m} k_{об_2} S = E_{2_н} S. \tag{1.15}$$

1.6. Струм ротора

Струм ротора I_2 створює магнітний потік Φ_2, більша частина якого замикається на статорі, а частина силових ліній замикається поза статором, утворюючи потік розсіювання ротора Φ_{p_2}.

Величина Φ_2 визначається МРС ротора:

$$F_2 = m_2 k_{об_2} w_2 I_2 \tag{1.16}$$

і магнітним опором магнітного кола АД.

Магнітний потік розсіювання Φ_{p_2} значну частину свого шляху проходить по повітрю, що дає змогу вважати його прямо пропорційним за величиною і таким, що збігається за фазою зі струмом I_2. Магнітний потік розсіювання визначає індуктивність фази обмотки ротора. Отже, опір ротора складається з активного опору R_2 й індуктивного $x_2 = 2\pi f_2 L_2$:

$$z_2 = \sqrt{R_2{}^2 + x_2{}^2}. \tag{1.17}$$

Підставивши $2\pi f_2 = S2\pi f = \omega S$ в (1.17), де ω – кутова частота мережі, одержимо

$$z_2 = \sqrt{R_2{}^2 + \left(Sx_{2н}\right)^2}\,, \tag{1.18}$$

де $x_{2_н}$ – індуктивний опір фази обмотки нерухомого ротора.

Можемо вважати R_2 і L_2 незалежними від ковзання. Отже, повний опір ротора z_2 збільшується зі зростанням ковзання S завдяки зростанню індуктивного опору $S\omega L_2$. Тому струм в обмотці ротора зі збільшенням ковзання збільшується не так, як ЕРС ротора:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + \left(Sx_{2_н}\right)^2}} = \frac{\mathrm{E}_{2_н}}{\sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{R}_2}{\mathrm{S}}\right)^2 + x_{2_н}^2}}. \tag{1.19}$$

1.7. Рівняння електричної рівноваги асинхронного двигуна

Частина силових ліній обмотки статора замикається навколо ротора, утворюючи потік розсіювання статора Φ_{p_1}. Магнітний потік розсіювання значну частину шляху проходить по повітрю, що дає змогу вважати його прямо пропорційним за величиною і таким, що збігається за фазою зі струмом $\dot{I}_1$.

Потік розсіювання обмотки статора АД складається з потоку розсіювання, лінії якого замикаються поперек паза $\Phi_п$, потоку розсіювання $\Phi_л$, лінії якого замикаються навколо лобових частин обмотки й потоку розсіювання $\Phi_к$, лінії якого замикаються між коронками зубців статора (рис. 1.8).

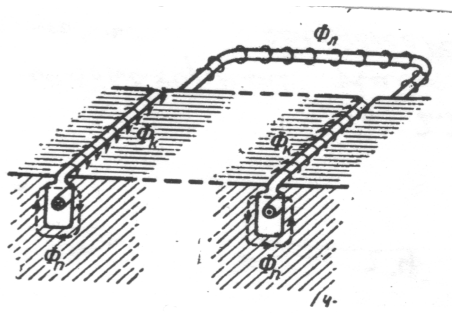


Рис. 1.8

Струм $\dot{I}_1$, крім струму $\dot{I}_{1_0}$, містить складову, що компенсує перетворення електричної енергії в механічну за умови наявності моменту опору, прикладеному до вала АД.

Потік розсіювання Φ_{p_1} індукує у фазі обмотки статора ЕРС розсіювання

$$\dot{E}_{p1} = \mathrm{j}\omega L_1 \dot{I}_1, \tag{1.20}$$

де L_1 – індуктивність розсіювання фази обмотки статора.

Фаза обмотки статора характеризується активним опором R_1.

Відповідно до другого закону Кірхгофа рівняння напруг для замкнутого контуру фази обмотки статора в комплексній формі запишеться в такому вигляді:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1\left(R_1 + jx_1\right) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{z}_1, \tag{1.21}$$

де $\dot{U}_1$ – комплекс діючого значення фазної напруги живильної мережі.

Вираз (1.21) називають рівнянням електричної рівноваги.

У першому наближенні можна не враховувати спадання напруги $\dot{I}_1 \underline{z}_1$ і взяти, що $U_1 \approx E_1$, а оскільки відповідно до рівняння (1.8) $E_1 \approx const\Phi_{1\text{m}}$

$$U_1 \approx const\Phi_{1_m}. \tag{1.22}$$

Напруга U_1 – величина постійна, отже, магнітний потік обертового поля можна приблизно вважати також постійним і незалежним від навантаження двигуна.

Магнітний потік Φ_{1_m} створюється спільною дією МРС статора й ротора. Магніторушійна сила трьох фаз обмотки статора

$$\dot{F}_1 = m_1 k_{об_1} \dot{I}_1 w_1, \tag{1.23}$$

де m_1 – число фаз обмотки статора.

При обертанні ротора частота струму статора не змінюється, унаслідок цього швидкість обертання МРС статора відносно провідника статора дорівнюватиме Ω_1.

Фазний струм ротора I_2 створює МРС обмотки ротора, що обертається відносно самого ротора. Струм ротора має частоту f_2, отже, швидкість обертання МРС ротора відносно самого ротора

$$\Omega'_2 = \frac{2\pi f_2}{p}, \tag{1.24}$$

але сам ротор обертається зі швидкістю Ω_2, отже, МРС ротора обертається в просторі зі швидкістю $\Omega'_2 + \Omega_2$.

Замінюючи в рівнянні (1.24) частоту ротора

$$f_2 = Sf = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2\pi},$$

одержимо, що $\Omega'_2 + \Omega_2 = \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_2 = \Omega_1$, тобто поле ротора обертається синхронно з полем статора, випереджаючи при цьому ротор, що обертається асинхронно.

Це дає право складати МРС ротора й статора геометрично:

$$m_1 k_{об_1} w_1 \dot{I}_1 + m_2 k_{об_2} w_2 \dot{I}_2 = m_1 k_{об_1} w_1 \dot{I}_{1_0}. \tag{1.25}$$

Розділивши ліву й праву частини рівняння (1.25) на ($m_1 k_{об_1} w_1$), одержимо рівняння струмів:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{m_2 k_{об_2} w_2}{m_1 k_{об_1} w_1} = \dot{I}_{1_0},$$

або

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1_0} + (-\dot{I}'_2). \tag{1.26}$$

Тут ($-\dot{I}_2'$) – зведений струм ротора, тобто та частина струму статора, яка врівноважує розмагнічувальну дію струму ротора.

1.8. Процес перетворення електричної енергії в асинхронному двигуні

Асинхронний двигун споживає з мережі активну потужність

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 . \tag{1.27}$$

Частина цієї потужності втрачається у вигляді електричних втрат в активному опорі обмотки статора:

$$P_{ел_1} = m_1 I_1^2 R_1 , \tag{1.28}$$

а інша частина – у вигляді магнітних втрат у сердечнику статора $P_{м_1}$.

Частина потужності, яка залишилася,

$$P_{ем} = P_1 - \left(P_{ел_1} + P_{м_1}\right) \tag{1.29}$$

являє собою електромагнітну потужність, що передається з допомогою магнітного поля зі статора на ротор.

Частина цієї потужності втрачається у вигляді електричних втрат в активному опорі обмотки ротора R_2:

$$P_{ел_2} = m_2 I_2^2 R_2 . \tag{1.30}$$

Інша частина потужності $P_{ем}$ перетворюється на механічну потужність $P_{мх}$, що розвиває ротор:

$$P_{мх} = P_{ем} - P_{ел_2} . \tag{1.31}$$

Частина механічної потужності $P_{мх}$ втрачається всередині саме АД у вигляді механічних втрат $P_{мех}$ (на вентиляцію, тертя в підшипниках і на щітках АД з фазним ротором), магнітних втрат у осерді ротора $P_{м_2}$ і додаткових втрат $P_д$. Останні спричинено в основному зубчастою будовою осердь статора й ротора.

Корисна механічна потужність на валу АД

$$P_2 = P_{мх} - P_{мех} - P_д . \tag{1.32}$$

Сума втрат АД

$$\Delta P = P_{ем} + P_{м_1} + P_{ел_2} + P_{мех} + P_д , \tag{1.33}$$

тоді

$$P_2 = P_1 - \Delta P . \tag{1.34}$$

ККД асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} . \tag{1.35}$$

Із системи електропостачання АД споживає реактивну потужність

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin\varphi_1 . \tag{1.36}$$

Реактивна потужність витрачається на створення:

– полів розсіяння кола статора

$$q_1 = m_1 I_1^2 x_1; \tag{1.37}$$

– основного магнітного поля $Q_м$;

– полів розсіяння ротора:

$$q_2 = m_1 I_2^2 x_2. \tag{1.38}$$

1.9. Електромагнітний момент

В усталеному режимі роботи АД, тобто $\Omega_2 = const$, за умови рівності моментів маємо

$$M = M_0 + M_2, \tag{1.39}$$

де M – електромагнітний момент, що розвиває двигун;

M_0 – момент холостого ходу;

M_2 – корисний гальмівний або навантажувальний момент.

Момент M_2 задається приводом, на який працює двигун. Відповідна йому корисна потужність P_2, що розвиває АД, визначається за формулою

$$P_2 = M_2 \Omega_2. \tag{1.40}$$

Моменту холостого ходу відповідає потужність

$$P_0 = P_{мех} + P_Д = M_0 \Omega_2. \tag{1.41}$$

З перетворення електричної енергії в АД випливає, що

$$P_{мх} = P_2 + \left(P_{мех} + P_Д\right) = M\Omega_2. \tag{1.42}$$

Електромагнітний момент АД утвориться внаслідок взаємодії обертового магнітного поля Φ_{1_m} і струму в роторі I_2, але поле обертається зі швидкістю $\Omega_1 = \dfrac{2\pi f}{p}$. Отже, електромагнітна потужність, що розвивається двигуном,

$$P_{ем} = M\Omega_1 = M\,\frac{2\pi f}{p}.$$

З іншого боку,

$$P_{ем} = P_{мх} + P_{м_2} = P_2 + \left(P_{мех} + P_{ел_2} + P_Д\right).$$

Отже,

$$P_{ем} - P_{мх} = M\left(\Omega_1 - \Omega_2\right) = P_{ел_2},$$

або

$$M\Omega_1 \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = P_{ем} S = P_{ел_2},$$

звідки

$$P_{ем} = \frac{P_{ел_2}}{\mathrm{S}}.$$

Таким чином,

$$M = \frac{P_{ел_2}}{\Omega_1 S} = \frac{m_1 I_2^2 \frac{R_2}{S}}{\Omega_1}. \qquad (1.43)$$

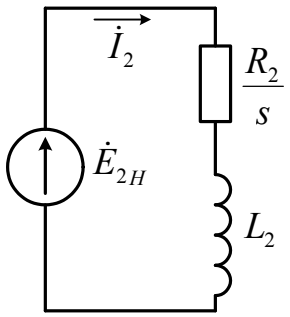


Рис. 1.9

З рівняння (1.19) випливає, що струм I_2 в обертовому роторі можна визначити, виходячи з ЕРС нерухомого ротора при частоті f, однак, у такому випадку замість діючого активного опору фази обмотки ротора R_2 слід вважати активним також опір R_2/S. Отже, схема заміщення обертового ротора буде мати вигляд, зображений на рис. 1.9.

Для будування векторної діаграми (рис. 1.10) за вихідний вектор зручно взяти вектор магнітного потоку Φ_{1_m} обертового поля. У векторній діаграмі ЕРС $\dot{E}_{2_н}$ ротора відстає за фазою від Φ_{1_m} на кут $\pi/2$. Струм ротора $\dot{I}_2$ відстає від $\dot{E}_{2_н}$ на кут

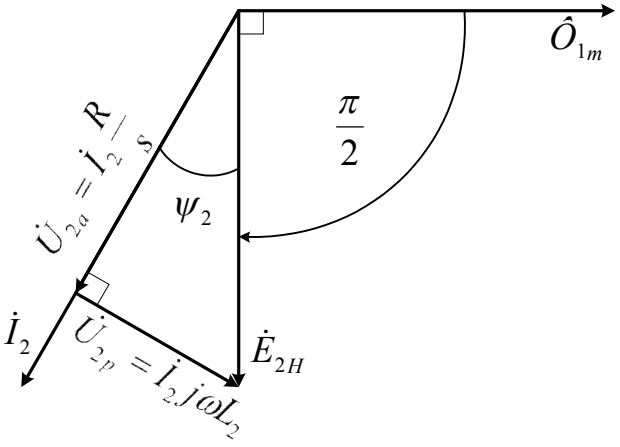


Рис. 1.10

$$\Psi_2 = arctg \frac{\omega L_2}{\frac{R_2}{S}}. \qquad (1.44)$$

Вектор активного спаду напруги $\dot{U}_{2a} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{S}$ збігається за фазою з $\dot{I}_2$. Вектор $\dot{U}_{21} = \dot{I}_2 j\omega L_2$ випереджає $\dot{I}_2$ на кут $\pi/2$.

З векторної діаграми (див. рис. 1.10) випливає, що $-\dot{I}_2 \frac{R_2}{S} = \dot{E}_{2H} \cos \Psi_2$, отже, вираз (1.43) запишемо в такому вигляді:

$$M = \frac{m_1 E_{2н} I_2 \cos \Psi_2}{\Omega_1}. \qquad (1.45)$$

Якщо в (1.45) підставити (1.15), (1.19) і (1.44), то одержимо момент

$$M = \frac{m_1 E_{2_н}^2 \dfrac{R_2}{S}}{\Omega_1\left[\left(\dfrac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2_н}^2\right]} = \frac{pm_1 E_{2_н}^2 \dfrac{R_2}{S}}{2\pi f\left[\left(\dfrac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2_н}^2\right]}. \qquad (1.46)$$

1.10. Схема заміщення асинхронного двигуна

Для обґрунтування схеми заміщення звернемося до рівнянь АД (1.19), (1.21) і (1.26).

Струм ротора $\dot{I}_2$ пов'язано зі зведеним струмом $\dot{I}'_2$ співвідношенням

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{1}{k_I},$$

звідки

$$\dot{I}_2 = -k_I \dot{I}'_2, \qquad (1.47)$$

де k_I – коефіцієнт трансформації струмів АД.

Зведена ЕРС $\dot{E}'_{2_н}$ пов'язана з ЕРС нерухомого ротора співвідношенням

$$\dot{E}'_{2_н} = \dot{E}_{2_н} k_E, \qquad (1.48)$$

де k_E – коефіцієнт трансформації напруг АД.

Зведену ЕРС можна виразити через параметри ротора

$$\dot{E}'_{2_н} = \dot{I}_2 \underline{z}_2 k_E, \qquad (1.49)$$

де $\underline{z}_2 = R_2 + j\omega L_2$ – комплекс опору фази обмотки ротора.

Підставляючи в (1.49) замість $\dot{I}_2$ зведений струм $\dot{I}'_2$, одержимо

$$\dot{E}'_{2_н} = \dot{I}'_2 \underline{z}_2 k_E k_I. \qquad (1.50)$$

Величину $k_E k_I$ називають коефіцієнтом трансформації АД.

Опір фази обмотки ротора, зведений до кількості фаз, витків і обмоткового коефіцієнта статора, визначається співвідношенням

$$\underline{z}'_2 = \underline{z}_2 k_E k_I. \qquad (1.51)$$

Це спрощує вираз (1.50):

$$\dot{E}'_{2_н} = \dot{I}'_2 \underline{z}'_2. \qquad (1.52)$$

Підставляючи цей вираз у рівняння напруг фази обмотки статора, одержимо

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \underline{z}_1 - \dot{I}'_2 \underline{z}'_2, \qquad (1.53)$$

оскільки $\dot{E}_1 = \dot{E}'_{2_н}$.

З іншого боку, $\dot{E}'_{2_н}$ є пропорційною намагнічувальному струму $\dot{I}_{1_0}$, оскільки цей струм створює магнітний потік Φ_{1_m}, що індукує у фазі обмотки статора ЕРС $\dot{E}_1$, а у фазі обмотки ротора – $\dot{E}_2$. Отже, для заміни магнітного зв'язку ста-

тора й ротора гальванічним в схемі заміщення необхідно ввести вітку, де враховано властивості магнітного кола АД.

Вітка, де враховано властивості магнітного кола, містить активний опір R_0, що визначається втратами в сталі статора й індуктивністю L_0, яка обумовлена реактивною потужністю, що затрачується на створення магнітного потоку Φ_{1_m}.

Отже,

$$\dot{E}'_{2\,н} = \dot{I}_{1_0}\underline{z}_0 = \dot{I}_{1_0}\left(R_0 + jx_0\right). \tag{1.54}$$

Врахуємо, що $\dot{E}'_{2\,н} = \dot{E}_1$. Тепер можна записати три рівняння, що визначають схему заміщення АД:

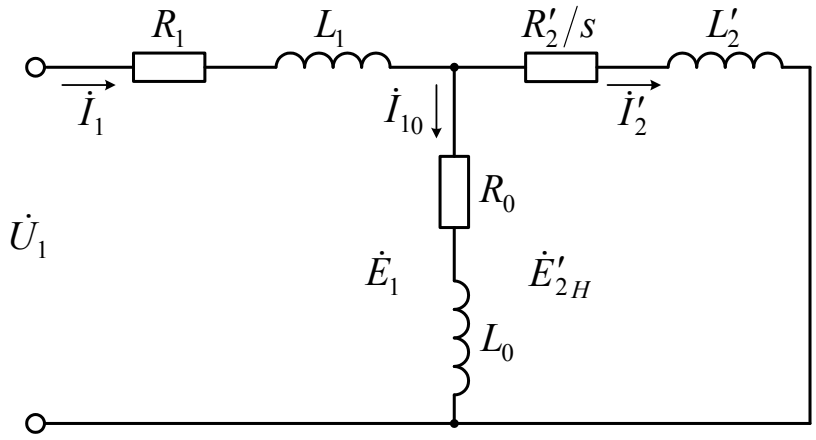


Рис. 1.11

$$\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}'_2 z'_2;\\
\dot{U}_1 &= \dot{I}_1 \underline{z}_1 + \dot{I}_{1_0}\underline{z}_0;\\
\dot{I}_1 &= \dot{I}_{1_0} + \dot{I}'_2.
\end{aligned} \tag{1.55}$$

Умови цих трьох рівнянь задовольняє схема заміщення (рис. 1.11).

1.11. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Механічна характеристика АД являє собою залежність корисного обертового моменту на валу M_2 від ковзання при $U_1 = const$ і $f = const$. Отже, згідно з (1.6) механічну характеристику можна подати у вигляді залежності $\Omega_2 = f(M_2)$.

Корисний обертовий момент на валу двигуна M_2 менший за електромагнітний момент на величину $M_0 = \dfrac{P_{мех} + P_д}{\Omega_1}$, що відповідає механічним і додатковим втратам, які покриваються за рахунок потужності $P_{мх}$ на роторі. Тому $M_2 = M - M_0$.

При навантаженні момент M_0 є малим порівняно з M й M_2, тому можна взяти, що $M_0 \approx 0$. Будемо розглядати механічну характеристику двигуна як залежність $M = f(S)$ або $\Omega_2 = f(M)$. Вираз (1.46) можна вважати рівнянням механічної характеристики. Досліджуємо цю залежність при $U_1 = const$ і $f = const.$

Згідно з рівнянням (1.46) при $S \to 0$ і при $S \to \infty$ момент $M \to 0$, що можна одержати з формули (1.46) шляхом розкриття невизначеностей. Отже, між точками $S = 0$, $S = \infty$ і $M = 0$ знаходиться екстремум функції. Щоб визначити умови екстремуму, беремо першу похідну функції (1.46) за S і прирівнюємо її до нуля. Унаслідок чого одержуємо, що екстремальне значення моменту при критичному ковзанні

$$S_{кр} = \frac{R_2}{x_{2_н}}. \tag{1.56}$$

При $0 < S < S_{кр}$ $(\frac{dM}{dS}) > 0$, а при $S_{кр} < S < 1$ $(\frac{dM}{dS}) < 0$, отже, критичному значенню ковзання відповідає максимальне значення моменту. Залежність електромагнітного моменту від ковзання показано на рис. 1.12.

Під час пуску швидкість $\Omega_2 = 0$, ковзання $S = 1$, а пусковий момент буде обчислюватися за формулою

$$M\,|_{S=1} = M_П = \frac{pm_1 E_{2_н}^2 R_2}{2\pi f (R_2^2 + x_{2_н}^2)}, \tag{1.57}$$

тобто зі збільшенням активного опору фази обмотки ротора пусковий момент збільшується і при $R_2 = x_{2н}$ дорівнює максимальному значенню. При $M_П > M_{ст} + M_{дин}$ ротор двигуна почне обертатися, при $S_{кр} < S \le 1$ $(\frac{dM}{dS}) < 0$ робота двигуна є неусталеною.

При $S = S_{кр} = \frac{R_2}{x_{2н}}$ момент буде максимальним:

$$M_m = \frac{pm_1 E_{2_н}^2}{2\pi f\, 2x_{2_н}} \tag{1.58}$$

і не залежатиме від активного опору фази обмотки ротора, але зі збільшенням R_2 M_m зміститься убік збільшення ковзання.

У межах змінення ковзання від $S_{кр}$ до нуля $\frac{dM}{dS} > 0$, що характеризує усталений режим роботи трифазного асинхронного двигуна. При $S = S_н$ параметри АД будуть номінальними: швидкість обертання $\Omega_{2_н}$, потужність $P_{2_н}$, що

розвиває двигун, коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{1_н}$, ККД $\eta_н$ при номінальній фазній напрузі $U_{1_н}$ і номінальній частоті мережі $f_н$.

