Матвійчук В.А., Штуць А.А.

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт і самостійної роботи з навчальної дисципліни "Основи Електроприводу"

ЗМІСТ

Вступ……...……... 4

1 Перелік практичних робіт……... 6

Практична робота № 1 Розрахунок енергетичних параметрів електроприводів у перехідних режимах роботи……... 6

Практична робота № 2 Розрахунок оптимального коефіцієнта навантаження асинхронних двигунів……. 18

Практична робота № 3 Розрахунок економії енергії при перемиканні обмоток статора за схемою «трикутник–зірка»…… 24

Практична робота № 4 Підвищення енергетичних показників і зменшення впливу на енергомережу електроприводів з вентильними перетворювачами……. 33

Практична робота № 5 Оптимізація асинхронного двигуна за мінімумом втрат потужності, струму статора і споживаної потужності…… 38

2 Теоретичні питання для самостійного опрацювання……. 49

3 Критерії оцінювання рівня підготовки аспірантів..... 53

Список літератури…… 54

Додаток А Технічні параметри двигунів постійного та змінного струмів……... 56

Додаток Б Основні технічні дані асинхронних двигунів серії 4А (номінальна напруга $U_{ном}$=380 В, ступінь захисту 1Р4, 1Р23)……. 59

Додаток В Параметри асинхронних двигунів серії 4А (номінальна напруга $U_{ном}$=380 В, ступінь захисту 1Р4, 1Р23)……... 61

Додаток Г Технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А (фазна напруга $U_{ф}$=220 В)…….. 63

ВСТУП

Енергоресурсозбереження стало за останні 15–20 років поряд з інформатизацією та комп'ютеризацією одним з основних напрямів технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це пов'язано, по-перше, з обмеженістю і невідновлюваністю всіх основних енергоресурсів, по-друге, з безперервно зростаючими складністю їх видобутку і відповідно вартістю, по-третє, з глобальними екологічними проблемами, що є останнім часом [6, 8-10, 14, 18].

Суттєвою складовою цієї проблеми стало енергозбереження у сферах, що обслуговуються електричною енергією, оскільки ця енергія універсальна і повсюдно застосовувана. Енергозбереження зводиться до зниження марних втрат енергії. Економія енергії за рахунок підвищення ефективності її використання розглядається у світовій практиці як основний напрям розвитку сучасної енергетики. Підвищення ефективності веде до зростання всіх показників економіки країни, знижує техногенне навантаження на екологію регіонів, пов'язаних з виробництвом енергії [9, 10, 20].

Об'єктом енергозбереження є електропривод. Усі електроприводи, окрім численних малопотужних (частки кіловат) електроприводів побутової техніки, можна умовно розділити на дві великі групи. Перша використовується в агрегатах, що обслуговують технологічні процеси, які не можна здійснити без тонкого управління технологічними координатами, наприклад, прокатні стани, папероробні машини, металообробні верстати, роботи і т. д. До цієї групи належать не більше 10 % усіх електроприводів, вона завжди привертала увагу фахівців, і в ній, як правило, уже здійснені сучасні ефективні технічні рішення.

Друга група (близько 90 % усіх електроприводів) використовується в простих агрегатах – насосах, вентиляторах, транспортерах, конвеєрах і т. д. Цій групі до недавнього часу приділялося мало уваги, оскільки в подібних агрегатах зазвичай використовуються найпростіші електроприводи з не завжди

правильно вибраними двигунами, але саме в цій групі міститься великий резерв енерго- і ресурсозбереження [5, 8, 12, 13].

Методичні вказівки щодо виконання практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Методи та засоби енергозбереження в електротехнічних комплексах» охоплюють коло завдань не тільки з дослідження шляхів і способів економії електроенергії та інших ресурсів засобами електропривода, але і на багатьох прикладах пропонують практичні рішення. Практичні заняття містять розгорнуті рекомендації щодо виконання, приклади виконання самостійної роботи, завдання до теми, вказівки для користування літературними джерелами, контрольні запитання.

1 ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Практична робота № 1

Тема. Розрахунок енергетичних параметрів електроприводів у перехідних режимах роботи

Мета: визначення пускового моменту, при якому втрати в якірному колі двигуна постійного струму будуть мінімальними; обчислення втрат енергії в асинхронному двигуні при його розгоні та реверсуванні, а також при прямому та ступеневому пусках і гальмуванні.

Рекомендації щодо виконання

У перехідних режимах струми, що течуть по обмотках двигуна, істотно перевищують номінальні значення і викликають підвищені втрати енергії, тобто додатковий нагрів двигуна. Особливо велике значення має визначення втрат електроенергії в перехідних процесах для електроприводів, у яких динамічний режим є основним або займає помітний час протягом циклу (електроприводи прокатних станів, підйомних кранів, шахтних підйомних машин).

Втрати енергії за час перехідного процесу $t_{пп}$:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} (K + V) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} K dt + \int_0^{t_{\text{пп}}} V dt = \Delta W_K + \Delta W_V,$$

де ΔW_K і ΔW_V – втрати енергії, зумовлені відповідно постійними K і змінними V втратами потужності.

Зазвичай уважають, що постійні втрати потужності не змінюються за час перехідного процесу:

$$\Delta W_{\text{K}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} K dt = K t_{\text{пп}}.$$

Точне обчислення інтеграла змінних втрат у багатьох випадках виявляється складним через те, що необхідно знати закон зміни струмів $i(t)$ двигуна в перехідному режимі, мати дані про зміну активного опору R. Більш

зручно виражати втрати електроенергії в перехідних процесах, якщо змінні втрати потужності представити через механічні величини.

Потужність змінних втрат у ДПС:

$$\Delta P = I^2 R_{\text{я}} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s;\ \Delta P = P_{\text{с}} - P = P_{\text{с}} s.$$

З урахуванням рівняння руху електропривода:

$$\Delta P = M\omega_0 s = \left(M_{\text{с}} + J\frac{d\omega}{dt}\right)\omega_0 s = M_{\text{с}}\omega_0 s + J\omega_0 s\frac{d\omega}{dt},$$

де J – момент інерції двигуна; M_c – момент навантаження двигуна.

Втрати енергії:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_{\text{с}}\omega_0 s dt + \int_0^{t_{\text{пп}}} J\omega_0 s d\omega.$$

Беремо $M_{\text{с}}$=0. Замінюємо $d\omega$ на ds:

$$\omega = \omega_0(1-s);$$

$$d\omega = -\omega_0 ds;$$

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} -J\omega_0^2 s ds.$$

Змінимо межу інтегрування – моменту часу t=0 буде відповідати $s = s_{\text{поч}}$, а часу $t_{\text{пп}}$ – відповідати $s = s_{\text{кін}}$:

$$\Delta W = \int_{s_{поч}}^{s_{кін}} -J\omega_0^2 s ds = \int_{s_{кін}}^{s_{поч}} J\omega_0^2 s ds = J\frac{\omega_0^2}{2}\left(s_{поч}^2 - s_{кін}^2\right).$$

Визначимо втрати енергії при пуску, реверсі та гальмуванні двигунів.

При пуску двигунів на неробочому ходу $\omega_{\text{поч}}$=0, $\omega_{\text{кін}}=\omega_0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 1$, $s_{\text{кін}} = 0$ (рис. 1.1):

$$\Delta W_n = J\frac{\omega_0^2}{2}.$$

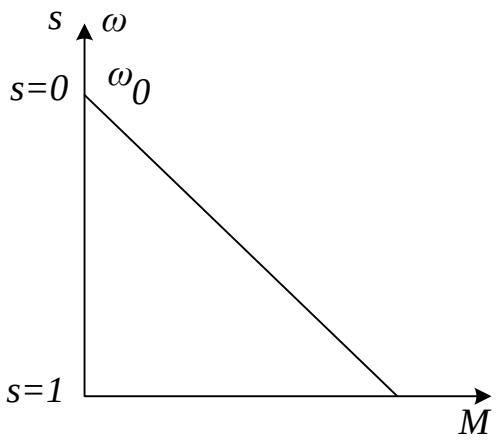


Рисунок 1.1 – Пуск двигуна на неробочому ходу

Втрати енергії при пуску дорівнюють запасу кінетичної енергії, яка буде запасена до кінця пуску в рухомих частинах електропривода.