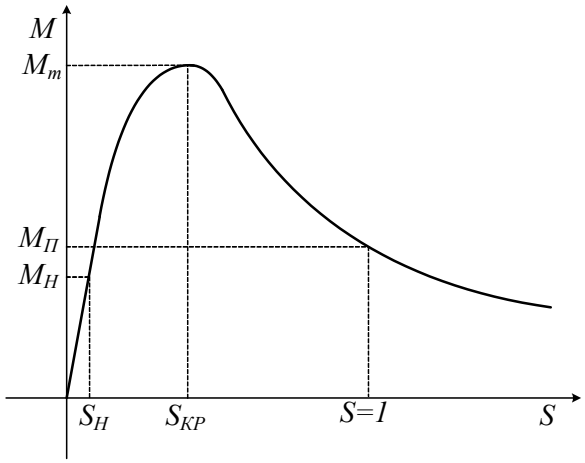


Рис. 1.12

Із співвідношення електромагнітного моменту до його максимального значення для АД з постійними параметрами можна отримати простий вираз механічної характеристики, зручний для практичних розрахунків.

Розділивши (1.58) на (1.46) і перетворивши результат, одержимо:

$$M \frac{2M_m}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}. \qquad (1.59)$$

Отримане співвідношення дає змогу зробити висновок, що величина максимального моменту, по-перше, не залежить, відповідно до виразу (1.58), від величини активного опору обмотки ротора, по-друге, є пропорційною квадрату напруги фази обмотки статора, по-третє, з великою точністю є обернено пропорційною індуктивному опору розсіяння. Оскільки $U_1 \equiv f_1\Phi$, з виразів (1.15), (1.21), (1.46) можна зробити також висновок, що максимальний момент є пропорційним квадрату магнітного потоку АД. Дуже важливо підкреслити, що, хоча момент M_{m} не залежить від активного опору фази обмотки ротора, величина ковзання $S_{кр}$, при якій спостерігається цей момент, відповідно до виразу (1.56) є пропорційною цьому опору.

В асинхронних двигунах нормального виконання кратність максимального моменту при номінальній напрузі

$$k = \frac{M_m}{M_н} = 1{,}7...3{,}0,$$

$$S_{кр} = 0{,}06...0{,}15.$$

1.12. Асинхронні двигуни з витісненням струму з обмотки ротора

1.12.1. Глибокопазні двигуни. Будова і принцип роботи

Для досягнення високого ККД асинхронні двигуни повинні мати ковзання ($S_н \approx 0{,}02...0{,}05$), відповідно до чого активний опір обмоток ротора R_2 має бути досить малим. Однак, як було встановлено, пусковий момент двигуна з таким

опором обмотки ротора буде значно меншим за номінальний. Це виключає можливість пуску таких двигунів з короткозамкненим ротором під навантаженням. Для одержання достатнього пускового моменту необхідно збільшити R_2. Таким чином, виникає завдання створення таких асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, у яких активний опір обмотки ротора при пуску є досить великим і зменшується при переході до нормального режиму роботи. Це завдання вирішують шляхом використання ефекту витіснення струму в обмотці ротора, застосовуючи обмотку спеціальної конструкції.

Одним з різновидів таких двигунів є двигуни з глибокими пазами на роторі (рис. 1.13) і високими (30…60 *мм*) стрижнями «білячої клітки». Витіснення струму в стрижнях клітки відбувається внаслідок дії ЕРС, що індукуються пазовими потоками розсіювання Φ_{p_2}. Можна уявити, що стрижень (див. рис. 1.13) складається з безлічі волокон, увімкнених паралельно. Нижні волокна охоплюються більшою кількістю ліній потоку Φ_{p_2}, а верхні – меншою. Під час пуску, коли частота в роторі є великою ($f_2 = f$), у нижніх волокнах стрижня індукується більша ЕРС самоіндукції, ніж у верхніх, і щільність струму розподіляється по висоті провідника досить нерівномірно. Можна також сказати, що такий нерівномірний розподіл струму обумовлений тим, що нижні волокна стрижня мають більший індуктивний опір, ніж верхні. Таким чином, струм у стрижні витісняється в напрямку до повітряного зазору, що по суті і є виявом поверхневого ефекту в провідниках, заглиблених у феромагнітне середовище.

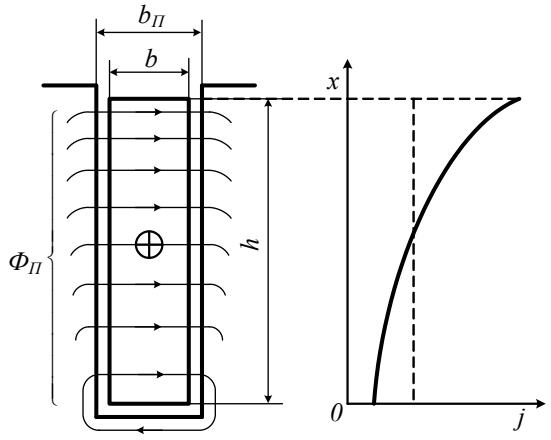


Рис. 1.13

Під впливом витіснення струму, або поверхневого ефекту, активний опір стрижня під час пуску двигуна стає більшим.

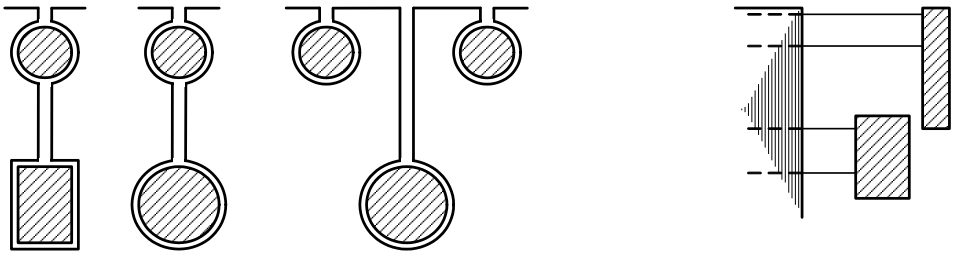
Трохи спрощено можна уявити, що при пуску працює тільки верхня частина стрижня, тому що потік Φ_n у нижній частині внаслідок зменшення в ній струму послаблюється. Унаслідок збільшення під час пуску активного опору стрижня R_{CT} і зменшення його опору розсіяння $x_{\sigma_{CT}}$ зменшується кут зсуву фаз Ψ_2 між ЕРС стрижня, яка індукується обертовим полем, і струмом стрижня, що й призводить до збільшення пускового моменту.

З розбігом двигуна під час його пуску частота струму в роторі зменшується, і при досягненні номінальної швидкості обертання стає досить малою ($f_2 = S_н f_1 \le 1\ldots3$ Гц). При цьому ЕРС, які індукуються потоком Φ_n, стають малими, явище витіснення струму майже зникає і струм розподіляється рівномірно по перерізу стрижня. Активний опір стрижня при цьому стає малим і двигун

працює з хорошим ККД.

1.12.2. Двокліткові двигуни. Будова і принцип роботи

Двокліткові (двообмоткові) двигуни мають на роторі дві короткозамкнені обмотки, одна з яких є *пусковою обмоткою,* а друга – *робочою.* Робочу обмотку виготовляють з мідних стрижнів і розміщують в нижніх частинах пазів, а пускову – з латунних або бронзових стрижнів і розташовують у верхніх частинах пазів, ближче до повітряного зазору (рис. 1.14, а). Переріз стрижнів пускової обмотки може бути трохи меншим, ніж робочої обмотки. Однак переріз і теплоємність стрижнів пускової обмотки мають бути досить великими, щоб запобігти надмірному нагріванню цієї обмотки під час пуску. Іноді робочу й пускову обмотки розміщують в окремих пазах (рис. 1.14, б). У зв´язку з цим, активний опір пускової обмотки $R_{П}$ зазвичай у 2–4 рази більший за активний опір R_{p} робочої обмотки. Навпаки, індуктивний опір розсіяння пускової обмотки $x_{\sigma_{П}}$ у кілька разів менший, ніж $x_{\sigma_{P}}$ робочої обмотки, оскільки Її заглиблено глибоко в сталь осердя ротора.



а б

Рис. 1.14

Обертове магнітне поле двигуна індукує в обох обмотках ротора однакові ЕРС.

Під час пуску внаслідок великої частоти струму ротора індуктивний опір робочої обмотки є відносно великим і значно більшим за повний опір пускової обмотки. Тому під час пуску навантажено струмом в основному тільки пускову обмотку, і через велику величину її активного опору двигун розвиває великий пусковий момент. Під час розганяння двигуна частота струму ротора зменшується, і при номінальній швидкості обертання (S = 0,02…0,05) індуктивні опори розсіяння обмоток ротора будуть у 20–50 разів меншими, ніж під час пуску. Тому в робочому режимі активні опори обмоток ротора є значно більшими за індуктивні, а повні опори обмотки визначаються величинами активних опорів. Унаслідок цього під час роботи двигуна повний опір робочої обмотки є значно меншим, ніж повний опір пускової обмотки, і струмом навантажено головним чином робочу обмотку. Через малість активного опору цієї обмотки двигун має хороший ККД.

Таким чином, у двокліткового двигуні при пуску відбувається витіснення

струму ротора в напрямку до повітряного зазору, як і в глибокопазному двигуні.

1.13. Пуск асинхронних двигунів

Розглядаючи можливі способи пуску асинхронних двигунів, необхідно враховувати такі основні положення: двигун повинен розвивати під час пуску досить великий пусковий момент, який має бути більшим за статичний момент опору на валу, щоб ротор двигуна міг почати обертатися й досягти номінальної швидкості обертання; величина пускового струму має бути обмежена таким значенням, щоб не відбувалося ушкодження двигуна й збудження номінальної роботи мережі; схема пуску має бути досить простою, а кількість і вартість пускових пристроїв – малими.

Під час пуску асинхронного двигуна на холостому ходу в активному опорі обмотки ротора виділяється теплова енергія, яка дорівнює кінетичній енергії махових мас, що приводяться в обертання, а під час пуску під навантаженням кількість енергії, що виділяється, збільшується. Виділення енергії в колі статора зазвичай є трохи більшим, ніж у роторі. При частих пусках, а також при досить важких умовах пуску, коли великі махові маси механізмів, які приводяться в рух, виникає небезпека перегріву обмоток двигуна.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором простіші за будовою й обслуговуванням, а також дешевші й надійніші в роботі, чим з фазним ротором. Тому всюди, де це можливо, застосовуються двигуни з короткозамкненим ротором.

Найбільш простим способом пуску двигуна з короткозамкненим ротором є ввімкнення обмотки його статора безпосередньо в мережу, на номінальну напругу (рис. 1.15, а). Такий пуск називають прямим. При цьому пусковий струм двигуна $I_{П} = (4{,}0...7{,}0)I_{н}$.

Сучасні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором проектуються з таким розрахунком, щоб за величиною електродинамічних зусиль, що виникають під час пуску і діють на обмотки, і за умовами нагрівання обмоток можна було здійснити прямий пуск. Тому прямий пуск завжди є можливим, коли досить потужна мережа й пускові струми двигунів не спричиняють занадто великих спадів напруг у мережі (не більше 10–15 %). Сучасні енергетичні системи, мережі й мережні трансформаторні підстанції зазвичай мають такі потужності, що в переважній більшості випадків можна здійснити прямий пуск асинхронних двигунів.

Нормальним способом пуску двигунів є прямий пуск.

Якщо за умовами спадання напруги в мережі прямий пуск двигуна з короткозамкненим ротором є неможливим, то застосовуються різні способи пуску двигуна при зменшеній напрузі (рис. 1.15, б, в, г). Однак при цьому пропорційно квадрату напруги на затискачах обмотки статора або квадрату пускового струму двигуна зменшується також і пусковий момент, що є недоліком пуску при зменшеній напрузі. Тому ці способи пуску застосовуються, коли можливим є пуск двигуна на холостому ходу або під неповним навантаженням. Необхідність пуску

при зменшеній напрузі трапляється найчастіше в потужних високовольтних двигунах.

Реакторний пуск здійснюється відповідно до схеми на рис. 1.15, б. Спочатку вмикається вимикач B_1, і двигун одержує живлення P через трифазний реактор (реактивну або індуктивну котушку), опір якого x_p обмежує величину пускового струму. Після досягнення номінальної швидкості обертання вмикається вимикач B_2, що шунтує реактор, унаслідок чого на двигун подається номінальна напруга мережі.

Автотрансформаторний пуск здійснюється за схемою (рис. 1.15, в) у такому порядку. Спочатку вмикаються вимикачі B_1 і B_2, і на двигун через автотрансформатор AT подається зменшена напруга. Після досягнення двигуном певної швидкості вимикач B_2 вимикається і двигун одержує живлення через частину обмотки автотрансформатора AT, що у цьому випадку працює як реактор. Потім вмикається вимикач B_3, унаслідок чого двигун одержує повну напругу.

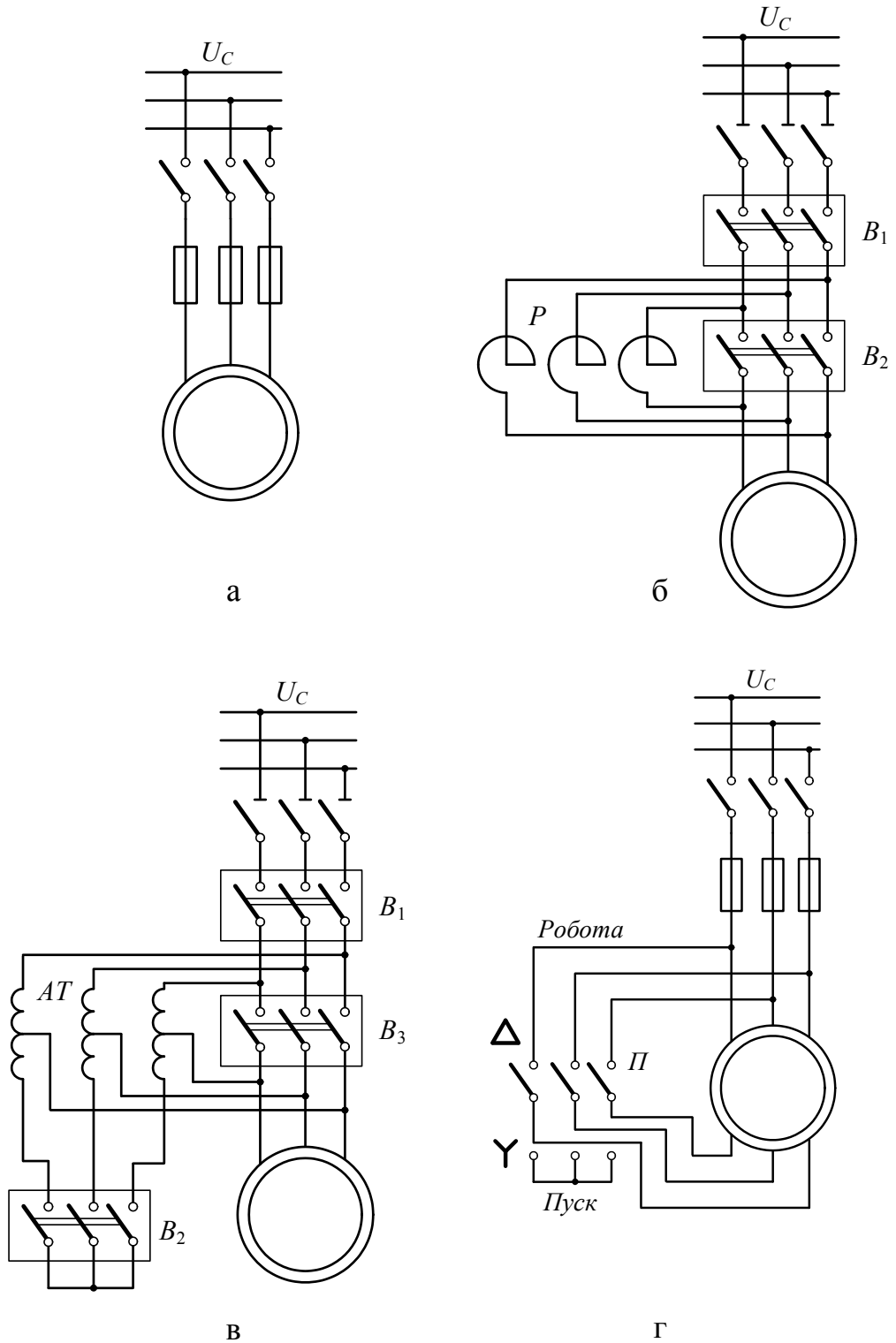


Рис. 1.15

Пуск шляхом перемикання із з'єднання «зірка» у з'єднання «трикутник» (рис. 1.15, г) може застосовуватися у випадках, коли виведено всі шість кінців обмотки статора й двигун нормально працює із з'єднанням обмотки статора в «трикутник», наприклад, коли двигун на 380/220 В зі з'єднанням обмоток Y/Δ працює від мережі 220 В. У цьому випадку при пуску обмотка статора вмикається в з'єднання «зірка» (нижнє положення перемикача $П$ на рис. 1.15, г), а при досягненні номінальної швидкості обертання перемикається в з'єднання «трикутник» (верхнє положення перемикача $П$ на рис. 1.15, г). При такому способі пуску порівняно із прямим пуском при з'єднанні обмотки в «трикутник» напруга фаз обмоток зменшується в $\sqrt{3}$ разів, пусковий момент зменшується в $(\sqrt{3}^2) = 3$ рази, пусковий струм у фазах обмотки зменшується в $\sqrt{3}$ разів, а мережі – в $\sqrt{3}\cdot\sqrt{3} = 3$ рази. Таким чином, розглянутий спосіб пуску є рівноцінним автотрансформаторному пуску при $k_{am} = \sqrt{3}.$

Недоліком цього способу пуску порівняно з реакторним і автотрансформаторним є те, що при пускових перемиканнях коло двигуна розривається, що пов'язано з виникненням комутаційних перенапруг. Цей спосіб раніше широко застосовувався при пуску низьковольтних двигунів, однак зі збільшенням потужності мереж втратив своє колишнє значення і тепер використовується нечасто.

Пуск двигуна з фазним ротором з допомогою пускового реостата. Двигуни з фазним ротором застосовуються значно рідше за двигуни з короткозамкненим ротором. Їх використовують у таких випадках: коли двигуни з короткозамкненим ротором є неприйнятними за умовами регулювання їхньої швидкості обертання; коли статичний момент опору на валу при пуску M_{CT} є великим і тому пуск при зменшеній напрузі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором є неприйнятним, а прямий пуск такого двигуна є неприпустимим,якщо є вплив великих пускових струмів на мережу; коли маси, що приводяться в рух, є настільки великими, що виділена у вторинному колі двигуна теплова енергія спричиняє неприпустиме нагрівання обмотки ротора у вигляді «білячої клітки».

Пуск двигунів з фазним ротором виконується з допомогою пускового реостата в колі ротора (рис. 1.16). Застосовуються дротяні, з литими чавунними елементами, а також рідинні реостати. За умови нагрівання реостати розраховуються на короткочасну роботу. Опори металевих реостатів для охолодження зазвичай занурюють у бак із трансформаторним маслом. Металеві реостати є східчастими, і перемикання з одного виступу на інший здійснюється або вручну з допомогою рукоятки контролера, основним елементом якого є вал із закріпленими на них контактами, або ж автоматично (в автоматизованих установках) з допомогою контакторів або контролера з електричним приводом.

За наявності у двигуна короткозамкненого механізму після закінчення пуску щітки з його допомогою піднімають з контактних кілець і кільця закорочують,

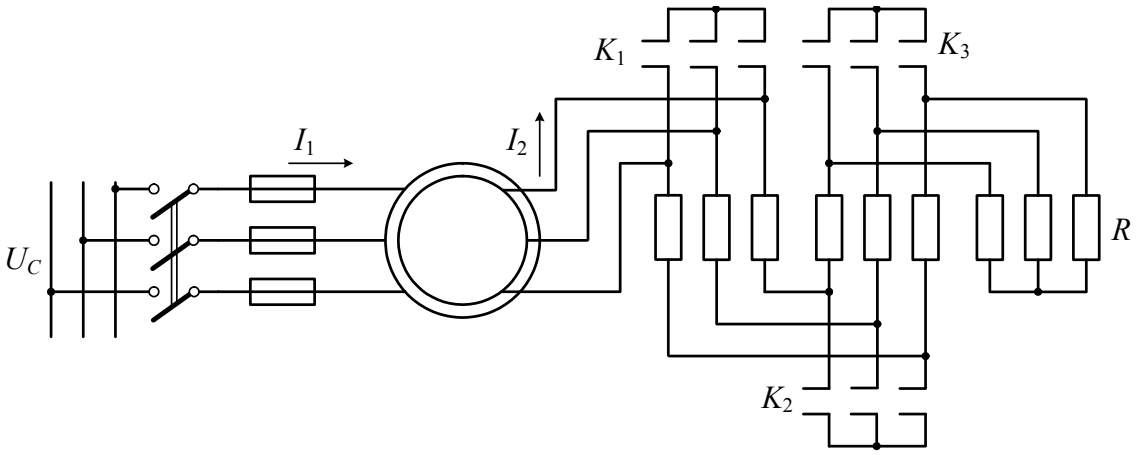


Рис. 1.16

а реостат повертається в пускове положення. Тим самим пускову апаратуру приводять у готовність до наступного пуску.

1.14. Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів

Регулювальні характеристики АД визначаються:

а) межами регулювання швидкості, які установлюються відношенням найбільшої швидкості обертання до найменшої:

$$\frac{\Omega_{2\max}}{\Omega_{2\min}};$$

б) економічністю регулювання, якщо розуміти під цим початкові витрати на устаткування й наступні експлуатаційні витрати;

в) характером регулювання – плавним або східчастим;

г) простотою і надійністю регулювальної апаратури й операцій з регулювання швидкості обертання.

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна

$$\Omega_2 = \Omega_1(1-S). \tag{1.60}$$

Відповідно до виразу (1.60) способи регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів можна поділити на два класи: регулювання швидкості обертання магнітного поля статора

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \tag{1.61}$$

що досягається або регулюванням частоти живильної мережі f, або зміненням кількості пар полюсів p двигуна; регулювання ковзання двигуна S при $\Omega_1 = const$. У першому випадку ККД двигуна залишається високим, а в другому – зменшується зі збільшенням S, тому що потужність, яка передається магнітним полем в обертовий ротор

$$P'_{эм} = SP_{эм}, \tag{1.62}$$

втрачається в роторі двигуна.

1.14.1. Частотне регулювання швидкості обертання

Для змінення швидкості обертання АД найбільш широко використовуються пристрої, що дають змогу змінювати частоту підведеної напруги – напівпровідникові перетворювачі частоти. У найпростішому випадку частотного регулювання швидкість обертання керується шляхом змінення частоти й амплітуди напруги трифазного джерела живлення. Регулювання швидкості АД зміненням частоти напруги, підведеної до статора, є можливим як убік зменшення швидкості, так і в бік збільшення її вище за номінальну. При регулюванні частоти вниз від номінальної можна вибрати такий закон частотного керування (співвідношення між частотою й амплітудою живильної напруги, яка подається на статор АД), що магнітний потік машини буде підтримуватися незмінним. У цьому випадку максимальний момент двигуна буде зберігатися незмінним, і в такий спосіб забезпечується й незмінність перевантажувальної здатності в усьому діапазоні регулювання при сталому моменті навантаження. При регулюванні частоти вгору від номінальної, що є можливим у перетворювачах частоти із проміжним контуром постійного струму, має місце режим зменшення магнітного потоку двигуна, оскільки амплітуда напруги залишається незмінною на рівні її номінального значення.

Змінення частоти f і напруги U_1 при частотному регулюванні швидкості обертання АД пояснюється тим, що $M \equiv \dfrac{U_1^2}{f}$.

Якщо знехтувати відносно невеликим спадом напруги в обмотці фази статора АД, то

$$U_1 = E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 k_{об_1} \Phi_{1_m}, \qquad (1.63)$$

звідки $$\Phi_{1_m} = \frac{U_1}{4{,}44 f_1 w_1 k_{об_1}}.$$

Таким чином, при $U_1 = const$ і зменшенні частоти f збільшується магнітний потік.

Істотне змінення величини потоку Φ_{1_m} при регулюванні швидкості Ω_2 є небажаним, тому що збільшення Φ_{1_m} проти номінального спричиняє збільшення насичення магнітного кола й велике зростання намагнічувального струму I_{1_0}, а зменшення Φ_{1_m} – недовикористання машини, зменшення перевантажувальної здатності й збільшення струму I_2 при тому ж значенні M і та ін. Тому в більшості випадків доцільно підтримувати $\Phi_{1_m} = const$. При цьому із співвідношення (1.63) видно, що одночасно з регулюванням частоти необхідно пропорційно їй змінювати також напругу, тобто підтримувати

$$\frac{U_1}{f} = const.$$

1.14.2. Регулювання швидкості обертання шляхом змінення кількості пар полюсів

Змінення кількості пар полюсів p використовується зазвичай для двигунів з короткозамкненим ротором, тому що при цьому потрібно змінювати p тільки для обмотки статора і тільки двома способами: застосуванням на статорі декількох обмоток, що прокладено в загальних пазах і які мають різну кількість пар полюсів p; застосуванням обмотки спеціального типу, що дає змогу одержати різні значення p шляхом змінення (перемикання) схеми з'єднання обмотки. Запропоновано значну кількість різних схем обмоток з перемиканням кількості пар полюсів, однак найбільшого поширення набули тільки кілька з них. Застосування декількох обмоток є невигідним, тому що при цьому через обмежене місце в пазах переріз провідників кожної з обмоток потрібно зменшувати, що призводить до зменшення потужності двигуна. Використання обмоток з перемиканням кількості пар полюсів спричиняє ускладнення комутаційної апаратури, особливо якщо з допомогою однієї обмотки бажають одержати більше двох швидкостей обертання. Трохи погіршуються також енергетичні показники двигунів.

Двигуни зі зміненням кількості пар полюсів називаються *багатошвидкісними.* Зазвичай їх випускають на дві, три або чотири швидкості обертання, причому двошвидкісні двигуни виготовляють з однією обмоткою на статорі й з перемиканням кількості пар полюсів у відношенні $p_2 : p_1 = 2:1$, тришвидкісні двигуни – із двома обмотками на статорі, з яких одна виконується перемиканням $p_2 : p_1 = 2:1$, чотирихшвидкісні двигуни – із двома обмотками на статорі, кожна з яких виконується з перемиканням кількості пар полюсів у відношенні $2:1$.

Кожна фаза обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у відношенні $2{:}1$ складається з двох частин, або половинок, з однаковою кількістю котушкових груп у кожній частині. Коли обидві частини обмотки обтікаються струмами однакового напрямку, обмотка створює магнітне поле з більшою кількістю полюсів ($2p = 4$), а при зміненні напрямку струму в одній частині обмотки на зворотний кількість полюсів зменшується вдвічі ($2p = 2$). Такі перемикання виконують у всіх фазах одночасно, і частини обмотки, що перемикаються, можна з'єднувати послідовно або паралельно.

1.15. Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів з фазним ротором

Для двигунів з фазним ротором можна використати майже всі способи регулювання швидкості обертання, що й для двигунів з короткозамкненим ротором (див. підрозд. 1.13). Однак на практиці із цих способів для двигунів з фазним ротором застосовують тільки спосіб регулювання швидкості обертання з допомогою реакторів насичення. Нижче розглянемо способи регулювання швидкості

обертання, які є специфічними для двигунів з фазним ротором і в яких можна вмикати регулювальні пристрої у вторинне коло.

Регулювання швидкості обертання реостата в колі ротора виконується зао тією ж схемою (рис. 1.16), що й при реостатному пуску двигуна, але реостат при цьому необхідно розрахувати на тривалу роботу. При збільшенні активного опору обмотки ротора вигляд механічної характеристики двигуна змінюється: характеристика стає більше м'якою і ковзання двигуна при тому самому моменті навантаження M_{CT} збільшується.

При $M_{CT} = const$ робоче ковзання S з великою точністю є пропорційним S_m і, отже, активному опору обмотки ротора. Тому ковзання S й S', що відповідають випадкам $R_Д = 0$ і $R_Д \neq 0$, співвідносяться так:

$$\frac{S'}{S} = \frac{R_Д + R_2}{R_2}.$$

1.16. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Під робочими характеристиками асинхронного двигуна розуміють такі: Ω_2, M, η і $\cos\varphi = f(P_2)$ при $U_1 = const$ й $f = const$ (рис. 1.17).

Крім того, до важливих показників належить коефіцієнт перевантажувальної здатності k_M, а для двигунів з короткозамкненим ротором – коефіцієнти кратності пускового струму й пускового моменту.

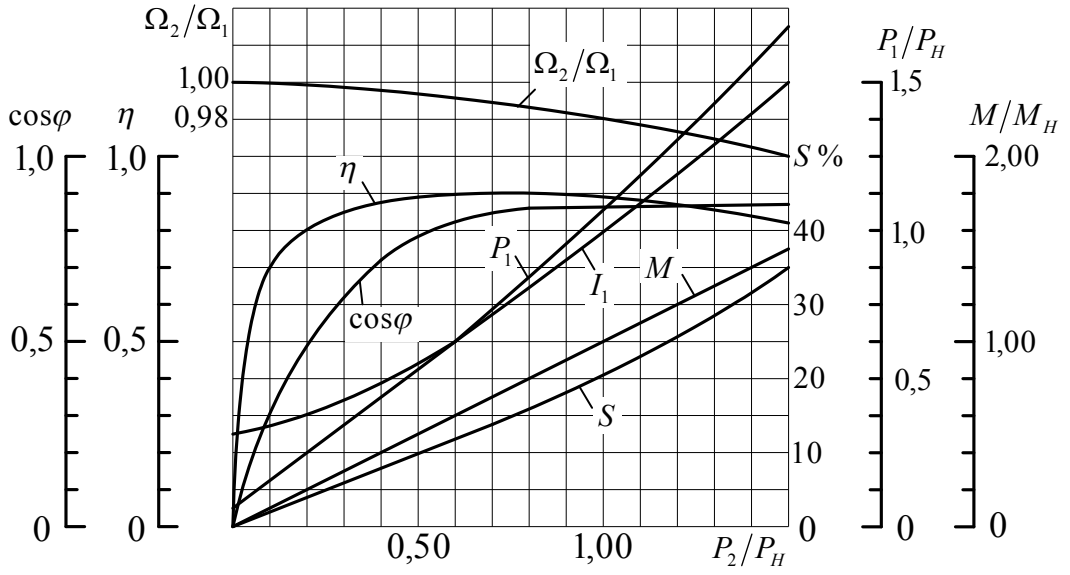


Рис. 1.17

Швидкість обертання двигуна $\Omega_2 = f(P_2)$

З формули для ковзання (1.5) випливає, що

$$\Omega_2 = \Omega_1(1 - S). \qquad (1.64)$$

З іншого боку, згідно з формулою (1.62)

$$S = \frac{P_{M2}}{P_{EM}}. \qquad (1.65)$$

Таким чином, ковзання асинхронного двигуна чисельно дорівнює відношенню втрат в обмотці ротора P_{M_2} до електромагнітної потужності, що розвиває двигун. При холостому ході втрати P_{M2} є дуже малими порівняно з потужністю P_{EM}, тому $S \approx 0$ и $\Omega_2 \approx \Omega_1$. У міру збільшення навантаження відношення (1.65) збільшується, але з огляду на високий ККД двигуна знаходиться у малому діапазоні. Зазвичай при номінальному навантаженні $\frac{P_{M_2}}{P_{ЭМ}} \approx \frac{P_{M_2}}{P_2} = 1{,}5...5\%$. Залежність $\Omega_2 = f(\mathrm{P}_2)$ є кривою, що слабо нахилена до вісі абсцис.

Залежність $M = f(P_2)$

При сталому режимі работи $M = M_2 + M_0$, де M_2 – корисний гальмівний момент двигуна, а M_0 – момент холостого ходу. Оскільки при зміненні навантаження в межах від холостого ходу до номінальної швидкості обертання асинхронних двигунів залишається майже постійним, залежність $M = f(P_2)$ асинхронного двигуна є майже прямолінійною (див. рис. 1.17).

Втрати і ККД двигуна

В асинхронних двигунах мають місце всі ті самі види втрат, що й в інших електричних машинах – механічні втрати, втрати в сталі й міді, додаткові втрати.

Основні види втрат в асинхронних машинах визначаються за формулами, аналогічним наведеним у попередніх розділах. Особливу групу втрат становлять додаткові втрати. Вони складаються з додаткових втрат у міді й сталі. При синусоїдальній напрузі на затискачах двигуна додаткові втрати в міді виникають частково під впливом вищих гармонік МРС, частково – внаслідок ефекту витиснення струму.

Додаткові втрати в міді від вищих гармонік МРС мають місце в основному в обмотках ротора з «білячою кліткою». При обертанні ротора в магнітних полях, які створюються вищими гармоніками МРС статора, в обмотці ротора виникають струми, що мають частоту, яка є відмінною від частоти ковзання й залежить від швидкості обертання ротора. Для зменшення цих втрат зменшують шаг обмотки статора, що веде до зменшення вищих гармонік МРС, скошують пази ротора відносно пазів статора, що має те саме значення, що й зменшення шагу і відповідний добір кількості пазів на статорі й роторі Z_1 і Z_2.

Явище витіснення струму спостерігається як в обмотках статора, так і в обмотках ротора, особливо з «білячою кліткою». Тут його можна використати для поліпшення пускових характеристик двигунів з короткозамкненим ротором. Однак в умовах нормальної роботи частота струму в роторі зазвичай не перевищує 3 Гц. У цих умовах витіснення струму є майже непомітним. Явища, що відбуваються під час пуску в хід двигуна і пов'язані з витісненням струмів у роторі, розглянуто в підрозд. 1.12.

Оскільки додаткові втрати від вищих гармонік МРС створюються струмами, що мають частоту, яка відрізняється від частоти першої гармоніки струму, вони покриваються механічною потужністю, що розвиває двигун.

Можна вважати з достатньою точністю, що додаткові втрати в міді змінюються пропорційно квадрату струму.

Додаткові втрати в сталі асинхронних машин складаються, як і в сталі синхронних машин, з пульсаційних і поверхневих втрат.

Пульсаційні втрати спричиняють поздовжні пульсації магнітного потоку внаслідок змінення магнітної провідності, що обумовлена безперервним зміненням взаємного положення зубців статора й ротора при його обертанні.

Поверхневі втрати обумовлюються головним чином тим, що під впливом пазів у кривій розподілу індукції в зазорі виникають провали (рис. 1.18). Частота поверхневих пульсацій така сама, що й пульсацій у зубцях.

Оскільки додаткові втрати в сталі мають частоту, відмінну від основної, вони покриваються механічною потужністю, що розвивається двигуном.

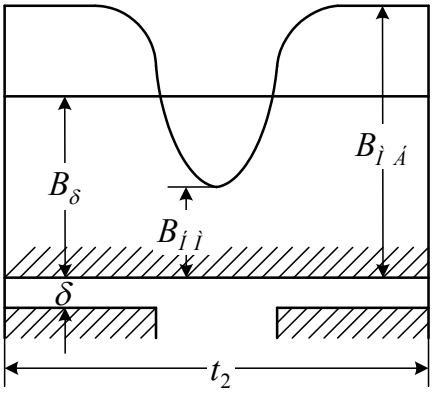


Рис. 1.18

Можна вважати з достатньою точністю, що додаткові втрати в сталі змінюються пропорційно квадрату напруги, підведеної до двигуна.

Ступінь точності, з якою розраховуються додаткові втрати, є відносно невисокою. Тому зазвичай вони враховуються приблизно, у певному відсотку від корисної потужності при роботі машини як генератора або від підведеної потужності при роботі машини як двигуна. Додаткові втрати $P_Д$ в асинхронних машинах при номінальному навантаженні становлять 0,5 % від підведеної потужності.

Повні втрати в двигуні

$$\sum P = P_{M_1} + P_{M_2} + P_{CT_1} + P_{MX} + P_Д \qquad (1.66)$$

При збільшенні навантаження сума втрат $P_{CT_1} + P_{MX}$ трохи зменшується, з одного боку, внаслідок зменшення основного потоку, а з іншого – зменшення швидкості обертання. Зазвичай це зменшення не перебільшує 4 – 8%, тому й ці втрати відносять до постійних втрат двигуна.

На відміну від втрат у сталі втрати в міді змінюються пропорційно підведеній потужності.

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1 = f(P_2)$

Асинхронний двигун, як і трансформатор, споживає з мережі струм, який майже не залежить від навантаження. Тому його $\cos\varphi_1$ завжди менший за одиницю. При холостому ході $\cos\varphi_1$ зазвичай не перебільщує 0,2, але потім при навантаженні доволі швидко збільшується (див. рис. 1.17) і досягає максимуму при потужності, близькій до номінальної. Якщо далі збільшувати навантаження, то швидкість двигуна зменшиться, відповідно збільшиться кут $\Psi_2 = arctg\dfrac{Sx_2}{r_2}$ і зменшиться $\cos\Psi_2$ і $\cos\varphi_1$ (див. рис. 1.17).

2. ГЕНЕРАТОРНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ТРИФАЗНОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

2.1. Робота асинхронної машини в режимі генератора

Припустимо, що напрямок обертання й полярність поля статора залишились такими самими, як на рис. 2.1, а, ротор прискоримо так, щоб швидкість Ω_2 стала більшою за швидкість Ω_1 (рис. 2.1, в). У цьому випадку значення ковзання стає від'ємним і напрямок обертання поля статора відносно ротора змінюється на зворотний порівняно з тим випадком, коли машина працює як двигун. Відповідно до цього змінюється напрямок ЕРС і струму в провіднику і знак сили F_0 на валу АМ (рис. 2.1, г). Отже, момент, що розвиває АМ, стає гальмівним відносно обертального моменту первинного двигуна, з допомогою якого було прискорено ротор АМ. У цих умовах АМ працює як генератор, перетворюючи механічну енергію, що підводиться до неї від первинного двигуна, на електричну, яку вона віддає в мережу.

Теоретично швидкість Ω_2 у генераторному режимі може змінюватися в межах $\Omega_1 < \Omega_2 < \infty$, чому відповідає змінення ковзання в межах $0 > S > -\infty$. Насправді високі швидкості обертання є неприпустимими за умови механічної міцності, а за умови обмеження втрат і збереження високого ККД у генераторному режимі можливі такі самі абсолютні значення ковзання, як і в режимі двигуна.

Розглянемо, як відбувається перехід від роботи АМ у режимі двигуна до роботи в режимі генератора. Будемо вважати, що статор АМ увімкнено на мережу з постійними напругою і частотою, тоді $U_1 = const$ і $f = const$. Якщо для простоти не враховувати спад напруги в обмотці статора, то з рівняння напруг $\dot{U} = -\dot{E}_1 = const$ і при $f = const$ ЕРС $E_1 \equiv \Phi_{1m}$ випливає, що при заданій напрузі і частоті мережі потік Φ_{1m}, а також струм I_{1_0}, необхідний для створення

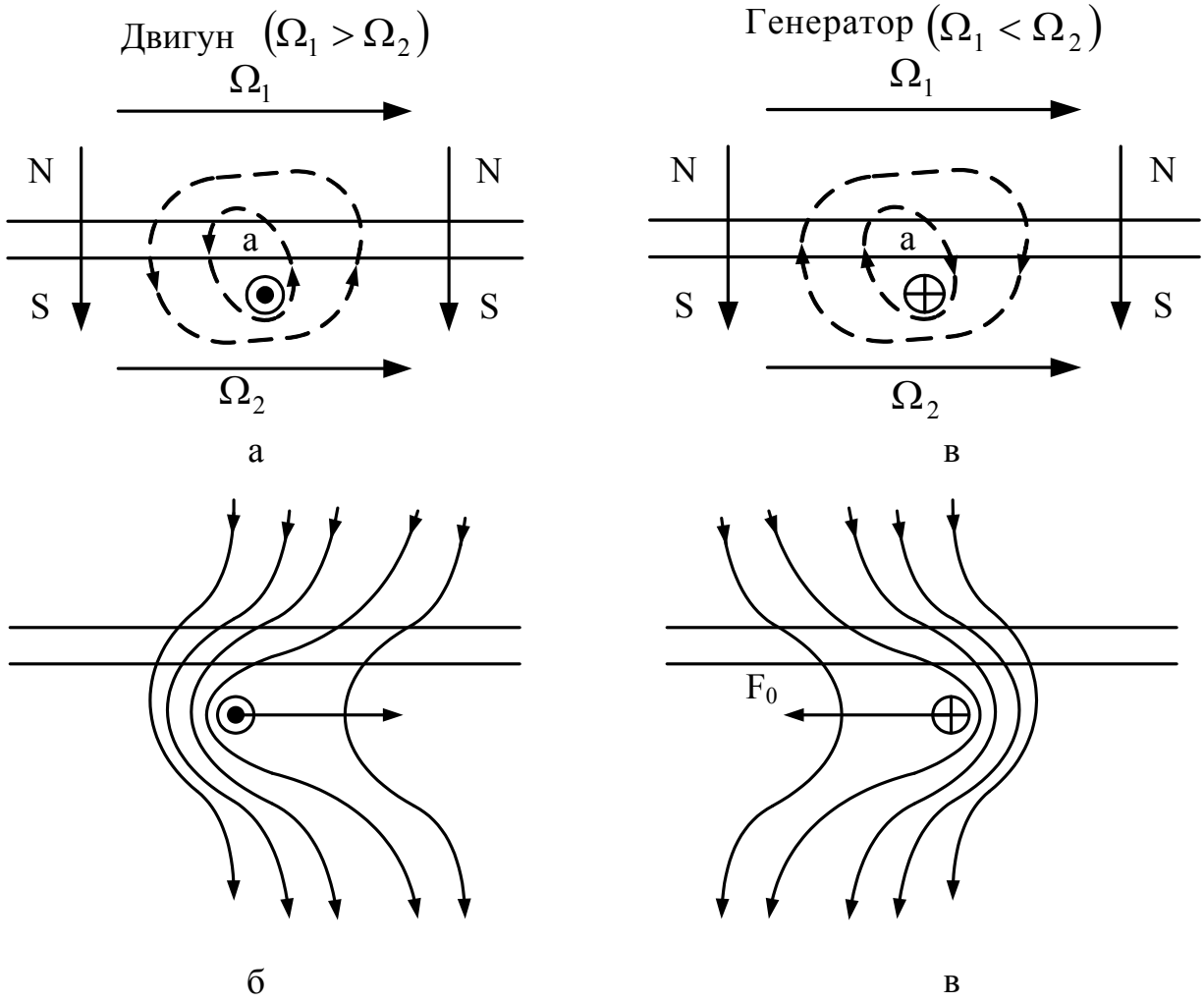


Рис. 2.1

цього потоку, не залежать від режиму роботи АМ. Інакше кажучи, при роботі в режимі генератора АМ продовжує споживати з мережі такий же намагнічувальний струм I_{1_0}, як і при роботі в режимі двигуна.

Щоб перевести АМ у режим роботи генератора, почнемо прискорювати ротор машини з допомогою якого-небудь допоміжного двигуна, що допускає досить плавне регулювання швидкості обертання. При $\Omega_2 = \Omega_1$ ротор і поле статора (розуміється перша гармонійна складова поля) є нерухомими один відносно одного. У цих умовах електромагнітний вплив між статором і ротором зникає і енергія не може передаватися ні зі статора на ротор, ні з ротора на статор, але потужність, що є необхідною для покриття втрат в обмотці ($P_{м_1}$) і сталі ($P_{ст}$) статора, подається з мережі, а потужність, яка є необхідною для покриття механічних $P_{мх}$ і додаткових $P_Д$ втрат підводиться від первинного двигуна, що приводить в обертання АМ.

При подальшому прискоренні ротора $\Omega_2 > \Omega_1$ різниця швидкостей $(\Omega_1 - \Omega_2)$ і відповідно ковзання S стають від'ємними. Це означає, що якщо при $\Omega_2 < \Omega_1$ поле переміщалося відносно ротора в якому-небудь одному напрямку,

наприклад ліворуч – праворуч (див. рис. 2,1, а), то при $\Omega_2 > \Omega_1$ поле починає переміщатися у зворотному напрямку, тобто праворуч – ліворуч (див. рис. 2.1, в). Відповідно до цього змінює на зворотний знак ЕРС, що індукується в обмотці ротора, тому що $E_2 = SE_{2H}$ (формула (1.15)).

Доведемо, що при такому зміненні знака ЕРС E_2 змінюється знак тільки активної складової струму в роторі I_{2_a}, тоді як знак індуктивної складової струму I_{2_p} не змінюється.