Для динамічного гальмування $s_{поч}=0$, $s_{кін}=1$ (рис. 1.2):

$$\Delta W_{дг} = -J\frac{\omega_0^2}{2}.$$

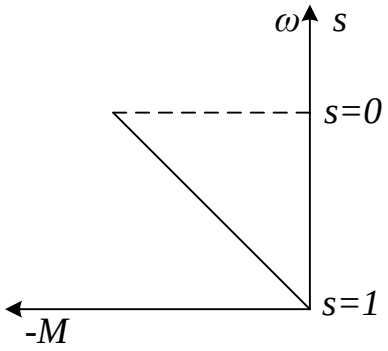


Рисунок 1.2 – Динамічне гальмування

При динамічному гальмуванні весь запас кінетичної енергії перетворюється на втрати енергії, що виділяються у двигуні у вигляді тепла.

Для режиму противмикання $\omega_{поч}=\omega_0$ і $\omega_{кін}=0$.Тоді $s_{поч}=2$, $s_{кін}=1$ (рис. 1.3):

$$\Delta W_{пв} = J\frac{\omega_0^2}{2}(4-1) = 3J\frac{\omega_0^2}{2}.$$

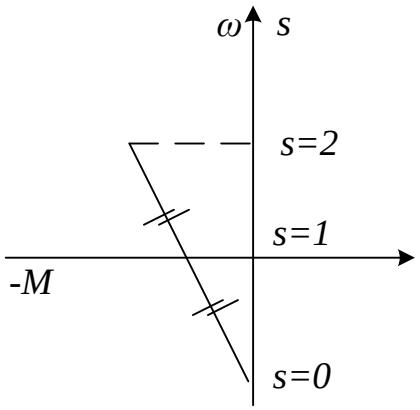


Рисунок 1.3 – Режим противмикання

При противмиканні втрати енергії дорівнюють потрійному запасу кінетичної енергії електропривода.

Для режиму реверсу $\omega_{поч}=\omega_0$, $\omega_{кін}=-\omega_0$. Тоді $s_{поч}=2$, $s_{кін}=0$ і втрати енергії складуть (рис. 1.4):

$$\Delta W_p = 4J\frac{\omega_0^2}{2}.$$

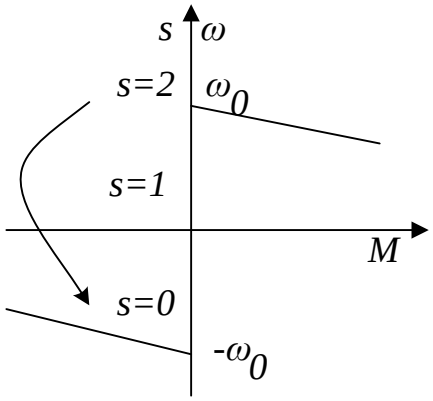


Рисунок 1.4 – Режим реверсу

Втрати енергії дорівнюють сумі втрат при гальмуванні противовмиканням і пуску.

Втрати енергії в роторі АД виражаються так само, як і для кола якоря ДПС незалежного збудження. Втрати енергії в міді статора АД виражаємо через втрати потужності:

$$V_1 = 3I_1^2 R_1 \approx 3(I_2')^2 R_1 = 3(I_2')^2 R_2' \frac{R_1}{R_2'} = V_2 \frac{R_1}{R_2'}.$$

Повні втрати енергії в АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = J \frac{\omega_0^2}{2}\left(s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2\right)\left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right).$$

Втрати в роторі АД не залежать від його опору, у той час як втрати в статорі АД обернено пропорційні опору ротора.

Для визначення втрат енергії при роботі двигуна під навантаженням необхідно обчислити вираз:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_{\text{с}}(\omega_0 - \omega)dt + J \frac{\omega_0^2}{2}\left(s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2\right).$$

У загальному вигляді розв'язання ускладнене, тому що момент навантаження та швидкість можуть бути нелінійними функціями часу. Для спрощення візьмемо $M_{\text{с}}$=const, тоді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2}\left(s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2\right) + M_{\text{с}}\omega_0 t_{\text{пп}} - M_{\text{с}} \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt.$$

Для визначення втрат необхідно знати аналітичний вираз зміни швидкості в часі. Якщо вираз $\omega(t)$ складний, то для визначення інтеграла використовується графоаналітичний метод (рис. 1.5).