Справді, за формулою (1.19) маємо

$$I_2 = \frac{E_{2_H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2_H}^2}}.$$

У цій формулі E_{2_H} і x_{2_H} – ЕРС та індуктивний опір обмотки ротора при $\Omega_2 = 0$, тобто при $S = +1$.

Активна складова струму $I_{2_a} = I_2 \cos \Psi_2$, де Ψ_2 – кут зсуву між ЕРС E_2 і струмом I_2. З діаграми на рис. 2.3 маємо

$$\cos \Psi_2 = \frac{\frac{R_2}{S}}{z_2} = \frac{\frac{R_2}{S}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2H}^2}},$$

отже,

$$I_{2_a} = \frac{E_{2_H}}{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2_H}^2} \frac{R_2}{S} = \frac{E_{2_H} R_2}{R_2^2 + (Sx_2)^2} S. \qquad (2.1)$$

Оскільки чисельник і знаменник дробу $\frac{E_{2_H} R_2}{R_2^2 + (Sx_2)^2}$ є додатними, знак струму I_{2_a} визначається знаком ковзання S. Під час переходу АМ з режиму двигуна в режим генератора S змінюється з плюса на мінус, відповідно до чого змінює на зворотний напрямок струм I_{2_a}.

Для індуктивної складової струму в роторі маємо

$$I_{2_p} = \frac{E_{2_H}}{z_2} \sin \Psi_2,$$

або, оскільки $\sin \varphi_2 = \frac{x_{2_H}}{z_2}$, то

$$I_{2_p} = \frac{E_{2_H}}{z_2^2} = \frac{E_{2_H} x_{2_H}}{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2_H}^2}, \qquad (2.2)$$

тобто знак струму I_{2_p} не залежить від знака ковзання S.

Струм I_2' створює поле, що обертається навколо ротора зі швидкістю $\Omega_2' = \frac{2\pi f_2}{p} = \frac{2\pi f}{p} S = \Omega_1 S$. Оскільки в генераторному режимі ковзання S є від'ємним, то і швидкість Ω_2 слід вважати від'ємною величиною. Фізично це означає, що поле, утворене струмом I_2', обертається в напрямку, що є зворотним до напрямку обертання ротора (рис. 2.2). Крім того, сам ротор обертається зі швидкістю $\Omega_2 = \Omega_1(1-S)$.

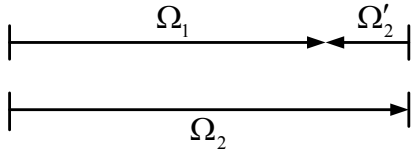


Рис. 2.2

Тому швидкість обертання поля ротора відносно статора (тобто в просторі) дорівнює сумі швидкостей:

$$\Omega_2' + \Omega_2 = \Omega_1 S + \Omega_1(1-S) = \Omega_1.$$

Іншими словами, при роботі АМ у режимі генератора поле ротора, як і при роботі цієї машини в режимі двигуна, обертається в просторі з такою самою швидкістю й у тому самому напрямку, що й поле статора. При прискоренні ротора, тобто при збільшенні швидкості Ω_2, відповідно змінюються частота f_2 й швидкість Ω_2', але швидкість обертання основного магнітного поля $\Omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$ залишається постійною пропорційно частоті f намагнічувального струму I_{1_0}. Таким чином, при роботі АМ у генераторному режимі, як і при при роботі в режимі двигуна, ЕРС і струм ротора, що мають частоту ковзання $f_2 = fS$, завжди зводяться до ЕРС і струму статора, що має частоту тієї мережі, до якої підімкнено машину. Інакше кажучи, частота струму, що АМ віддає у мережу, не залежить від швидкості обертання ротора.

2.2. Схема заміщення і векторна діаграма асинхронного генератора

Ґрунтуючись на сказаному в підрозд. 2.1, можна побудувати векторну діаграму асинхронного генератора (АГ). При цьому, як і при будуванні векторної діаграми АД, будемо користуватися схемою заміщення (див. рис. 1.11), тобто будемо вважати, що ротор приведено до статора і він є нерухомим $\Omega_2 = 0$. Усі еле-

менти схеми заміщення генератора ті ж самі, що й схеми заміщення двигуна, за винятком тільки опору $\frac{R_2}{S}$, значення якого у генераторному режимі роботи стає від'ємним. Фізично це означає, що при роботі машини в генераторному режимі активна потужність надходить не з мережі на вал, а у зворотному напрямку, інакше кажучи, відбувається перетворення механічної енергії, яка підводиться до АМ від первинного двигуна, на електричну з відданням її в мережу.

При будуванні векторної діаграми проводимо вектор основного потоку Φ_{1m} у додатному напрямку осі абсцис (рис. 2.3). Вектори ЕРС $\dot{E}_1$ і $\dot{E}'_2$ відстають від вектора Φ_{1m} за фазою на 90º. Відповідно до раніше доведеного активна складова вторинного струму I'_{2a} змінює свій знак відносно $\dot{E}'_2$, тобто стає спрямованою вверх по осі ординат; навпаки, реактивна складова вторинного струму I'_{2p} знака не змінює, тобто як і раніше відстає від $\dot{E}'_2$ на 90º. Складаючи геометрично струми I'_{2a} і I'_{2p}, одержимо вектор вторинного струму $\dot{I}'_2$, що утворює із вектором $\dot{E}'_2$ кут Ψ_2. Вектор $-\dot{I}'_2$ дає нам складову первинного струму, МРС якого врівноважує МРС струму $\dot{I}'_2$.

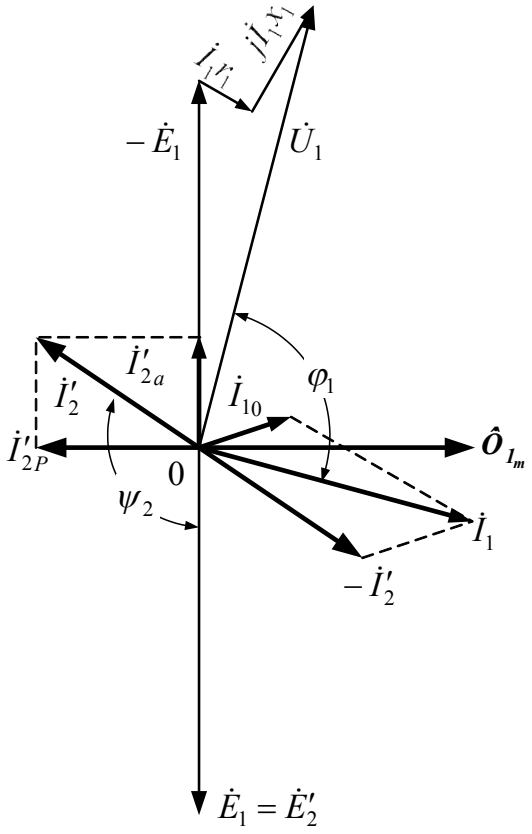


Рис. 2.3

Щоб одержати вектор струму $\dot{I}_1$ у статорі, слід провести вектор струму холостого ходу $\dot{I}_{10}$ і геометрично скласти його з вектором $-\dot{I}'_2$. Напруга на затискачах мережі $\dot{U}_1$, до якої підімкнено статор генератора, має такі складові: ЕРС $\dot{E}_1$, активний спад напруги $\dot{I}_1R_1$, що збігається за фазою зі струмом $\dot{I}_1$, та індуктивний спад напруги $j\dot{I}_1x_1$. Кут $\varphi_1 > 90°$, тобто значення електричної потужності машини є від'ємним. Це означає, що в розглянутих умовах механічна енергія, що підводиться до асинхронної машини від первинного двигуна, перетворюється на електричну й віддається в мережу.

Магнітний потік Φ_{1m} створюється в АГ намагнічувальним струмом. Для цього використовуються СГ, з якими АГ працює спільно на зовнішню мережу. Оскільки струм $\dot{I}_{1_0}$ становить 25–45 % від I_{1H} і подається на генератор під на-

пругою мережі, то й потужність збудження становить від потужності генератора ті самі 25–45%. Інакше кажучи, якщо на станції встановлено 2–4 асинхронні генератори однакової потужності, то для їх збудження необхідно використати один синхронний генератор тієї самої потужності, що й кожний з асинхронних. Нагадаємо, що потужність збудження великого синхронного генератора менше 1 %. Така різниця, що виявляється в потужності збудження не на користь АГ, є істотним недоліком АГ порівняно з СГ. Крім того, вектор струму $\dot{I}_{1_0}$ відстає від вектора напруги майже на 90º. Отже, паралельна робота асинхронних генераторів із синхронними призводить до значного зменшення $\cos\varphi$ останніх, навіть якщо зовнішнє навантаження є чисто активним.

Вмикання АГ у мережу не є складним. Ротор обертають зі швидкістю, якомога близькою до синхронної, у тому ж напрямку, у якому обертається потік. При вмиканні генератора в мережу виникають ті самі явища, що й при вмиканні трансформаторів і АД. Змінення активної потужності, що віддається генератором у мережу, досягається, як і в СГ, зміненням механічної потужності, що підводиться до вала генератора. ККД АГ не нижчий, ніж синхронного.

На основі схеми заміщення (див. рис. 1.11) можна розглянути також баланс реактивних потужностей АГ. З мережі споживається реактивна потужність

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin\varphi_1 .$$

На створення полів розсіяння обмотки статора витрачається реактивна потужність

$$q_1 = m_1 I_1^2 x_1 .$$

Реактивна потужність

$$Q_M = m_1 E_1 I_{1_0} = m_1 I_{1_0}^2 x_0$$

витрачається на створення основного магнітного поля машини, а потужність

$$q_2 = m_1 I_2'^2 x_2' = m_2 I_2^2 x_2$$

– на створення полів розсіяння обмотки ротора.

При цьому

$$Q_1 = Q_M + q_1 + q_2 .$$

2.3. Перетворення механічної енергії, яка підводиться до вала синхронного генератора, на електричну

При генераторному режимі роботи АМ до її вала підводять механічну потужність P_1. Механічні $P_{мх}$ і додаткові $P_д$ втрати компенсуються потужністю P_1. Потужність, що залишається $(P_{мех} = P_1 - P_{мх} - P_д)$, є корисною механічною потужністю. Втрати потужності в міді обмотки ротора $P_{м_2}$ компенсуються потужністю $P_{мех}$. Електромагнітна потужність $P_{ем} = P_{мех} - P_{м_2}$ передається обертовим

магнітним полем в статор і перетворюється на електричну. Втрати в сталі осердя $P_{ст_1}$ і в міді обмоток статора $P_{м_1}$ компенсуються потужністю $P_{ем}$. Потужність P_2, що залишається, виконує роботу у зовнішньому колі:

$$P_2 = P_{ем} - P_{м_1} - P_{ст_1}.$$

Коефіцієнт корисної дії генератора

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

2.4. Електромагнітна потужність і електромагнітний момент асинхронного генератора

Потужність P_2, що АГ віддає у мережу (2.6) і яка дорівнює $m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$, є від'ємною, тому що $\varphi_1 > 90°$ (див. рис. 2.3). Від'ємними є й інші потужності – $P_{ем}$ і $P_{мех}$. Якщо режим генератора розглядати самостійно від режиму АД, то в рівнянні напруг обмоток необхідно змінити знак. Зокрема, якщо в рівнянні напруги фази обмотки статора (1.21) змінити знак, то для АГ це рівняння матиме такий вигляд:

$$\dot{U}_1' = -\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 \underline{z}_1. \qquad (2.7)$$

Векторну діаграму АГ, побудовану за цим рівнянням, показано на рис. 2.4.

Якщо $\varphi_H < 90°$, то значення потужності буде додатним:

$$P_2 = m_1 I_1 U_1' \cos\varphi.$$

Отже значення потужності $P_{ем}$ також буде додатним:

$$P_{ем} = m_1 E_2' I_2' \cos\Psi_2. \qquad (2.8)$$

Якщо в рівняння (2.8) підставити значення наведеної ЕРС обмотки ротора

$$E_2' = E_{2_H}' \mathrm{S},$$

наведеного струму обмотки ротора

$$I_2' = \frac{E_{2H}'}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right) + \left(x_{2_н}'\right)^2}} \qquad (2.9)$$

і коефіцієнта потужності обмотки ротора

$$cos\ \Psi_2 = \frac{\frac{R_2'}{S}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_{2_H}')^2}},$$

то одержимо

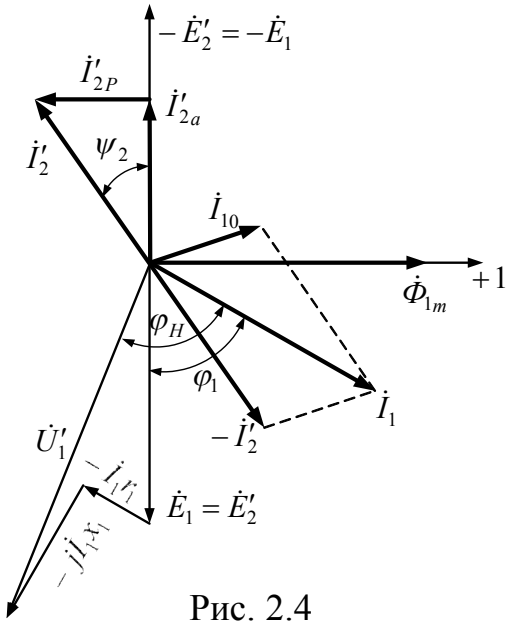


Рис. 2.4

$$P_{ем} = \frac{m_1 (E'_{2_H})^2 \dfrac{R'_2}{S}}{\left(\dfrac{R'_2}{S}\right)^2 + (x'_{2_H})^2}. \qquad (2.10)$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{P_{ем}}{\Omega_1} \qquad (2.11)$$

буде пропорційним електромагнітній потужності, оскільки швидкість Ω_1 при постійній частоті мережі є незмінною, тому момент змінюється зі зміненням ковзання так само, як і потужність $P_{ем}$.

Залежність електромагнітного моменту як функції ковзання АГ неважко знайти, підставивши (2.10) у (2.11).

$$M = \frac{m_1 p (E'_{2_H})^2 \dfrac{R'_2}{S}}{2\pi f \left[\left(\dfrac{R'_2}{S}\right)^2 + (x'_{2_H})^2\right]}. \qquad (2.12)$$

Порівнюючи (2.12) і (1.46), бачимо, що ці вирази є ідентичними, тільки для АГ $S = \dfrac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} < 0, \quad 0 > S > -\infty$. Залежність $M = f(S)$ показано на рис. 2.5.

Втрати в міді обмотки ротора

$$P_{м_2} = \mathrm{m}_1 (I'_2)^2 R'_2. \qquad (2.13)$$

У (2.13) підставимо значення струму I'_2 з (2.9) і одержимо

$$P_{м_2} = \frac{m_1 (E'_{2_H})^2 \mathrm{R}'_2}{\left(\dfrac{R'_2}{S}\right)^2 + (x'_{2_H})^2}. \qquad (2.14)$$

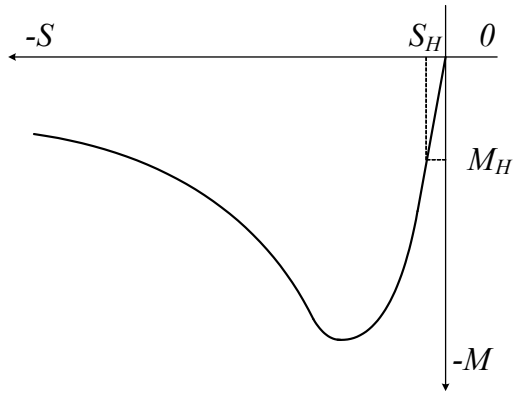


Рис. 2.5

Розділивши (2.14) на (2.10), одержимо

$$P_{м_2} = P_{ем} S. \qquad (2.15)$$

Тоді вираз (2.5) з урахуванням того, що $S < 0$, можна записати в такому вигляді:

$$P_{ем} = \frac{P_{мех}}{1 + S}. \qquad (2.16)$$

Формули (2.15) і (2.16) є вираженням важливих енергетичних співвідношень в АГ, а саме:

1) якщо обмотку ротора закорочено, то електромагнітна потужність $P_{ем}$S є не чим інше, як втратами в обмотці ротора $P_{м_2}$; отже, АГ із закороченою обмоткою ротора буде працювати з високим ККД тільки при малих ковзаннях;

2) тільки частина механічної потужності перетвориться на електромагнітну.

2.5. Автономний асинхронний генератор

Генераторний режим роботи АМ розглянуто в підрозд. 2.1. При цьому з'ясовано, що синхронний генератор виробляє активну $P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ і реактивну $Q_1 = 3U_1 I_1 \sin\varphi_1$ потужності (рис. 2.6), де U_1 – фазна напруга, I_1 – фазний струм, який СГ віддає у зовнішнє коло.

Частина реактивної потужності $Q_2 = 3U_1 I_2 \sin\varphi_2$, яку споживає АГ, витрачається на створення магнітного потоку Φ_{1_m} в АГ. Друга частина Q_1 спожи-

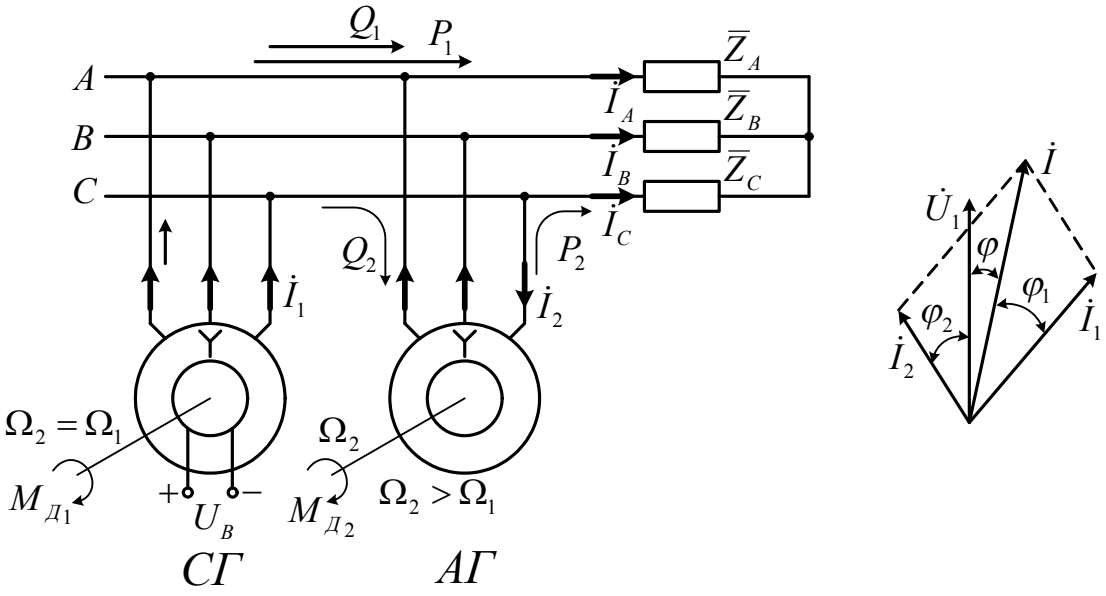


Рис. 2.6

вається навантаженням. Активна потужність $P_2 = 3U_1 I_2 \cos\varphi_2$ (де I_2 – фазний струм), яку виробив АГ, віддається зовні. Таким чином, потужність P, яку споживає зовнішнє коло, буде дорівнювати сумі потужностей P_1 і P_2, а струм $\dot{I}$ у цьому колі – сумі струмів $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_2$.

Розглянемо схему на рис. 2.7, на якій зображено АГ, що працює паралельно з мережею і споживає з неї реактивний (індуктивний) струм $\dot{I}_L = \dot{I}_{2_p}$. Цей струм створює в генераторі магнітний потік Φ_{1_m}, тоді як активний струм АГ повністю споживається місцевим споживачем $(R_A = R_B = R_C)$. Підімкнемо тепер до АГ конденсатори $(C_A = C_B = C_C)$ такої ємності, щоб ємнісний струм $\dot{I}_C$, що спо-

живається ними з мережі, за величиною дорівнював струму $\dot{I}_L$. Оскільки струми $\dot{I}_C$ і $\dot{I}_L$ стосовно фазної напруги U_1 знаходяться у протифазі, тоді

$$\dot{I}_C + \dot{I}_L = 0.$$

Тому рубильник P можна підімкнути і асинхронний генератор АГ буде працювати на ізольовану мережу із приймачами R_i іC, які з індуктивностями АГ складають послідовний коливальний контур. У коливальному контурі проходить обмін енергіями між магнітним і електричним полями. При цьому, з одного боку, генератор продовжує споживати струм $\dot{I}_L = \dot{I}_{2p}$, а з іншого боку, конденсатори продовжують споживати струм $\dot{I}_C = \dot{I}_L$. Із цього можна зробити такі висновки:

1) джерелами реактивного намагнічувального струму $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_L$ для генератора тепер є конденсатори;

2) твердження «конденсатор споживає з мережі (або від асинхронного генератора) ємнісний струм» і «конденсатор віддає в мережу (або асинхронному генератору) індуктивний струм» є рівноцінними;

3) рівноцінними також є твердження «асинхронна машина споживає з мережі індуктивний струм» і «асинхронна машина віддає в мережу ємнісний струм».

На практиці терміни «реактивний струм» і «реактивна потужність» для енергетичних систем прийнято пов'язувати зі струмом, що відстає (індуктивним), при цьому кажуть, що конденсатори віддають у мережу реактивний струм і реактивна потужність є джерелом реактивної потужності.

Зі сказаного випливає, що при чисто активному навантаженні асинхронного генератора потужність конденсаторів має дорівнювати реактивній (намагнічувальній) потужності генератора. Якщо навантаження буде мати змішаний активно-індуктивний характер, то потужність конденсаторної батареї необхідно відповідно збільшити, щоб вона перекривала також реактивну потужність навантаження. При змішаному активно-ємнісному навантаженні потрібна конденсаторна батарея меншої потужності, а за певних умов ця батарея стає зайвою.

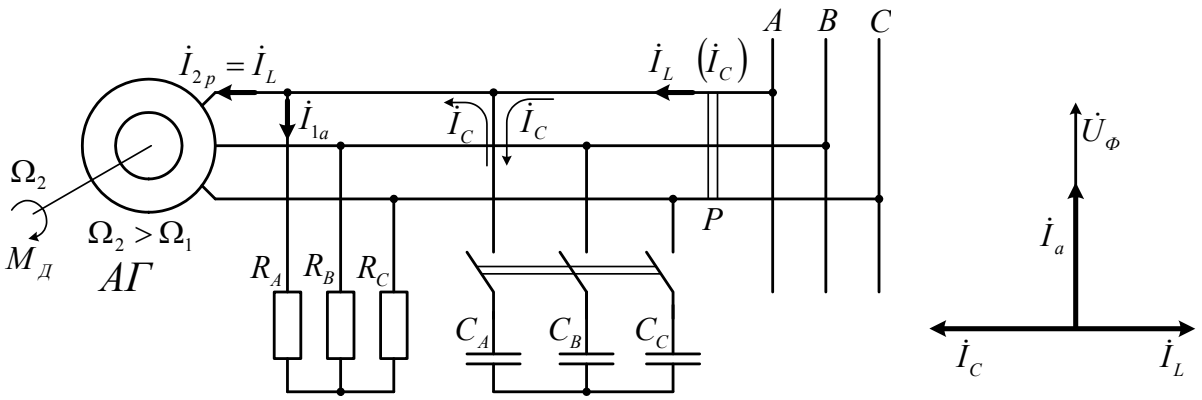


Рис. 2.7

Струм I_c створює магнітний потік, що складається з основного потоку розсіяння Φ_{1_m}, який замикається по магнітопроводу і повітряному зазору, і потоків розсіяння обмотки статора Φ_{p_1} й обмотки ротора Φ_{p_2}. Потоки розсіяння замикаються навколо провідників обмоток в основному по повітрю, унаслідок чого вони істотно обмежуються.

Магнітні поля ААГ визначають індуктивні опори x_0, x_1 і x_2'.

Якщо вважати, що ротор є нерухомим, а поле обертається відносно статора й ротора з однієї й тією самою швидкістю Ω_1, то для будь-якого режиму роботи ААГ можна записати рівняння, які є вираженням зв'язку між струмами й напругами при симетричному навантаженні:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 R_1 - jx_1 \dot{I}_1;$$

$$\dot{E}_2' = (jx_{2_H} - \frac{R_2'}{S})\dot{I}_2';$$

$$\dot{I}_{1_0} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'.$$

Перше з рівнянь стосується фазної напруги $\dot{U}_1$ ААГ, що менше від ЕРС $\dot{E}_1$ на величину внутрішнього спаду напруги $\dot{I}_1(R_1 + jx_1)$.

Із другого рівняння видно, що ЕРС $\dot{E}_2'$ урівноважується спадом напруги на опорі фази обмотки ротора.

Третє рівняння, якщо не враховувати струм холостого ходу $\dot{I}_{1_0}$, зводиться до вигляду

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2',$$

звідки випливає, що струм фази обмотки ротора спрямовано проти струму фази обмотки статора, тобто він є розмагнічувальним.

Основним рівнянням відповідає схема заміщення (рис. 2.8). Тут показано активний додатковий опір $R_2' \dfrac{1-S}{S}$.

Якщо ввести його умовно в коло ротора й надати ковзанню від'ємних значеннь, то вхідна (роторна) обмотка нібито вмикається на напругу мережі:

$$-\dot{U}_2' = -\dot{I}_2' R_2' \frac{1-S}{S},$$

причому

$$\left| R_2' \frac{1-S}{S} \right| = \left| \frac{R_2'}{S} \right| + R_2'.$$

Опір $R_2' \dfrac{1-S}{S}$ можна назвати генерувальним елементом, оскільки активна потужність, яку розвиває асинхронний генератор при заданому ковзанні, або по-

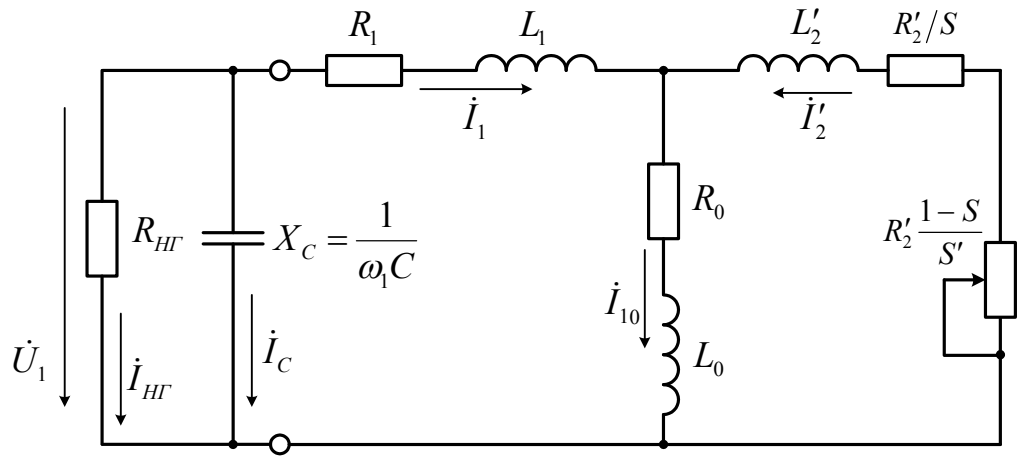


Рис. 2.8

тужність на вході визначається зі співвідношення

$$P'_2 = mR'_2 \frac{1-S}{S} I'^2_2,$$

де m – кількість фаз.

Частина цієї потужності покриває електричні втрати у роторі, інша – електромагнітним шляхом передається в коло статора і являє собою електромагнітну потужність, значення якої є від'ємним:

$$P = m_1 I'^2_2 \frac{R'_2}{S},$$

що є свідченням на змінення її передачі порівняно з режимом двигуна.

До схеми заміщення крім зазначених параметрів належать:

– повний наведений опір фази ротора

$$\underline{Z'_2} = R'_2 + jx'_2;$$

– індуктивний опір взаємоіндукції

$$\underline{Z'_0} = R'_0 + jx'_0,$$

де R'_0 – фіктивний активний опір, який вводиться в схему заміщення для врахування втрат у сердечнику статора.

Зовнішніми опорами схеми є такі:

– опір навантаження:

$$\underline{Z}_H = R_H \pm jx_H,$$

(активно-індуктивне навантаження має знак « + », а активно-ємнісне – знак «–»);

– опір конденсатора

$$\underline{Z}_C = -jx_C.$$

Основним рівнянням ААГ відповідає векторна діаграма, що будується таким чином. Прийнявши за базу відліку дійсну вісь і те, що початкова фаза магнітного потоку $\dot{\Phi}_{1_m}$ дорівнює нулю, поєднаємо вектор $\dot{\Phi}_{1_m}$ з базою відліку. Вектор струму холостого ходу випереджає магнітний потік на кут магнітного запізнювання.

Магнітне поле ААГ обертається навколо статора й ротора в протилежні боки. Тому $\dot{E}_1$ і $\dot{E}'_2$, які індукуються обертовим магнітним полем в обмотках статора й ротора, знаходяться у протифазі.

Будуємо вектори $\dot{E}_1$ й $\dot{E}'_2$ такими, що відстають від $\dot{\Phi}_{1_m}$ на чверть періоду, а також вектор $-E'_2$. Струм фази обмотки ротора $\dot{I}'_2$ відстає від ЕРС $\dot{E}'_2$ на кут φ_2, причому

$$tg\,\varphi_2 = -tg\frac{Sx'_{2_H}}{R'_2} > 0.$$

Відповідно до рівняння напруг фази обмотки ротора

$$\dot{E}'_2 = (jx'_{2_H} - \frac{R'_2}{S})\dot{I}'_2$$

будуємо вектори $jx'_{2_H}\dot{I}'_2$ і $\frac{R'_2}{S}\dot{I}'_2$.

З рівняння струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1_0} - \dot{I}'_2$ видно, що різниця векторів $\dot{I}_{1_0}$ і $\dot{I}'_2$ визначає напрямок і величину вектора $\dot{I}_1$.

Згідно з рівнянням напруг фази обмотки статора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - jx_1\dot{I}_1 - \dot{I}_1R_1$$

напрямок і величину вектора $\dot{U}_1$ визначає сума векторів $\dot{E}_1$, $-x_1\dot{I}_1$, $-\dot{I}_1R_1$.

При активно-індуктивному навантаженні $\underline{Z}_H = R_H + jx_H$ вектор струму навантаження $\dot{I}_1$ відстає від $\dot{U}_1$ на кут $\varphi_H = arctg\frac{x_H}{R_H}$.

Відповідно до першого закону Кірхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 - \dot{I}_C.$$

Струм конденсатора випереджає $\dot{U}_1$ на кут $\frac{\pi}{2}$.

Векторну діаграму показано на рис. 2.9.

Потужність, що генерується, є пропорційною активній складовій струму статора:

$$P_1 = m_1U_1I_1\cos\varphi_1,$$

або

$$P_1 = m_1U_1|OB|.$$

Відрізок AB відповідає реактивній потужності навантаження; відрізок BP – реактивній потужності генератора.

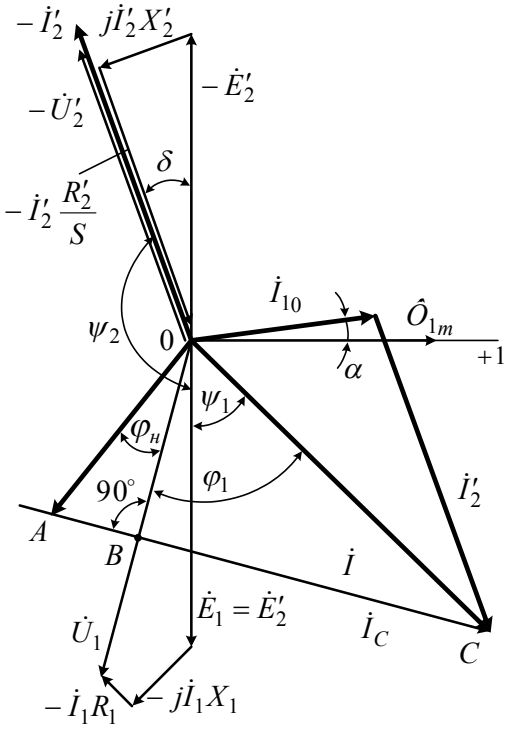


Рис. 2.9

Якщо активна потужність, що генерується, $P_1 = const$, то пряма AB є геометричним місцем кінців векторів струму навантаження.

Струми статора $\dot{I}_1$, навантаження $\dot{I}$ й конденсатора $\dot{I}_C$ зв'язані залежністю

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + \dot{I}_C,$$

де

$$\dot{I}_C = I_1 \sin\varphi_1 \pm I \sin\varphi_H.$$

З останнього виразу бачимо, що якщо вектори струму навантаження $\dot{I}$ й напруги $\dot{U}_1$ зсунуті за фазою на кут φ, то при $\varphi > 0$ має місце нерівність $I_C > I_1 \sin\varphi_1$. Тоді струм конденсатора можна зобразити вектором

$$\dot{I}_C = \overline{AB} + \overline{BC}.$$

Складова цього вектора $\overline{AB} = \dot{I} \sin\varphi_H$.

За векторною діаграмою на рис. 2.9 можна визначити енергетичні показники асинхронного генератора (без урахування механічних втрат).

Автономний асинхронний генератор – це електрична машина із самозбудженням. Умови самозбудження автономного асинхронного генератора:

– самозбудження пояснюється залишковою намагніченістю ротора, тобто осердя ротора має залишкову магнітну індукцію;

– параметричне самозбудження, у якому механізм його виникнення пов'язується зі збільшенням струму;

– енергетичне самозбудження, яке дає кількісний аналіз процесу самозбудження при врахуванні умови, що підведена до контуру енергія не менша за ту, яка втрачається.

Отже, для виникнення електричних коливань в ААГ необхідно, щоб система (див. рис. 2.8) перебувала в резонансному стані.

2.6. Характеристика холостого ходу автономного асинхронного генератора

З'ясувавши в загальних рисах роботу асинхронного генератора із самозбудженням у сталому режимі, розглянемо процес його самозбудження на холостому ходу, не враховуючи активні опори (див. рис. 2.8).

У зв’язку з наявністю потоку залишкової магнітної індукції у фазі обмотки статора ААГ індукується залишкова ЕРС E_0 (див. рис. 2.9). Ця ЕРС викликає в конденсаторах струм I'_C, який, протікаючи по обмотці статора ААГ, підсилює його магнітний потік, унаслідок чого ЕРС, яка індукується, і струм конденсатора

збільшуються.

На рис. 2.10, а залежність ЕРС E_1, що індукується в обмотці статора генератора від намагнічувального струму конденсатора I_C, зображено у вигляді кривої холостого ходу або кривої намагнічування $(x_1 + x_0)I_C$. Пряма $U_C = x_C I_C$ визначає залежність напруги конденсатора від його струму. Процес самозбудження умовно зображено східчастою лінією. ЕРС залишкового магнітного потоку викликає в конденсаторі струм

$$I'_C = \frac{E_0}{\mathrm{x_C}} = \omega C E_0.$$

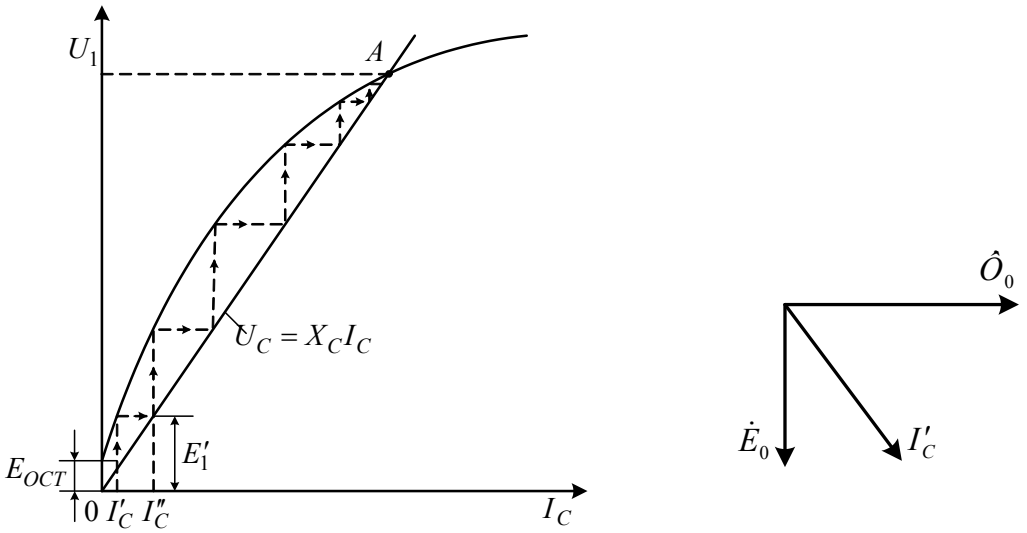
Цей струм, протікаючи по обмотці статора машини, індукує в ній ЕРС E'_1, що викликає в конденсаторі струм I''_C, який індукує ЕРС E''_1, і т.д. Процес самозбудження триває доти, доки

$$(x_1 + x_0)I_C > x_C I_C,$$

і закінчується, коли внаслідок збільшення насичення опір x_0 зменшується настільки, що виконується рівність

$$(x_1 + x_0)I_C = x_C I_C \qquad (2.17)$$

(точка А на рис. 2.10).



а б

Рис. 2.10

Очевидно, що процес самозбудження асинхронного генератора багато в чому аналогічний процесу самозбудження генератора постійного струму.

Вище передбачалося, що початковий поштовх струму статора при самозбудженні виникає внаслідок дії потоку залишкової магнітної індукції. Разом з тим початковим поштовхом може стати також струм розряду попередньо зарядженої

конденсаторної батареї.

Підставимо в (2.17) значення $x_1 = 2\pi f L_1$, $x_0 = 2\pi f L_0$ і $x_C = \dfrac{1}{2\pi f C}$ і вирішимо його відносно C:

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 (L_1 + L_0)}. \tag{2.18}$$

За формулою (2.18) обчислюється ємність конденсаторів, яка є необхідною для самозбудження ААГ при частоті f.

Якщо вважати, що магнітне коло є ненасиченим і втрати в сталі малими, то схему заміщення ААГ у режимі холостого ходу можна подати у вигляді двополюсника (рис. 2.11), до якого підключено навантаження $\dfrac{R_2'}{S}$.

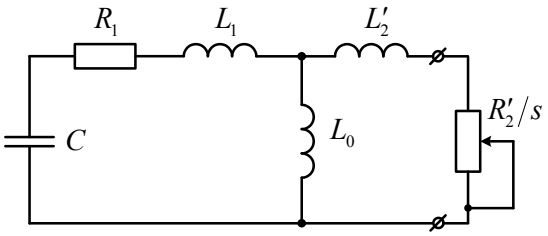


Рис. 2.11

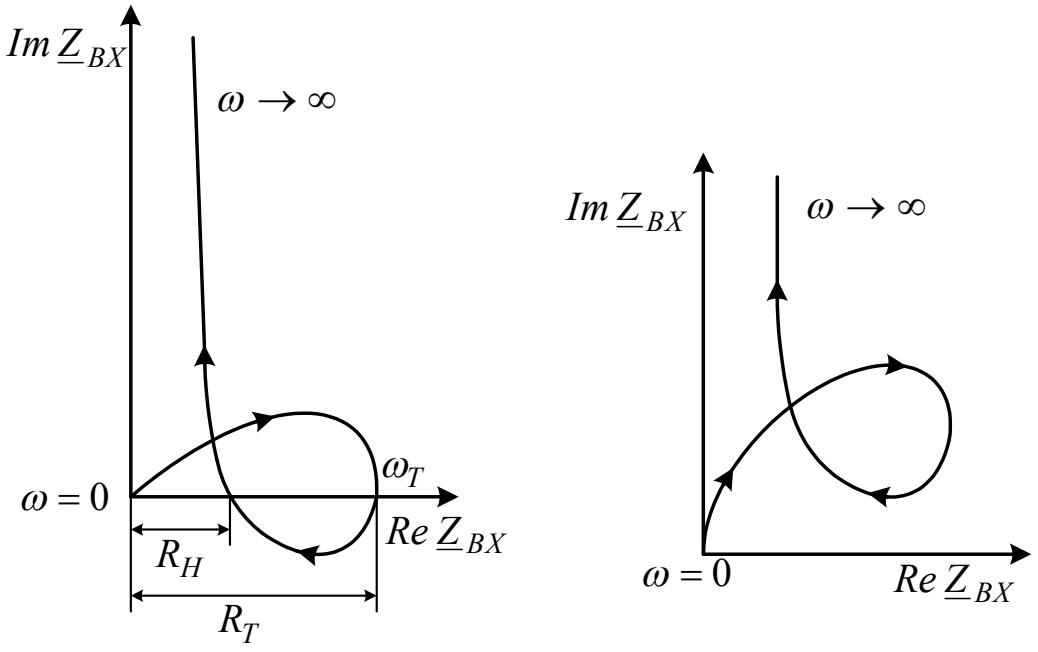
Як зазначалося в підрозд. 2.6, для виникнення електричних коливань необхідно, щоб система перебувала в резонансному стані, тобто вхідний опір двополюсника $1-1'$ при резонансі був би чисто активним:

$$\underline{z}_{вх} = j\omega L_2' + \frac{j\omega L_0 (R_1 + j\omega L_1 + \dfrac{1}{j\omega C}}{R_1 + j\omega (L_1 + L_0) + \dfrac{1}{j\omega C}}. \tag{2.19}$$

Умові резонансу відповідає рівність нулю уявної частини (2.19). Тому в цій формулі необхідно виділити дійсну $\mathrm{Re}\,\underline{z}_{вх}$ й уявну $\mathrm{Im}\,\underline{z}_{вх}$ частини. Прирівнявши до нуля $\mathrm{Im}\,\underline{z}_{вх}$ і розв'язавши (2.19) відносно ω при заданих значеннях параметрів схеми заміщення ААГ, визначимо резонансні частоти й обчислимо $\mathrm{Re}\,\underline{z}_{вх}$ і $\mathrm{Im}\,\underline{z}_{вх}$.

На рис. 2.12 зображено годографи $z(j\omega)$ зі зміненням кутових частот $0 \le \omega < \infty$ при існуванні резонансу струму й напруги (рис. 2.12, а) в ААГ, при збудженні й за відсутності збудження (рис. 2.12, б).

З розглянутого виразу (2.18) випливає, що виконання умов $\mathrm{Im}\,\underline{z}_{вх} = 0$ є можливим тільки в тому випадку, якщо значення ємності конденсатора збудження $C_T < C < C_H$. При виконанні цієї умови годограф перетинає дійсну вісь у двох точках з координатами $z_1 = R_H$ і $z = R_T$ при частотах ω_T і ω_H, що відповідають умовам резонансу струмів ω_T і напруг ω_H.



а б

Рис. 2.12

2.7. Частота генерованих коливань при холостому ході й навантаженні

Зв'язок між швидкістю обертання магнітного поля Ω_1 й швидкістю обертання ротора Ω_2 ААГ можна навести у вигляді співвідношення

$$\Omega_1 = \frac{\Omega_2}{1-S},$$

що випливає з означення ковзання. Ковзання в режимі генератора $-\infty < S < 0$.

Швидкість обертання магнітного поля статора

$$\Omega_1 = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p},$$

а швидкість обертання магнітного поля ротора

$$\Omega_2 = \frac{2\pi f_2}{p}.$$

Підставивши значення Ω_1 й Ω_2 у формулу швидкості обертання магнітного поля, одержимо вираз для частоти генерованих коливань при навантаженні, взявши при цьому, що ємність конденсаторів і швидкість обертання ротора не змінюються:

$$f = \frac{f_2}{1-S}.$$

Якщо в режимі холостого ходу ємність конденсатора й швидкість обертан-

ня ротора залишаються постійними, то частоту f генерованих коливань можна визначити через параметри послідовного коливального контуру, що утвориться фазою обмотки статора й конденсатором.