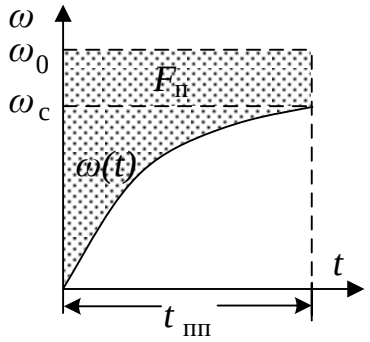


Рисунок 1.5 – До визначення інтеграла графоаналітичним методом

Інтеграл $\int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt$ являє собою площу, обмежену кривою $\omega(t)$, віссю часу і вертикальною лінією t=$t_{\text{пп}}$. Заштрихована на рисунку площа:

$$F_{\text{п}} = \omega_0 t_{\text{пп}} - \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt .$$

Тоді втрати запишемо у вигляді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} \left(s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2 \right) + M_{\text{с}} F_{\text{п}} .$$

Таким чином, для знаходження втрат енергії в якорі ДПС і роторі АД при $M_{\text{с}}$=const слід визначити втрати енергії при $M_{\text{с}}$=0, виконати побудову залежності $\omega(t)$ і, знайшовши площу $F_{\text{п}}$, визначити другу складову втрат.

Для визначення втрат у статорі АД, знайдені втрати в роторі множать на відношення опорів кіл статора і ротора:

$$\Delta W_1 = \Delta W_2 \frac{R_1}{R_2'},$$

після чого визначають сумарні втрати АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 .$$

Аналіз отриманих співвідношень визначає два основні способи зниження втрат електроенергії в перехідних режимах:

– зменшення моменту інерції електропривода;

– регулювання швидкості ідеального неробочого ходу в перехідних процесах.

Зменшити момент інерції привода можна такими способами:

– застосуванням малоінерційних електродвигунів, які мають знижений момент інерції якоря або ротора (збільшена довжина якоря і зменшений діаметр);

– раціональним конструюванням механічної передачі (вибором оптимального передавального числа редуктора, раціональних розмірів і форм елементів механічної передачі та конструкційних матеріалів);

– заміною одного двигуна двома, які мають половину потужності замінного двигуна (сумарний момент інерції менше моменту інерції одного двигуна на повну потужність). Наприклад, два двигуни типу 4АН200 потужністю по 45 кВт мають сумарний момент інерції $2 \times 1{,}38 = 2{,}76$ *кг м*^{2}. Двигун 4АН250

потужністю 90 кВт на ту саму швидкість має момент інерції 3,53 $кг\ м^2$, що майже на 30 % більше.

Найбільш ефективним засобом зниження втрат є реалізація керованих перехідних процесів. Розглянемо найпростіший спосіб управління пуском, коли швидкість ідеального неробочого ходу задається у два етапи. Такий пуск можливий при використанні двошвидкісного АД (рис. 1.6).

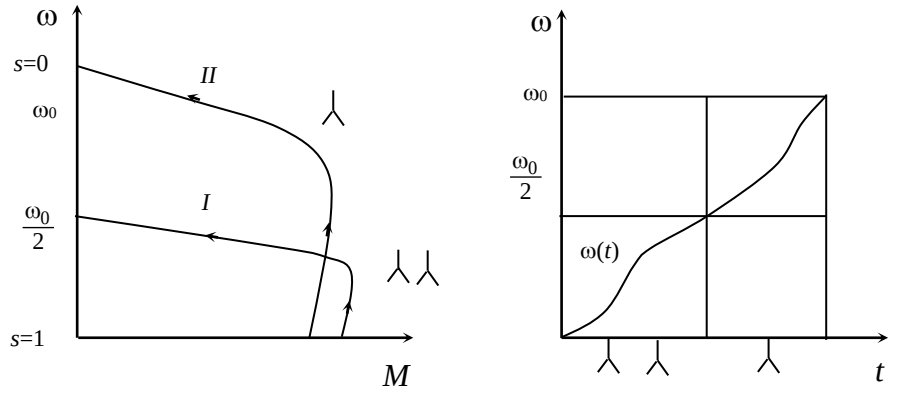


Рисунок 1.6 – Управління пуском, коли швидкість ідеального неробочого ходу задається у два етапи

Втрати енергії в роторі АД при прямому пуску на характеристику з урахуванням $s_{поч}$=1, $s_{кін}$=0:

$$\Delta W_{п} = J\frac{\omega_0^2}{2}\left(s_{поч}^2 - s_{кін}^2\right) = J\frac{\omega_0^2}{2}.$$