При резонансі напруг індуктивний спад напруги й спад напруги на конденсаторі є однаковими, але перебувають у протифазі:

$$u_{L_1}(t) + u_C(t) = 0.$$

У цьому рівнянні

$$u_{L_1} = L_1' \frac{di_1}{dt},$$

а струм у коливальному контурі визначається швидкістю змінення напруги конденсатора:

$$i_1 = C \frac{du_C}{dt},$$

отже,

$$\frac{di_1}{dt} = C \frac{d^2 u_C}{dt^2}.$$

З урахуванням цього рівняння напругу можна записати в такому вигляді:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{u_C}{L_1' C} = 0.$$

Якщо взяти, що напруга $u_C(t)$ змінюється за синусоїдальним законом

$$u_C(t) = U_{C_m} \sin \omega t,$$

то

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = -\omega^2 U_{C_m} \sin \omega t.$$

Із урахуванням u_C і $\frac{d^2 u_C}{dt^2}$ з диференціального рівняння одержимо

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1' C}},$$

або

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1' C}}.$$

Таким чином, частота генерованих коливань при холостому ході ААГ визначається з умови резонансу розглянутого послідовного коливального контуру.

Якщо взяти, що при холостому ході $S = 0$, тобто $\Omega_1 = \Omega_2$, то частота генерованих коливань

$$f = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1' C}}.$$

Отже, при холостому ході ААГ параметри коливального контуру автоматично настроюються на частоту $f_2 = f_1$.

Змінення ємності конденсатора при $\Omega_2 = const$ або швидкості обертання ротора при $C = const$ не порушує рівності

$$f = \frac{1}{\sqrt{L_1' C}}.$$

У першому випадку буде одна характеристика холостого ходу, що відповідає певному значенню Ω_2, і одна сім'я вольт-амперних характеристик конденсатора, причому кожна з характеристик утворює з позитивним напрямком осі абсцис кут

$$\alpha_k = arctg \frac{1}{\omega C_k},$$

де k = 1, 2, 3...

При цьому добуток індуктивності намагнічувального контуру і ємності конденсаторів залишається майже постійним, тобто

$$L_{1_k}' C_k = const,$$

тому що внаслідок нелінійності кривої намагнічування відбувається відповідне змінення індуктивності. Так, зі збільшенням ємності струм холостого ходу й ступінь насичення магнітного кола ААГ збільшуються, а індуктивність L_1' зменшується.

У другому випадку, тобто при переході до нового значення Ω_2 з ємністю $C = const$, маємо сім'ю характеристик холостого ходу й сім'ю вольтамперних характеристик конденсаторів. Кути нахилу останніх до позитивного напрямку осі абсцис знаходимо за співвідношенням

$$\alpha_к = arctg \frac{1}{\omega_к C}.$$

ЕРС E_1 для кожного значення швидкості Ω_2 визначається точкою перетину характеристики холостого ходу й ВАХ конденсаторів для певної частоти $\omega_к$.

При навантаженні частота генерованих коливань при $\Omega_2 = const$ трохи зменшується, тому що збільшується момент, що призводить до збільшення ковзання (див. рис. 2.5).

З іншого боку, зменшення f при $C = const$ пояснюється тим, що збільшу-

ється власна індуктивність фази обмотки статора внаслідок збільшення взаємної індуктивності, яку викликає дія розмагнічувального струму ротора.

2.8. Навантажувальний режим роботи автономного асинхронного генератора

На основі теорії, яку розглянуто в підрозд. 2.3, ААГ має споживати реактивну потужність Q_1, що витрачається на створення полів розсіяння статора, основного магнітного потоку й полів розсіювання ротора. При підімкненні до генератора індуктивно-активно-індуктивного навантаження $\underline{z}_H = R_H + jx_H$ реактивна потужність Q_H коливається між споживачем і генератором. Таким чином, конденсатори мають компенсувати своєю реактивною потужністю реактивну потужність ААГ і споживача:

$$Q_C = Q_1 + Q_H . \tag{2.20}$$

Автономний асинхронний генератор перетворить механічну потужність на електричну P_{2_H}, яку віддає в зовнішнє коло. Знаючи кути зсуву фаз між напругою генератора $\dot{U}_{1H}$ і струмом навантаження $\dot{I}_H$, напругою конденсатора $\dot{U}_C$ і струмом генератора $\dot{I}_{1H}$, можна записати:

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_{2H} tg\varphi_1; \\ Q_H &= P_{2H} tg\varphi_H . \end{aligned} \tag{2.21}$$

Підставимо в (2.20) $Q_C = \dfrac{m_1 U_C^2}{x_C} = m_1 U_C^2 2\pi f C$, вирази (2.21) і розв'яжемо отримане співвідношення відносно ємності конденсатора:

$$C = P_{2_H} \frac{tg\varphi_1 + tg\varphi_H}{2\pi f m_1 U_C^2} . \tag{2.22}$$

Відповідно до (2.22) ємність C можна поділити на дві частини: постійну $C_в$, необхідну для самозбудження генератора в режимі холостого ходу, і змінну C_H, необхідну для компенсації реактивної потужності навантаження.

2.9. Характеристики автономного асинхронного генератора

При ввімкненні генератора на навантаження при $\Omega_2 = const$ і $C = const$ відбувається зменшення частоти, що індукується у фазі обмотки якоря ЕРС. Для одержання постійної частоти достатньо регулювати швидкість обертання ротора Ω_2, при якій швидкість обертання магнітного поля Ω_1 залишається постій-

ною. У зв'язку із цим розрізняють характеристики ААГ при постійній (номінальній) швидкості обертання Ω_2 і постійній (номінальній) частоті f.

До основних належать характеристики холостого ходу, зовнішня, навантажувальна, регулювальна й частотна.

У режимі холостого ходу при $\Omega_2 = \Omega_{2H} = const$, $f = const$ і $I_{H\Gamma} = 0$ характеристика при постійній швидкості обертання Ω_2 збігається із характеристикою при постійній частоті f (див. рис. 2.7):

$$E_1 = f(I_c).$$

Зовнішня характеристика ААГ являє собою залежність напруги на його затискачах від струму навантаження:

$$U_1 = f(I_{H\Gamma})$$

за умови, що $\Omega_2 = \Omega_{2H} = const$, $C = const$ і $\cos\varphi_H = const$ або $f = f_H = const$, $C = const$, $\cos\varphi_H = const$ відповідно, де $\cos\varphi_H$ – коефіцієнт потужності навантаження.

Зовнішня характеристика визначається залежністю $U_1 = f(I_H)$ при $f = f_H$, $C = const$ і $\cos\varphi_H = const$ є відображенням зміни напруги ААГ при зміненні величини навантаження. Вигляд зовнішніх характеристик при різних характерах навантаження показано на рис. 2.13. Передбачається, що величина ємності конденсатора є визначенням струму I_C, при якому у фазі обмотки якоря індукується ЕРС, що забезпечує номінальний режим роботи ($U_1 = U_{1H}$, $I_H = I_{HH}$, $\cos\varphi = \cos\varphi_H$, $f = f_H$).

Вигляд зовнішніх характеристик ААГ пояснюється характером процесів, що відбуваються у коливальному контурі конденсатор – обмотка якора. При чисто активному навантаженні (крива 1 на рис. 2.13) потужність конденсаторів має дорівнювати намагнічувальній потужності генератора $Q_C = Q_1$. Якщо ж навантаження індуктивно-активно-індуктивне (крива 2), то потужність конденсаторів має забезпечувати також компенсацію реактивної потужності навантаження ($Q_C = Q_1 + Q_H$).

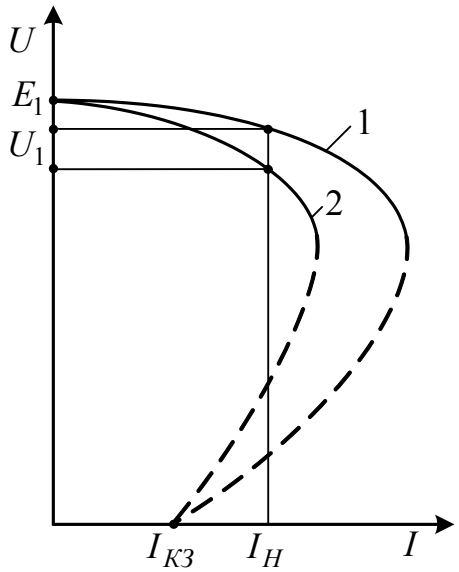


Рис. 2.13

Згідно з другим законом Кірхгофа рівняння напруг фази обмотки якоря можна записати в такому вигляді:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(R_1 + jx_1),$$

де R_1 – активний опір фази обмотки якоря; x_1 – індуктивний опір розсіяння обмотки якоря.

При збільшенні струму навантаження I_H, а отже, і струму фази обмотки якоря $\dot{I}_1$ при $f = const$ й активному або індуктивно-активно-індуктивному характері навантаження напруга зменшується з двох причин: через швидкий спад напруги в обмотці якоря $I_1 z_1$ і зменшення ЕРС унаслідок зменшення магнітного потоку $\dot{\Phi}_{1m}$. Останнє пояснюється тим, що зменшення U_1 зменшує $I_C = \dfrac{U_1}{x_C}$ ($C = const$, $f = const$), а також зі збільшенням струму навантаження I_H збільшується опір x_0 намагнічувального контуру. Якщо підтримувати постійною не частоту f, а швидкість обертання ротора генератора Ω_2, то напруга зменшується також через зменшення частоти f.

При короткому замиканні генератора $U_1 = 0$, $I_C = 0$, отже в обмотці якоря індукується залишкова ЕРС $E_0 << E_1$ (див. рис. 2.10).

Таким чином, струм короткого замикання генератора визначається залишковою ЕРС E_0 і внутрішнім опором фази обмотки якоря z_1:

$$I_{кз} = \frac{E_0}{z_1} < I_{H_{ГН}}.$$

Навантажувальна характеристика являє собою залежність напруги генератора на його затискачах від струму конденсатора:

$$U_1 = f(I_C)$$

за умови, що $\Omega_2 = \Omega_{2_H} = const$, $I_{H\Gamma} = const$ і $\cos\varphi_H = const$ або $f = f_H = const$, $I_{H\Gamma} = const$ і $\cos\varphi_H = const$.

Усі споживачі розраховуються на номінальну напругу, тобто при будь-якому навантаженні напруга на затискачах ААГ має бути номінальною. Відповідно до рівняння напруг цю умову можна виконати, якщо буде змінюватися ЕРС, тобто струм збудження. Величина струму збудження визначається ємністю конденсатора.

Таким чином, регулювальна характеристика являє собою залежність струму конденсатора від струму навантаження:

$$I_C = f(I_{H\Gamma})$$

при номінальному U_{1_H}, $\Omega_2 = \Omega_{2_H} = const$, $\cos\varphi_H = const$ або відповідно при номінальному U_{1_H}, $f = f_H = const$, $\cos\varphi_H = const$.

Вигляд регулювальних характеристик показано на рис. 2.14, причому пе-

редбачається, що для всіх зображених характеристик величина U_H є однаковою. Вигляд регулювальних характеристик пояснюється процесами, що відбуваються у послідовному коливальному контурі, який являють собою конденсатор і фаза обмотки якоря.

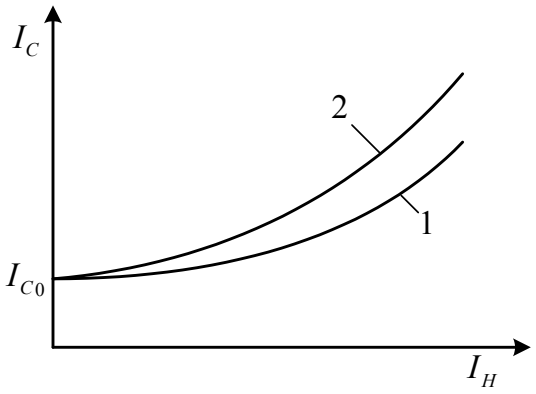


Рис. 2.14

При холостому ході $I_{H_Г} = 0$ струм конденсатора I_{C_0} забезпечує величину магнітного потоку $\dot{\Phi}_{1m}$, що у фазі обмотки якоря индукує $E_1 = U_{1H}$. Збільшення I_H призведе до збільшення I_1 і зменшення U_1, отже згідно з (2.23), щоб $U_1 = U_H$, необхідно збільшити E_1, тобто I_C при $f = f_H$ (активне навантаження, крива 1). При струмі, що відстає (індуктивно-активно-індуктивне навантаження, крива 2), струм I_C є більшим, ніж при активному навантаженні при тому самому струмі навантаження. Це пояснюється тим, що потужність конденсатора $Q_C = I_C^2 x_C$ має компенсувати реактивну потужність не тільки генератора, але й навантаження ($Q_C = Q_1 + Q_H$).

При збільшенні струму навантаження $I_{H_Г}$ збільшується електромагнітний момент ААГ, що є гальмівним для первинного двигуна.

Отже, зі збільшенням $I_{H_Г}$ збільшується ковзання S і зменшується частота f.

Таким чином, частотна характеристика дає змогу робити висновок про змінення частоти зі зміненням навантаження.

Тому її співвідносять з постійною швидкістю обертання ротора:

$$f = f(I_{H_Г})$$

при $\Omega_2 = \Omega_{2H} = const$, $C = const$, $\cos\varphi_H = const$.

Характеристику холостого ходу, навантажувальні характеристики ААГ й вольт-амперні характеристики конденсатора при $\Omega_2 = const$, $f = \text{var}$ показано на рис. 2.15.

Вольт-амперні характеристики конденсатора відповідають одній й тій самій ємності ($C = const$). Характерис-

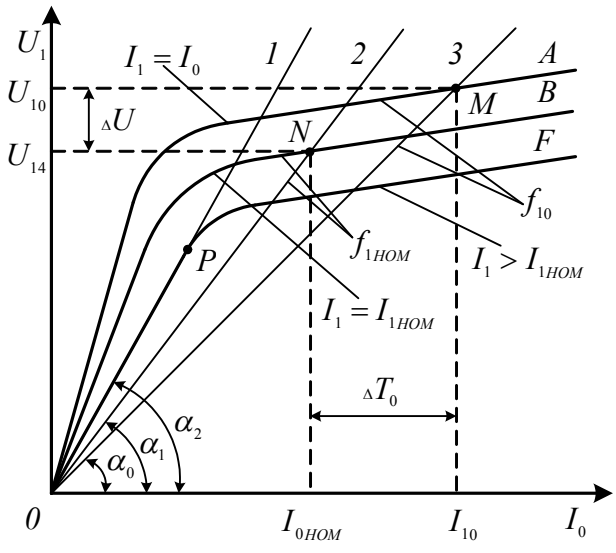


Рис. 2.15

тику холостого ходу (без урахування залишкової ЕРС) зображено кривою, що проходить через початок координат. Точці її перетину *M* з вольт-амперною характеристикою конденсатора (пряма *OM*) відповідає сталий режим, що характеризується напругою U_{1_0} і струмом холостого ходу I_{C_1}.

Після ввімкнення генератора на навантаження координати робочої точки, тобто точки перетину магнітної (навантажувальної) характеристики машини й вольт-амперної характеристики конденсатора, змінюються внаслідок змінення напруги й струму холостого ходу.

З переходом від режиму холостого ходу до режиму з номінальним навантаженням робоча точка переміщується з положення *M* на характеристиці холостого ходу в положення *N* на навантажувальній характеристиці *ONB*. Вольт-амперна характеристика конденсатора повертається в напрямку проти годинникової стрілки на кут $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$, що відповідає збільшенню реактивного опору конденсатора, обумовленому зменшенням частоти.

Змінення напруги й струму холостого ходу під час переходу від режиму холостого ходу до режиму з номінальним навантаженням визначається за співвідношеннями

$$\Delta U = U_{1_0} - U_{1_{ном}};$$

$$\mathrm{I_C} = I_{C_1} - I_{C_{ном}}.$$

Зі збільшенням навантаження вольт-амперна характеристика конденсатора продовжує повертатися проти годинникової стрілки, а робоча точка – переміщатися в напрямку до точки *P*. При цьому генератор усе більше розмагнічується, що супроводжується зменшенням напруги на його затискачах. З переходом робочої точки в ненасичену область *OP* напруга різко зникає. Режим самозбудження машини зберігається до деякого певного навантаження, що характеризує межу статичної стійкості машини.

Експериментальні характеристики ААГ змінної частоти f при $\Omega_2 = const$ одержують досить просто, однак теоретичне дослідження режимів його роботи значно утруднено. Тому кожному довільно взятому навантаженню відповідає цілком певна частота, всі реактивні параметри системи асинхронний генератор – навантаження стають функціями ковзання. Із цього випливає, що доцільніше розглядати характеристики автономного асинхронного генератора при постійній частоті зі змінною швидкістю обертання ротора Ω_2. Тоді всі режими роботи генератора можна дослідити з допомогою схем заміщення й векторних діаграм.

3. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

(Лабораторія електричних машин)

Порядок виконання

1. Ознайомитися з конструкцією і паспортом асинхронного трифазного двигуна (АД).

2. Зняти робочі характеристики АД: $M, S, \Omega_2, I_1, P_1, \cos\varphi_1, \eta = f(P_2)$ при $U_1 = U_{1_H}$.

3. Зняти механічну характеристику АД $\Omega_2 = f(M)$. За експериментальними даними побудувати робочі характеристики, непрямим методом визначити ККД АД.

Опис експериментального стенда

Експериментальне дослідження АД виконують на стенді, на якому розміщено комутаційну апаратуру, перетворювач частоти (ПЧ), вимірювальний комплект К-505. З допомогою цього комплекту вимірюють фазні струми I_A, I_B, I_C, потужності P_A, P_B, P_C і напруги U_A, U_B, U_C.

Двигун живиться від трифазної мережі А, В, С через автоматичний вимикач. Механічне навантаження на вал АД створює генератор постійного струму з паралельним збудженням.

Швидкість обертання АД вимірюють з допомогою системи, до якої належать трифазний синхронний тахогенератор з магнітоелектричним збудженням, випрямний пристрій, зібраний за схемою Ларионова, і цифровий вольтметр.

Навантаження двигуна

У лабораторії навантаження асинхронного двигуна здійснюється з допомогою генератора постійного струму (ГПС).

У ГПС гальмівний момент виникає внаслідок взаємодії провідників зі струмом обмотки якоря з магнітним полем індуктора.

До якоря ГПС підключено реостат, величина опору якого R_H при номінальному струмі збудження є визначенням номінального режиму роботи генератора.

Струм в обмотці збудження індуктора регулюється реостатом.

Експериментальне дослідження

1. Підготовка до виконання лабораторної роботи:

а) перевірити електричне коло;

б) ознайомитися з приладами, апаратами й устаткуванням експериментальної установки;

в) записати до таблиць 3.1 – 3.3 параметри приладів, апаратів, асинхронного двигуна, генератора постійного струму й тахогенератора;

г) регулятор збудження $R_в$ довести до максимального значення опору ($R_{в_{max}}$);

д) регулятор ПЧ R_y має бути в крайньому правому положенні ($R_{y\,max}$);

е) граничні значення приладів для виміру струму, потужності й напруги слід добирати з урахуванням номінального режиму роботи АД.

Таблиця 3.1

Перелік аналогових вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експерименту.

№ п/п	Позиційне позначення	Найменування	Система приладу	Клас точності	Межі виміру	Ціна поділки

Таблиця 3.2

Перелік цифрових вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експерименту.

№ п/п	Позиційне позначення	Тип приладу	Марка приладу	Частота вимірюваної величини	Клас точності

Таблиця 3.3

Номінальні дані двигуна постійного струму

Тип двигуна				
P_{2H}, Вт	U_H, В	$I_{H,}$ А	Ω_{2_H}, з$^{-1}$	η_H

Пуск у хід двигуна

Для пуску АД застосовується перетворювач частоти (ПЧ).

Основними функціями ПЧ є пуск і регулювання швидкості обертання, прискорення, сповільнення, зупинка й захист двигуна і перетворювача.

Для ПЧ передбачено дистанційне й ручне керування. Лабораторним стендом керують уручну, для чого до аналогових входів ПЧ підключено зовнішній потенціометр R_y (рис. 3.1). Для живлення потенціометра в ПЧ передбачено малопотужне джерело з $U_{вих} = 10\,\text{В}$.