Втрати енергії при ступеневому пуску при розгоні за характеристицкою I (перший ступінь пуску) з урахуванням $s_{поч}$=1, $s_{кін}$=0, $\omega_0' = \frac{\omega_0}{2}$:

$$\Delta W_I = J\left(\frac{\omega_0}{2}\right)^2\frac{1}{2} = J\frac{\omega_0^2}{8}.$$

Втрати енергії при розгоні за характеристикою II (другий ступінь пуску) з урахуванням $s_{поч}$=0,5, $s_{кін}$=0:

$$\Delta W_{II} = J\frac{\omega_0^2}{2}(0{,}5)^2 = J\frac{\omega_0^2}{8}.$$

Сумарні втрати при двоступеневому пуску:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_I + \Delta W_{II} = J\frac{\omega_0^2}{4}.$$

Втрати скоротилися удвічі порівняно з пуском в один ступінь. Зазначимо, що зниження втрат енергії в роторі викликає зниження втрат у статорі АД. Якщо швидкість ідеального неробочого ходу в перехідному режимі має n ступенів регулювання, втрати енергії в роторі зменшуються в n разів:

$$\Delta W_{\text{п}} = J\frac{\omega_0^2}{2n},$$

де ω_0 – максимальна швидкість ідеального неробочого ходу, відповідна останньому ступеню.

При плавному заданні швидкості ідеального неробочого ходу втрати знижуються у $2T_{\text{м}}/t_{\text{пп}}$ рази. Чим повільніше розгін, тим менше момент, втрати потужності, сумарні втрати за час пуску. Однак це справедливо за відсутності втрат, пов'язаних з наявністю статичного навантаження, яке збільшується зі зростанням часу пуску.

Приклад виконання самостійної роботи

Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 4ПФ250 з параметрами $P_{ном} = 71$ кВт, $U_{ном} = 440$ В, $I_{ном} = 182{,}4$ А, $n_{ном} = 1500$ об/хв, $R_{яд} = 0{,}096$ Ом, $I_{доп} = 3I_{ном}$, $J_д = 1{,}2\ кг\ м^2$, запускається в системі керований перетворювач–двигун (КП-Д) з постійним пусковим моментом М і постійним статичним моментом на валу $M_c = 320\ Нм$ до швидкості ω_c. ЕРС перетворювача $E_п = 460$ В; сумарний опір якірного кола $R_{як} = 0{,}21$ Ом; сумарний момент інерції електропривода, приведений до вала двигуна $J_{пр} = 4{,}1\ кг\ м^2$. Визначити пусковий момент, при якому втрати в якірному колі двигуна будуть мінімальними.

Розв’язання

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном}/30 = 3{,}14\cdot 1500/30 = 157\ рад/с.$$

Конструкційний коефіцієнт двигуна:

$$c\Phi_{ном} = \frac{U_{ном} - R_{яд} I_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{440 - 0{,}096 \cdot 182{,}4}{157} = 2{,}69 B \cdot c/рад.$$

Кутова швидкість двигуна при навантаженні M_c:

$$\omega_c = \frac{E_n}{c\Phi_{ном}} - \frac{R_{як} M_c}{(c\Phi_{ном})^2} = \frac{440}{2{,}69} - \frac{0{,}21 \cdot 320}{2{,}69^2} = 162 рад/с.$$

Електромеханічна стала часу привода:

$$T_м = J_{пр} R_{як} / (c\Phi_{ном})^2 = 4{,}1 \cdot 0{,}21 / 2{,}69^2 = 0{,}119 с.$$

Втрати енергії в якірному колі при пуску двигуна:

$$\Delta A = \int_0^t I_n^2 R_{як} dt \approx I_n^2 R_{як} t_p , \qquad (1.1)$$

де: $I_n = M / c\Phi_{ном}$; $t_p = J_{пр}\omega_c / (M - M_c)$.

Підставивши значення I_n та t_p до (1.1), одержимо:

$\Delta A = \frac{M^2 R_{як} J_{пр} \omega_c}{(c\Phi_{ном})^2 (M - M_c)}$, ураховуючи, що $J_{пр} R_{як} / (c\Phi_{ном})^2 = T_м$

$$\Delta A = T_м M^2 \omega_c / (M - M_c). \qquad (1.2)$$

Втрати енергії в колі якоря при пуску двигуна будуть мінімальними, якщо $d\Delta A / d_м = 0$:

$$\frac{d\Delta A}{dM} = T_м \omega_c \frac{2M(M - M_c) - M^2}{M - M_c} = 0 .$$

Звідси виникає, що втрати будуть мінімальними, якщо:

$$M = 2M_c ; \; M = 2 \cdot 320 = 640 Нм.$$

Підставивши отримане значення моменту до (1.2), одержимо вираз для визначення мінімальних втрат енергії в якірному колі при розгоні двигуна:

$$\Delta A_{мін} = 4 T_м M_c \omega_c , \;\; \Delta A_{мін} = 4 \cdot 0{,}119 \cdot 320 \cdot 162 = 24{,}68 кВтс .$$

Приклад 2. Підрахувати втрати енергії в обмотках асинхронного короткозамкненого двигуна типу 4А280S2 з параметрами $P_{ном} = 110$ кВт, $U_{ном} = 380$ В, $I_{ном} = 206$ А, $n_0 = 3000$ об/хв, $R_1 = 0{,}018$ Ом, $R_2' = 0{,}014$ Ом, $J_д = 1{,}1$ кг м^2 при його розгоні та реверсуванні без навантаження. Приведений

до вала двигуна момент інерції механізму $J_{пр} = 2{,}7$ кг м^2.

Розв'язання

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi n_0 / 30 = 3{,}14 \cdot 3000 / 30 = 314 \text{ рад/с}.$$

Сумарний момент інерції привода:

$$J_{пр} = J_д + J_{пр} = 1{,}1 + 2{,}7 = 3{,}8 \text{ кг м}^2.$$

Втрати енергії в провідниках статора й ротора при розгоні:

$$\Delta A_1 = \frac{J_{пр}\omega_0^2}{2}\left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) = \frac{3{,}8 \cdot 314^2}{2}\left(1 + \frac{0{,}018}{0{,}014}\right) = 428{,}2 кВтс.$$

Втрати енергії в провідниках двигуна при реверсуванні:

$$\Delta A_1 = 4\frac{J_{пр}\omega_0^2}{2}\left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) = 4\frac{3{,}8 \cdot 314^2}{2}\left(1 + \frac{0{,}018}{0{,}014}\right) = 1712{,}8 кВтс.$$

Приклад 3. Двошвидкісний АД з короткозамкненим ротором має такі технічні дані: $P_{ном} = 2{,}5$ кВт, $n_{01} = 1500$ об/хв., $n_{02} = 3000$ об/хв, $J = 0{,}23$ кг м^2, $R_1 / R_2' = 1{,}6$. Навантаження на валу АД відсутнє, тобто $M_c = 0$. Обчислити повні втрати енергії при прямому та ступеневому пусках на вищу швидкість та прямому й ступеневому гальмуванні з вищої швидкості.

Розв'язання

Визначимо вищу та нижчу кутові синхронні швидкості АД:

$$\omega_{02} = 2\pi n_{02} / 60 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{01} = 2\pi n_{01} / 60 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 3000 / 60 = 314 \text{ рад/с}.$$

Повні втрати в АД при прямому пуску:

$$\Delta A_n = J\omega_{01}^2(1 + R_1 / R_2')(s_{поч}^2 - s_{кін}^2) / 2 = 0{,}23 \cdot 314^2(1 + 1{,}6)(1^2 - 0^2) / 2 = 29480 \text{ Дж}.$$

Втрати при ступеневому пуску:

- пуск до швидкості ω_{02}

$$\Delta A_{n1} = 0{,}23 \cdot 157^2(1 + 1{,}6)(1^2 - 0^2) / 2 = 7370 \text{ Дж};$$

- пуск від ω_{02} до швидкості ω_{01}

$$\Delta A_{n2} = 0{,}23 \cdot 314^2(1 + 1{,}6)(0{,}5^2 - 0^2) / 2 = 7370 \text{ Дж};$$

- сумарні втрати при ступеневому пуску

$$\Delta A_{п1-2} = \Delta A_{п1} + \Delta A_{п2} = 14740 \text{ Дж.}$$

Із аналізу отриманих показників випливає, що втрати енергії при ступеневому пуску удвічі менші за втрати при прямому пуску.