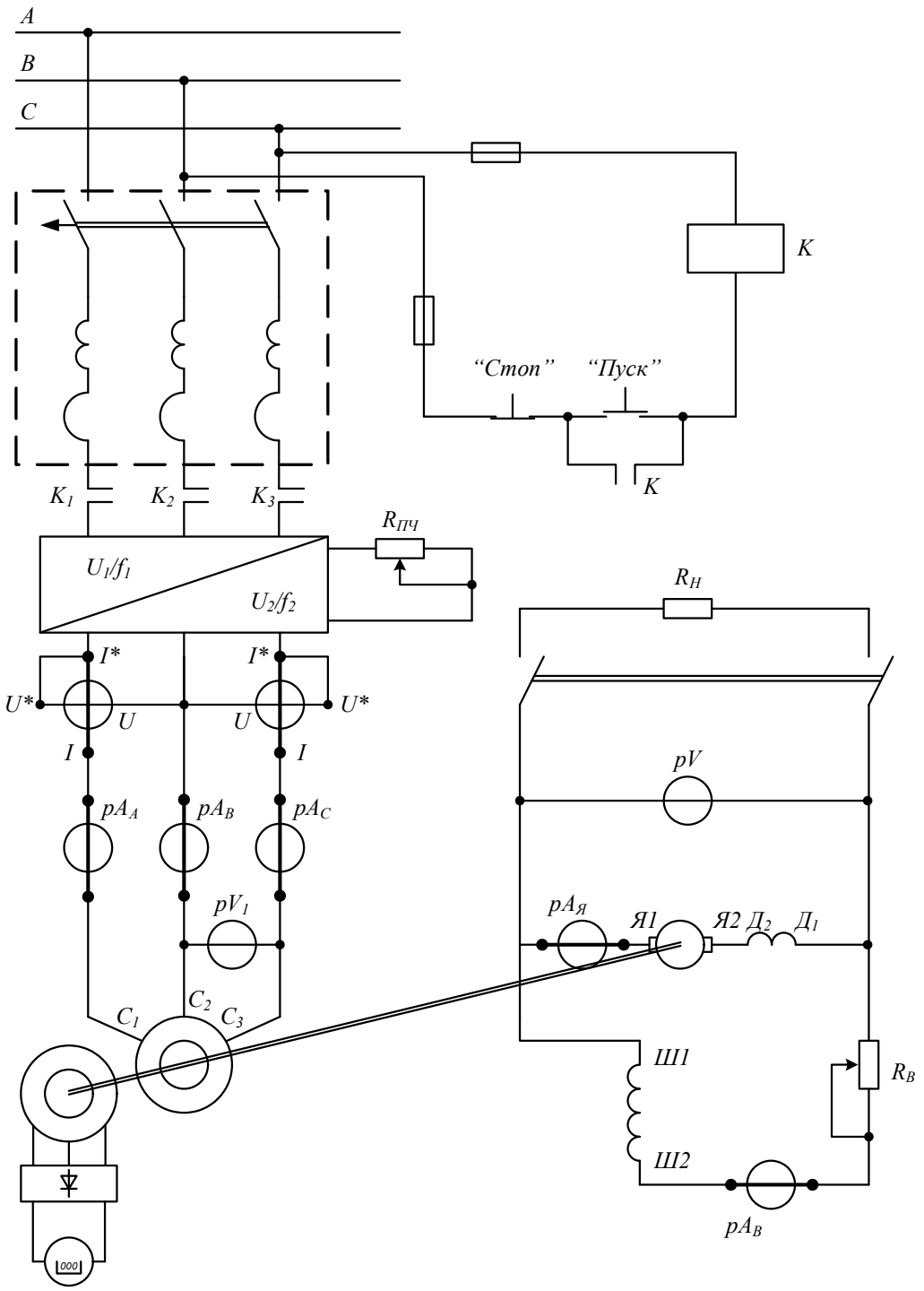


Рис. 3.1

Сигнал зі струмознімача потенціометра подається на аналоговий вхід. Переміщення струмознімача з одного крайнього положення в інше буде викликати змінення значення напруги на виході від $U_{1min} = U_{1_H}$ і частоти від $f_{\min}$ до $f_н$.

Порядок проведення експериментального дослідження:

1. Підімкнути ПЧ до трифазної мережі, натиснувши кнопку «Пуск».
2. З допомогою регулятора ПЧ збільшувати напругу U_1 і частоту f.

3. У момент початку обертання вала двигуна записати напругу, частоту, потужність і струм.

4. З допомогою регулятора частоти R_y установити номінальні значення U_{1_H} і $f_н$.

5. Змінюючи реостатом $R_в$ струм збудження ГПС, збільшити момент на валу АД до номінального, що відповідає струму у фазі обмотки статора $I_1 = I_{1_H}$. Дані досліду занести до табл. 3.4. Потім зменшуючи $I_в$ (збільшуючи $R_в$), виміряти чотири рази струм, зменшуючи його до струму холостого ходу.

6. Зменшивши частоту і ввімкнувши регулятор R_y ПЧ, зняти залежність $\Omega_2 = f(M)$ при $I_1 = 0{,}3I_{1_H}$.

Таблиця 3.4

U_1	*поділки/В*	
I_A	*поділки/А*	
I_B	*поділки/А*	
I_C	*поділки/А*	
I_1	*поділки/А*	
P_A	*поділки /Вт*	
P_B	*поділки /Вт*	
P_C	*поділки /Вт*	
P_1	*Вт*	
n_2	*об/хв*	
Ω_2	c^{-1}	
$P_{МГ} = 3I_1^2 \cdot R_1$	*Вт*	
$P_{ст1}$	*Вт*	
$P_{М1}+P_{ст1}$	*Вт*	
$P_{эм}$	*Вт*	
S		
$S \cdot P_{эм}$	*Вт*	
$P_{мех}$	*Вт*	
$Pоб$	*Вт*	
$\sum P$	*Вт*	
P_2	*Вт*	
η		
$\cos\varphi_1$		
M	*Н·м*	
M_2	*Н·м*	

Оброблення експериментальних даних

Втрати в сталі осердя статора, механічні й додаткові втрати наведено на робочому місці.

Розрахувати струм фази обмотки статора, потужність, що споживає з мережі АД, швидкість обертання Ω_2, втрати в міді обмотки статора P_{M_1}, сумарні втрати в статорі $P_{M_1} + P_{ст_1}$, електромагнітну потужність $P_{ем}$, ковзання S, потужність в обертовому роторі $SP_{ем}$, суму втрат потужності в АД, повну потужність на валу АД, ККД, коефіцієнт потужності АД $\cos\varphi_1$, електромагнітний момент М і момент M_2, що розвиває двигун.

Результати розрахунку занести до табл. 3.4. Побудувати робочі характеристики АД в загальній системі координат при U_{1_H} і f_H. З робочих характеристик знайти номінальні значення: Ω_{2_H}, $S_{\text{Н}}$, $M_{\text{Н}}$, I_{1_H}, $\cos\varphi_{1_{\text{Н}}}$ і η_H.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову і принцип роботи трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

2. Перелічіть способи пуску в хід асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

3. Як змінити швидкість обертання ротора асинхронного двигуна?

4. Як змінити напрямок обертання ротора асинхронного двигуна?

5. Як розрахувати номінальний момент АД за його номінальними даними?

6. Чим характеризується перевантажувальна здатність АД?

7. Як можна обмежити пусковий струм АД з короткозамкненим ротором?

8. Які характеристики називають робочими? Як їх одержати дослідним шляхом?

9. Чому змінюється ковзання асинхронного двигуна зі зміненням навантаження?

10. Поясніть характер змінення I_1, $\cos\varphi_1$ і η при зміненні корисної потужності P_2.

11. Як визначити ККД двигуна непрямим методом?

12. Перелічіть види втрат потужності в асинхронному двигуні. Від чого залежать ці втрати?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

(Лабораторія електротехніки)

Порядок виконання

1. Ознайомитися з конструкцією і паспортом трифазного асинхронного двигуна (АД).

2. Зняти робочі характеристики АД: $M, S, \Omega_2, I_1, P_1, \cos\varphi_1, \eta = f(P_2)$ при $U_1 = U_{1_H}$.

3. Зняти механічну характеристику АД $\Omega_2 = f(M)$. За експериментальними даними побудувати робочі характеристики.

Опис експериментального стенда

Експериментальне дослідження АД виконується на секції електричних машин стенда ЕВ-4. Джерелом живлення стенда є трифазна мережа з напругою $U_{Л} = 380$ В і частотою $f = 50$ Гц. У частині секції, яка знаходиться під столом, вмонтовано прилади, з допомогою яких вимірюють лінійні напруги й струм, а також трифазний ваттметр, з допомогою якого вимірюється активна потужність P_1, елементи комутації, сигналізації і т.ін.

У площині стола відповідно до схеми (рис. 3.2) встановлено мнемонічну панель для монтажу електричного кола.

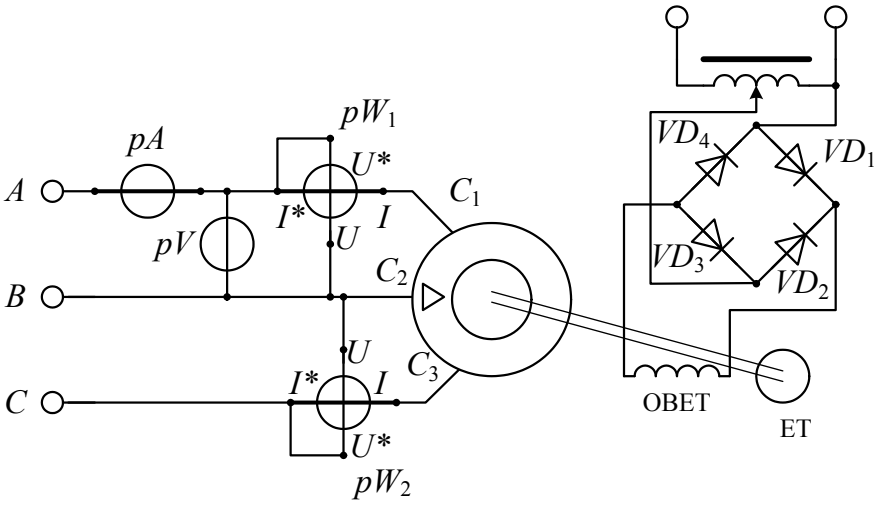


Рис. 3.2

Досліджуваний двигун розташовано в агрегаті 1, що знаходиться усередині секції електричних машин.

Агрегат 1 складається з двох електричних машин – АД і ГПС із паралельним збудженням.

Вали електричних машин з'єднано через навантажувальний пристрій, що являє собою асинхронну муфту ковзання, яка працює в режимі гальма.

З валом агрегата 1 через тимчасову передачу з'єднано тахогенератор постійного струму з магнітоелектричним збудженням. Для індикації вихідних параметрів тахогенератора застосовують цифровий вольтметр.

Пуск двигунів у хід

Оскільки потужність живильної мережі значно більша за потужність АД, в роботі застосовано прямий пуск – безпосереднє ввімкнення обмотки статора на повну напругу мережі.

Навантаження двигуна

У лабораторії навантаження здійснюється з допомогою асинхронної муфти ковзання в режимі гальма. У муфті гальмівний момент створюється внаслідок взаємодії вихрових струмів, які індукуються у сталевому диску, покладеному на вал двигуна, при обертанні диска в магнітному полі, створеному індуктором.

Обмотка індуктора живиться від джерела постійного струму ЕВ-4 секції електричних машин. Струм обмотки індуктора регулюється потенціометром, установленим на панелі ввімкнення агрегатів.

Індуктор асинхронної муфти фіксується відносно основи агрегата з допомогою тензометричної балки, на якій установлено тензодатчик. При збудженні

асинхронної муфти на валу двигуна створюється гальмівний момент, унаслідок чого реактивний момент прикладається до тензометричної балки. Сигнал, що знімається з тензодатчика, є пропорційним моменту, який створює електродвигун.

Підготовка до виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися із приладами, апаратами й устаткуванням експериментальної установки, записати їхні технічні характеристики в протоколі випробування. (табл. 3.5 – 3.7)

Таблиця 3.5

Перелік аналогових вимірювальних приладів, які використовують при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Найменування	Система приладу	Клас точності	Межі виміру	Ціна поділки

Таблиця 3.6

Перелік цифрових вимірювальних приладів, які використовують при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Тип приладу	Марка приладу	Частота вимірюваної величини	Клас точності

Таблиця 3.7

Номінальні дані двигуна постійного струму

Тип двигуна				
P_{2H}, Вт	U_H, В	$I_{H,}$ А	Ω_{2_H}, с$^{-1}$	η_H

2. Розрахувати кількість полюсів $2p$, номінальне значення лінійного струму й номінальний момент досліджуваного АД.

3. З допомогою однополюсних вилок на стенді зібрати електричне коло для дослідження АД згідно з рис. 3.2. ***При збиранні схеми необхідно переконатися, що на інших панелях схеми не зібрано.***

4. Ввімкнути регулятор струму збудження індуктора ($R_{в_{max}}$). Запросити викладача для перевірки правильності з'єднань.

Порядок проведення експериментального дослідження

1. Після перевірки викладачем правильності з'єднань підімкнути секцію до мережі автоматичним вимикачем, який розташовано під відкидним столом. Потім натисканням кнопки «Пуск» підімкнути стенд ЕВ-4 до трифазної мережі.

2. Кнопкою «Ввімкнення асинхронної машини» здійснити пуск асинхронного двигуна.

3. Шляхом натискання кнопки «Ввімкнення навантаження» ввімкнути збудження навантажувального пристрою агрегата 1.

4. Змінюючи реостатом збудження $R_в$ струм індуктора асинхронної муфти, добитися, щоб у колі фази обмотки статора проходив номінальний струм $I_{1_н}$, зняти показання електровимірювальних приладів. Дані вимірів занести до табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Експериментальні дані

№ п/п	M_2		$U_{1н}$		I_1		P_1		n_2
	поділки	Н·м	поділки	В	поділки	А	поділки	Вт	об/хв

5. Зменшуючи навантажувальний момент (збільшуючи $R_в$) і струм АД до значення, що відповідає режиму холостого ходу, зробити ще чотири відліки.

Оброблення експериментальних даних

1. Використовуючи експериментальні дані табл. 3.8, обчислити величини, наведені в табл. 3.9.

2. За експериментальними і розрахунковими даними побудувати механічну і робочу характеристики.

3. За результатами лабораторної роботи зробити висновок.

Таблиця 3.9

Розрахункові дані

Ω_2, с$^{-1}$								
P_2, Вт								
ΔP, Вт								
η								
S								
$\cos\varphi_1$								

Контрольні запитання

1. Накресліть ескіз конструкції й електричну схему трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
2. Поясніть принцип роботи трифазного асинхронного двигуна.
3. Що таке ковзання?
4. Накресліть механічну характеристику трифазного асинхронного двигуна, покажіть на ній основні характерні точки й ділянки.
5. Як визначається ККД асинхронного двигуна?
6. Поясніть робочі характеристики, які знято дослідним шляхом.
7. Від чого залежить величина електромагнітного моменту асинхронного двигуна?
8. Як зв'язані між собою частоти струмів статора й ротора?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ НА МЕРЕЖУ ЗМІННОГО СТРУМУ

(Лабораторія електричних машин)

Порядок виконання

1. Перевести асинхронну машину (АМ), що працює в режимі двигуна, у режим АГ, що працює на мережу змінного струму паралельно із синхронним генератором.
2. Увімкнути АГ на паралельну роботу з мережею змінного струму.
3. Навантажити генератор, підвищуючи швидкість обертання ротора АМ. Записати отримані в досліді фазні потужності P_A, P_B, P_C, струми I_A, I_B, I_C для АГ і напругу якоря $U_Я$, струм якоря $I_Я$, струм збудження I_B для привідного двигуна постійного струму при номінальних фазній напрузі U_{1H} і частоті f_H АГ для різних швидкостей обертання ротора АГ Ω_2.
4. За дослідними даними розрахувати й побудувати залежності $I = f(S)$; $I_1, \cos\varphi_1, \eta, S, P_Д = f(P_1)$.

Опис лабораторного стенда

Досліджується трифазна АМ з короткозамкненим ротором, паспортні номінальні дані якої наведено на щитку, прикріпленому до самої машини або до стенда з приладами. Режим АГ здійснюється з допомогою двигуна постійного струму, з'єднаного механічною муфтою з АМ.

Вимикачі мережі змінного струму для АМ і мережі постійного струму для привідного двигуна, а також усі необхідні прилади знаходяться на стенді. Електричні кола машини постійного струму й АМ з усіма приладами й реостатами жорстко змонтовано на стенді відповідно до схеми (рис. 3.3) з урахуванням паспортних даних.

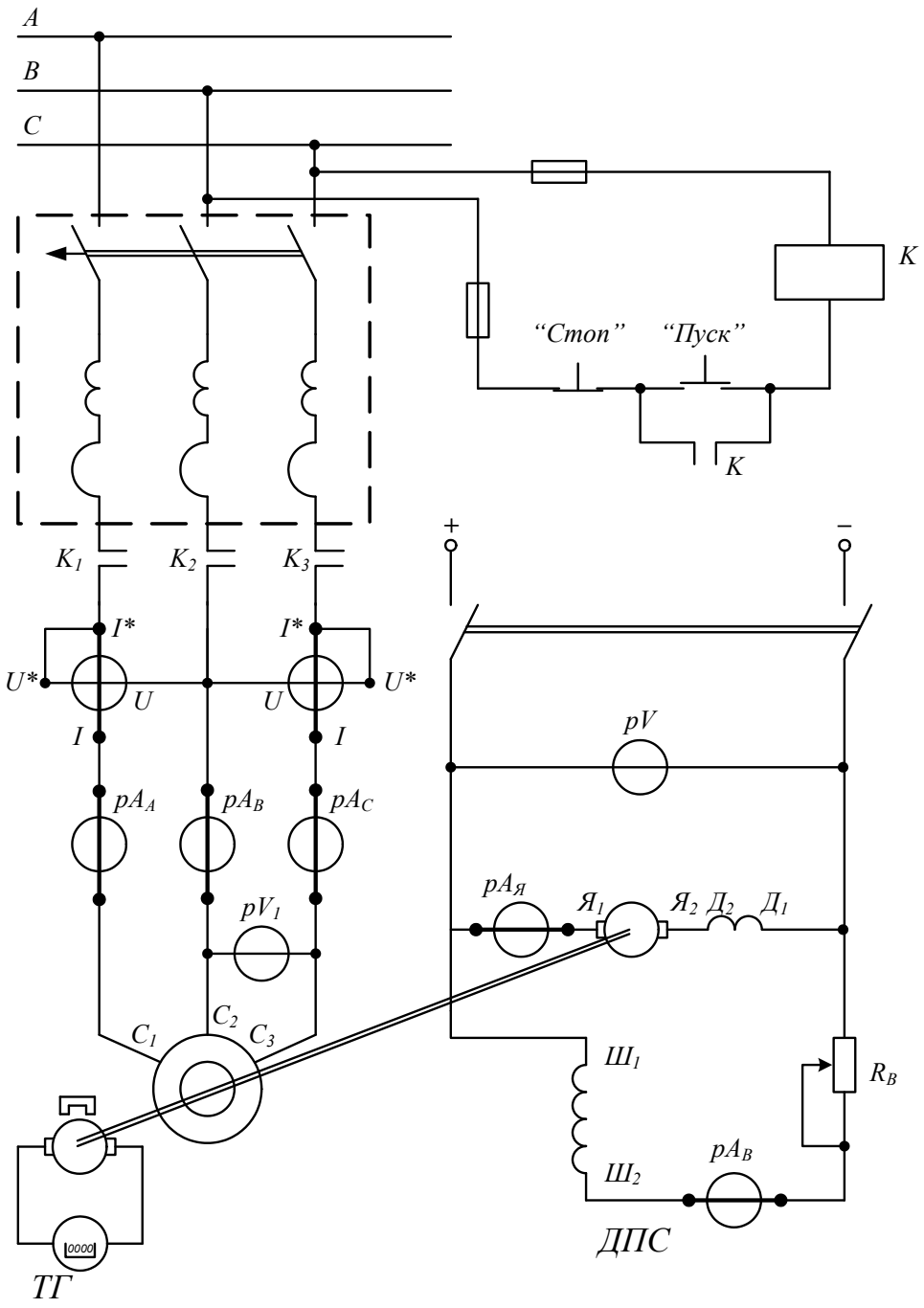


Рис. 3.3

Експериментальні дослідження

Перевести асинхронну машину з режиму двигуна в генераторний режим роботи.

Після того як перевірено електричне коло всієї установки й викладач дозволив виконувати роботу, необхідно узгодити напрямок обертання АМ і машини постійного струму (МПС).

Для цього кола здійснюється роздільний пуск зазначених машин.

Оскільки потужність живильної мережі значно більша за потужність АД, в роботі застосовується прямий пуск, при якому передбачається безпосереднє ввi-

мкнення обмотки статора на повну напругу мережі.

Машину постійного струму підімкнути до генератора постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3.4)

Для двигуна постійного струму (ДПС) у роботі застосовується пуск при зменшеній напрузі ГПС.

Приводом ГПС є ДПС із незалежним збудженням. (див. лаб. роботу «Дослідження двигуна постійного струму з незалежним збудженням» [7]).

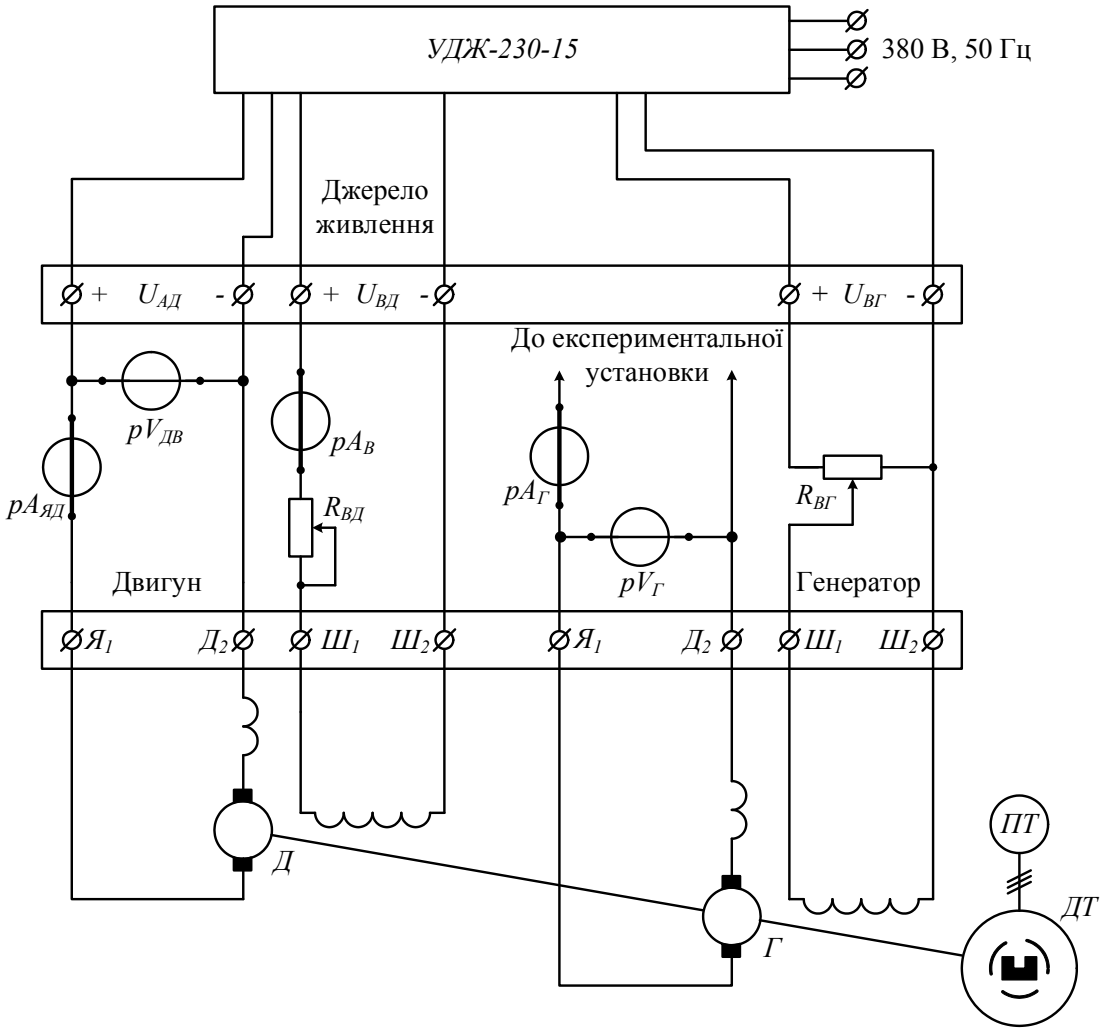


Рис. 3.4

Установка складається з двигуна, що знаходиться на одному валу з ГПС, і універсального регульованого джерела живлення УДЖ-220/15. На лабораторному стенді розміщено: електровимірювальні прилади; реостати збудження двигуна й генератора; магнітний пускач у колі живлення лабораторного стенда; покажчик швидкості обертання ДПС.

Схему електричних з'єднань лабораторної установки показано на рис. 3.4.

Перед пуском необхідно реостат у колі збудження двигуна $R_{B_Д}$ повністю вивести ($R_{B_{Д\,\min}}$), а реостат у колі збудження генератора $R_{B_Г}$ ввести ($R_{B_{Г\,\max}}$).

З допомогою кнопки «Пуск» магнітного пускача підмикають джерело живлення УДЖ-220/15 до трифазної мережі.

Відповідно до наведеної на робочому місці інструкції з роботи із джерелом запустити ДПС при номінальному струмі збудження $I_{B_Д} = I_{B_{НД}}$.

Підімкнути МПС до генератора, що застосовується при виконанні лабораторної роботи № 6.

Збільшуючи струм збудження генератора (зменшуючи $R_{B_Г}$), збільшити його напругу до напруги зрушення й візуально визначити напрямок обертання якоря МПС.

Після відімкнення МПС й її зупинки АМ вмикають у мережу змінного струму як двигун.

Якщо напрямок обертання АМ не збігається з напрямком обертання МПС, то слід змінити чергування фаз обмотки статора.

Якщо АД обертається в ту саму сторону, що й МПС, то її можна підімкнути до ГПС, перевіряючи приблизну рівність напруг ГПС і МПС шляхом регулювання струму збудження I_B МПС.

Зменшуючи струм збудження МПС, збільшують її швидкість обертання. У цьому випадку МПС починає працювати в режимі привідного двигуна. Навантаживши АГ до номінального струму, визначають величину потужності, що віддається ним у мережу змінного струму, і його ковзання. Таке переведення АМ з режиму двигуна в генераторний режим здійснюється для з'ясування різниці в ковзаннях і відношенні потужностей МПС і АМ, тобто для виявлення процесів, що відбуваються в АМ.

Порядок проведення експериментального дослідження

У табл. 3.10 – 3.13 записати паспортні дані АМ, МПС і електровимірювальних приладів.

Таблиця 3.10

Перелік аналогових вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Найменування	Система приладу	Клас точності	Межі виміру	Ціна поділки

Таблиця 3.11

Перелік цифрових вимірювальних приладів, які використовують при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Тип приладу	Марка приладу	Частота вимірюваної величини	Клас точності

Таблиця 3.12

Номінальні дані двигуна постійного струму

Тип двигуна				
P_{2H}, Вт	U_H, В	$I_{H,}$ А	Ω_{2_H}, з$^{-1}$	η_H

Таблиця 3.13

Номінальні дані асинхронного генератора

Тип АМ					
U_H, В	P_{2_H}, Вт	I_H, А	Ω_{2_H}, з$^{-1}$	η_H	$\cos\varphi_H$

Перш ніж здійснити пуск нерухомого агрегата з перевіреним напрямком обертання обох машин, слід повністю ввести пусковий реостат $R_П$ привідного двигуна постійного струму в коло його якоря й установити максимальний струм збудження двигуна (див. рис. 3.3).

Після пуску ДПС збільшити швидкість обертання агрегата до синхронної швидкості Ω_1 шляхом зменшення струму збудження I_B цього двигуна. Визначити за вимірником швидкості АМ синхронне обертання.

Після цього АГ увімкнути в мережу змінного струму, натиснувши магнітним пускачем кнопку «Пуск». При подальшому збільшенні швидкості обертання агрегата з допомогою зменшення струму збудження I_B привідного двигуна постійного струму навантажити АГ до номінального струму I_{1_H}. Потім зняти робочі характеристики АГ, зменшуючи його навантаження до нуля.

Результати досліду для 4–5 значень навантаження занести до табл. 3.13.

Оброблення експериментальних даних

Використовуючи експериментальні дані табл. 3.13, обчислити невідомі величини. За експериментальними і розрахунковими даними побудувати робочі характеристики АГ і зробити висновок.

Робочі характеристики являють собою залежності підведеної до нього механічної потужності P_1, струму фази обмотки статора I_1, ковзання S, коефіцієнта корисної дії η і коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$ від активної потужності P_2, що віддає АГ у мережу змінного струму при $U_1 = U_{1H}$, $f = f_H$.

Контрольні запитання

1. Накреслити ескіз конструкції й електричну схему АГ.
2. Якою є послідовність ввімкнення електричних машин (асинхронної машини й машини постійного струму) до живильних мереж?
3. Як здійснити генераторний режим асинхронної машини, яку підімкнено до мережі змінного струму?
4. Яким чином здійснюється переведення асинхронної машини з режиму двигуна в режим генератора?
5. Якими способами вимірюється ковзання ротора?
6. Пояснити характер залежності струму у функції ковзання $I_1 = f(S)$.
7. Як розподіляються потужності, баланс потужностей і втрати в досліджуваному агрегаті?
8. Яким чином здійснюється збудження асинхронного генератора? Що є джерелом реактивної потужності?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

Порядок виконання

1. На основі паспортних даних АМ розрахувати величину ємності конденсаторної батареї, необхідної для самозбудження генератора до номінальної напруги.
2. Збудити генератор до номінальної напруги при синхронній швидкості обертання й зняти характеристику холостого ходу генератора із самозбудженням $E_1 = f(I_c)$.
3. Зняти робочі характеристики АГ із самозбудженням U_1, I_1, I_c, I_H, f, S, $\eta = f(P_1)$.
4. Побудувати й пояснити залежності $E_1 = f(I_c)$ й U_1, I_1, I_c, I_H, f, S, $\eta = f(P_1)$.

Енергетичні показники для розрахунку асинхронного генератора із самозбудженням

Як АГ використовується трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Паспортні дані: потужність P_{2_H}, напруга U_{1_H}, номінальний струм I_{I_H}, швидкість обертання Ω_{2_H}, коефіцієнт потужності $c\text{os}\varphi_1$ і ККД наведено на стенді.

Заданими параметрами для розрахунку енергетичних показників АГ є потужність P_{2_H}, що віддається в зовнішнє коло; коефіцієнт потужності $c\text{os}\varphi_1$;

фазна напруга U_1; параметри схеми заміщення R_1, R_2', x_1, x_2', x_0, R_0, кількість полюсів 2*p*.

Опис експериментального стенда

Досліджується трифазний АГ з короткозамкненим ротором у режимі самозбудження. Привідним двигуном АГ є двигун постійного струму (ДПС) з паралельним збудженням. Двигун з'єднано механічною муфтою з АГ. Паспортні номінальні дані ДПС наведено на щитку, прикріпленому до самої машини або до стенда.

Вимикачі мережі змінного струму АГ і мережі постійного струму для приводного двигуна, а також всі необхідні прилади знаходяться на стенді.

Електричні кола АГ і ДПС із усіма приладами, реостатами й батареєю конденсаторів жорстко змонтовано на стенді згідно зі схемою (рис. 3.5) з урахуванням паспортних даних.

Привідний двигун ДПС підімкнено до мережі постійного струму. Джере-

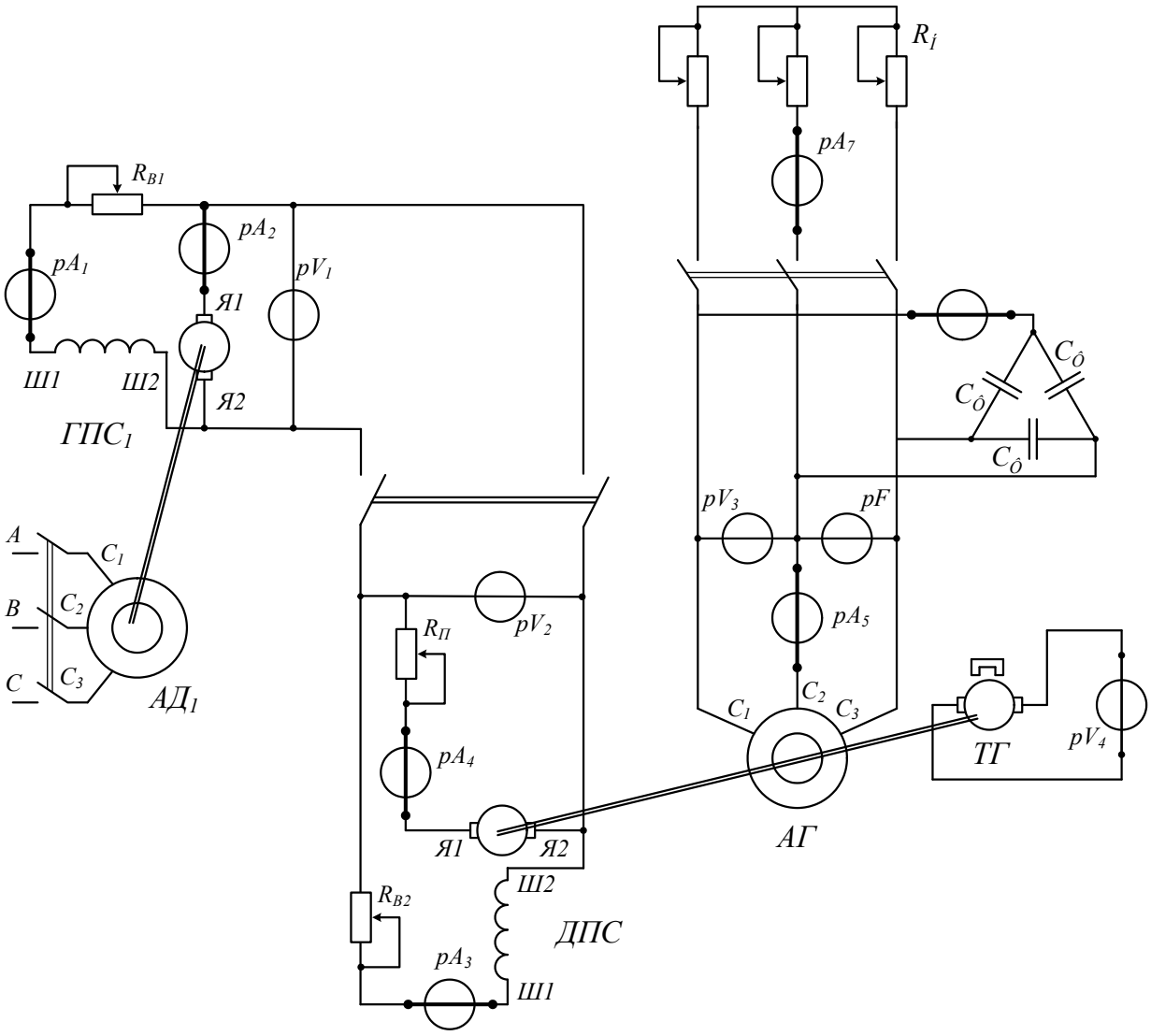


Рис. 3.5

лом постійного струму є генератор ГПС із паралельним збудженням (див. рис. 3.4).

Генератор з'єднано механічною муфтою з $АД_1$ з короткозамкненим ротором.

Електричні кола $АД_1$ і $ГПС_1$ з усіма приладами й реостатами жорстко змонтовано на стенді «Дослідження генератора постійного струму з паралельним збудженням» згідно схемою з урахуванням паспортних даних.

На стенді встановлено прилади, що фіксують такі параметри привідного ДПС: напруга джерела постійного струму, струм у якірному колі, струм у колі обмотки збудження.

У кожну фазу АГ увімкнено конденсатори з розрахунковим значенням ємності С. На стенді встановлено прилади, що фіксують такі параметри АГ: лінійна напруга U_1, лінійний струм обмотки статора I_1, лінійний струм батареї конденсаторів I_C, струм навантаження I_H. Вимірюються також частота напруги генератора f і швидкість обертання ротора Ω_2. Для вимірювання Ω_2 ротор і тахогенератор встановлено на одному валу.

Експериментальні дослідження

1. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно на стенді ознайомитися зі схемою лабораторної установки (див. рис. 3.5), електричними машинами, апаратами й приладами. Записати до табл. 3.14 – 3.17 номінальні дані й параметри кожного елемента електричного кола та визначити їх призначення.

2. Після перевірки електричного кола і дозволу викладача виконувати лабораторну роботу необхідно провести пуск двигуна. Оскільки потужність живильної мережі значно більша за потужність АД, в роботі застосовується прямий пуск, при якому передбачається безпосереднє ввімкнення обмотки статора на повну напругу мережі натисканням кнопки «Пуск» магнітного пускача.

Таблиця 3.14

Перелік аналогових вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Найменування	Система приладу	Клас точності	Межі виміру	Ціна поділки

Таблиця 3.15

Перелік цифрових вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експерименту

№ п/п	Позиційне позначення	Тип приладу	Марка приладу	Частота вимірюваної величини	Клас точності

Таблиця 3.16

Номінальні дані двигуна постійного струму

Тип двигуна				
P_{2H}, Вт	U_H, В	$I_{H,}$ А	Ω_{2_H}, з$^{-1}$	η_H

Таблиця 3.17

Номінальні дані асинхронного генератора

Тип АМ					
U_H, В	P_{2_H}, Вт	I_H, А	Ω_{2_H}, з$^{-1}$	η_H	$\cos\varphi_H$

Асинхронний двигун приведе в обертання якір ГПС.

3. Збудження генератора здійснити зменшенням опору реостата $R_{в_1}$ (збільшення струму збудження $I_{в_1}$) до номінальної напруги (дані наведено на стенді).

4. Пуск двигуна постійного струму здійснити в такій послідовності:

а) установити пусковий реостат $R_П$ у положення «Пуск»;

б) підімкнути магнітним пускачем ДПС до ГПС;

в) збільшити напругу ГПС до номінальної і під час виконання лабораторної роботи підтримувати її постійною;

г) плавно вивести пусковий реостат $R_П$, і реостатом у колі збудження $R_{в_2}$ установити необхідну швидкість обертання привідного двигуна.

5. Регулюючи реостатом $R_{в_2}$ струм збудження ДПС, установити швидкість обертання ротора генератора такою, що дорівнює синхронній, при однаковій ємності конденсаторної батареї, яка дорівнює розрахунковій. Переконатися, що АГ збуджено до напруги, яка є близькою до номінальної. Зменшуючи в кожній фазі значення ємності конденсатора із заданим кроком, зняти характеристику холостого ходу АГ із самозбудженням. Під час досліду швидкість обертання ротора підтримувати постійною ($\Omega_2 = \Omega_1$, с$^{-1}$ Одержані дані занести до табл. 3.18.

Таблиця 3.18

C, мкф	I_C, А	E_1, В

6. Для визначення робочих характеристик необхідно: збудити АГ до номінальної напруги, збільшуючи ємність конденсаторів у кожній фазі; підімкнути до

генератора навантажувальний реостат; переконатися, що швидкість обертання ротора АГ дорівнює синхронній швидкості (під час досліду підтримувати її постійною реостатом $R_{в_2}$ у колі збудження привідного двигуна); навантажити АГ струмом I_H, що дорівнює номінальному; не змінюючи величини фазної ємності конденсатора (її значення розраховано), зменшити струм навантаження до значення $I_H = 0$. Отримані дані занести до табл. 3.19, 3.20.

Таблиця 3.19

Асинхронний генератор												
Виміри									Розрахунок			
U_1		I_1		I_C		I_H		f	P_2	S	$\eta_Г$	P_1
поділки	В	поділки	А	поділки	А	поділки	А	Гц	Вт	–	–	Вт

Таблиця 3.20

Двигун постійного струму						
U_H		$I_в$		$I_Я$		Ω_2
поділки	В	поділки	А	поділки	А	$с^{-1}$

Оброблення експериментальних даних

Використовуючи експериментальні дані табл. 3.19 і 3.20, обчислити наведені в них величини. Результати розрахунку занести до табл. 3.21.

Таблиця 3.21

Розрахунок										
Ω_2	P_1	$I_Я^2 R_Я$	$2\Delta U$	$P_{доб} = 0{,}01P_1$	P_M	$P_{мх}$	ΔP	P_2	M_2	η
$с^{-1}$	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	$Нм^2$	-

За дослідними і розрахунковими даними побудувати й проаналізувати робочі характеристики ААГ: U_1, I_1, I_C, $I_{H_Г}$, f_i, S, $\eta = f(P_2)$.

Контрольні запитання

1. Що є основною умовою переведення асинхронної машини в генераторний режим?

2. Яким чином здійснюється самозбудження ААГ? Що є джерелом реактивної потужності?

3. З яких міркувань вибирається величина ємності конденсаторів, що є необхідною для самозбудження асинхронного генератора?

4. Чому зі збільшенням струму навантаження зменшується частота напруги генератора із самозбудженням?

5. Як впливає характер навантаження на величину й частоту напруги?

6. Як підтримувати величину й частоту напруги генератора постійними при зміненні навантаження?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бояр-Сазонович, С. Г. Стабілізація напруги автономного асинхронного генератора з варикондною ділянкою при змінній частоті обертання [Текст] / С. Г. Бояр-Сазонович, Ж. М. Запикою // Електрика. – 1991.– № 5. – С. 23–25.

2. Важнов, А. И. Електрические машины [Текст] / А. И. Важнов. – Л. : Енергия, 1968. – 768 с.

3. Костенко, М. П. Електричні машини. [Текст] : підруч. : у 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Піотровський. – 3-тє вид., перероб. і доп. – Л. : Енергія, 1973. – Ч. 2 : Машини змінного струму. – 647 с.

4. Лустафаєв, Р. И. Пуск і керування вітроенергетичних установок з асинхронним генератором, що працює на електричну мережу [Текст] / Р.И. Лустафаев. // Електрика. – 1990. – № 5. – С. 22–27.

5. Радин, В. И. Електрические машины. Асинхронные машины [Текст] : учебник / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, Е. А. Захарович ; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. шк., 1988. – 327 с.

6. Торопцев, Н. Д. Асинхронні генератори для автономних електроенергетичних установок [Текст] / Н. Д. Торопцев. – М. : НТФ “Энергопрогресс”, 2004. – 88 с.

7. Электрические машины [Текст]: учеб. пособие по лаб. практикуму/ А.А. Бояркин, Э.А. Галицын, М.В. Гаранжа, О.Н. Косыченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. Авиац. ин-т», 2008. – 81 с.

ЗМІСТ

1. Асинхронні машини …… 3
   1.1. Будова асинхронних машин ……..…… 3
   1.2. Обертове поле статора ……..... 4
   1.3. Будова обмоток статора і ротора ……..….. 5
   1.4. Принцип дії асинхронного двигуна ……..……. 6
   1.5. Електрорушійні сили статора і ротора ……..…… 7
   1.6. Струм ротора ……..... 8
   1.7. Рівняння електричної рівноваги асинхронного двигуна……... 9
   1.8. Процес перетворення електричної енергії в асинхронному двигуні… 11
   1.9. Електромагнітний момент ……..…….. 12
   1.10. Схема заміщення асинхронного двигуна ……..…….. 14
   1.11. Механічна характеристика асинхронного двигуна ……..…. 15
   1.12. Асинхронні двигуни з витісненням струму з обмотки ротора……. 17
      1.12.1. Глибокопазні двигуни. Будова і принцип роботи ..……... 17
      1.12.2. Двокліткові двигуни. Будова і принцип роботи ……..……. 18
   1.13. Пуск асинхронних двигунів……..…….. 19
   1.14. Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів ……..…. 23
      1.14.1. Частотне регулювання швидкості обертання……. 24
      1.14.2. Регулювання швидкості обертання шляхом змінення кількості пар полюсів……..……. 25
   1.15. Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів з фазним ротором …….. 25
   1.16. Робочі характеристики асинхронного двигуна ……..…… 26
2. Генераторний режим роботи трифазної асинхронної машини ……..…….. 29
   2.1. Робота асинхронної машини в режимі генератора ……..…….. 29
   2.2. Схема заміщення і векторна діаграма асинхронного генератора…..... 32
   2.3. Перетворення механічної енергії, яка підводиться до вала синхронного генератора, на електричну ……. 34
   2.4. Електромагнітна потужність і електромагнітний момент асинхронного генератора ……..……..... 35
   2.5. Автономний асинхронний генератор …..…… 37
   2.6. Характеристика холостого ходу автономного асинхронного генератора……. 42
   2.7. Частота генерованих коливань при холостому ході й навантаженні... 45
   2.8. Навантажувальний режим роботи автономного асинхронного генератора ……. 48
   2.9. Характеристики автономного асинхронного генератора ……. 48
3. Лабораторні роботи ..……..……. 53
   Лабораторна робота № 1. Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором ……..……..…… 53
   Лабораторна робота № 2. Дослідження трифазного асинхронного двигуна

з короткозамкненим ротором …….…… 57
Лабораторна робота № 3. Дослідження асинхронного генератора, що працює на мережу змінного струму…….……..……. 61
Лабораторна робота № 4. Дослідження трифазного асинхронного генератора із самозбудженням……..……... 66
Бібліографічний список …..……..……. 71

Навчальне видання

Бояркін Андрій Олександрович
Галіцин Едуард Андрійович
Косиченко Ольга Миколаївна

АСИНХРОННІ МАШИНИ

Редактор О.Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2013
Підписано до видання 30.12.2013
Ум. друк. арк.. 4,1. Обл.-вид. арк. 4,62.. Електронний ресурс

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
http://www.khai.edu
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001