Втрати енергії при одноступеневому гальмуванні противмиканням із швидкості ω_{01} до нуля:

$$\Delta A_{г} = 0{,}23 \cdot 314^2 (1+1{,}6)(2^2 - 1^2)/2 = 100000 \text{ Дж.}$$

Втрати енергії при двоступеневому гальмуванні:

- генераторне гальмування від швидкості ω_{01} до швидкості ω_{02}

$$\Delta A_{г1} = 0{,}23 \cdot 157^2 (1+1{,}6)(1^2 - 0^2)/2 = 8330 \text{ Дж;}$$

- гальмування противмиканням від швидкості ω_{02} до 0

$$\Delta A_{г2} = 0{,}23 \cdot 157^2 (1+1{,}6)(2^2 - 1^2)/2 = 25000 \text{ Дж;}$$

- сумарні втрати в АД при ступеневому гальмуванні

$$\Delta A_{г1-2} = \Delta A_{г1} + \Delta A_{г2} = 8330 + 25000 = 33330 \text{ Дж.}$$

Вочевидь, сумарні втрати при двоступеневому гальмуванні менші, ніж при одноступеневому.

Завдання до теми

Завдання 1. Двигун постійного струму з незалежним збудженням, паспортні параметри якого наведені у таблиці А.1 додатка А, запускається в системі КП-Д з постійним пусковим моментом М і постійним статичним моментом на валу M_c до швидкості ω_c. ЕРС перетворювача $E_п = 460$ В; сумарний момент інерції електропривода, приведений до вала двигуна, $J_{пр} = 2J_д$. Визначити величину пускового моменту, при якому втрати в якірному колі двигуна будуть мінімальними, та підрахувати значення цих мінімальних втрат.

Завдання 2. Підрахувати втрати енергії в обмотках асинхронного короткозамкненого двигуна при його розгоні та реверсуванні без навантаження, паспортні параметри якого наведені у таблиці А.2 додатка А. Приведений до

вала двигуна моменту інерції механізму $J_{пр} = 2J_{д}$.

Завдання 3. Для двошвидкісного АД з короткозамкненим ротором, паспортні параметри якого наведені у таблиці А.3 додатка А, обчислити повні втрати енергії при прямому та ступеневому пусках на вищу швидкість та прямому й ступеневому гальмуванні з вищої швидкості. Навантаження на валу АД відсутнє, тобто $M_c = 0$.

Варіант завдання студент вибирає відповідно до порядкового номера у журналі.

Контрольні запитання

1. Для електроприводів яких технологічних механізмів динамічний режим є основним або займає більше часу протягом циклу?
2. Наведіть залежності, за якими визначають втрати енергії в гальмівних режимах двигунів.
3. Наведіть залежності, за якими визначають втрати енергії при пуску і реверсі двигунів.
4. Які існують способи зниження втрат енергії в перехідних процесах ЕП?
5. Якими способами можна зменшити момент інерції привода?
6. Який спосіб є найбільш ефективним для зниження втрат енергії в перехідних процесах?

***Література**: [2, с. 18–28, 228,* 229*; 8, с. 122–130; 15, с. 279–288; 16, с. 268–270; 17, с. 231–236; 19, с. 14–36]*.

Практична робота № 2

Тема. Розрахунок оптимального коефіцієнта навантаження асинхронних двигунів

Мета: набуття навичок виконання розрахунків оптимального коефіцієнта навантаження асинхронних двигунів без урахування і з урахуванням коефіцієнта втрат.

Рекомендації щодо виконання

Аналіз роботи діючих електроприводів показує, що більшість приводних двигунів мають завищену номінальну потужність порівняно з тією, яку потрібно отримати від електропривода для реалізації технологічного процесу. У європейській практиці прийнято вважати, що коефіцієнт навантаження (коефіцієнт використання) двигунів $k_н$, який визначається відношенням потужності навантаження двигуна P_c до його номінальної потужності $P_{ном}$, становить величину приблизно 0,6. У нашій країні цей коефіцієнт ще нижчий і лежить у межах (0,3 ... 0,5).

Крім того, електроприводи ряду робочих машин і виробничих механізмів частину свого циклу працюють з незначними механічними навантаженнями або на неробочому ходу. До них належать, наприклад, електроприводи обробних верстатів, ковальсько-пресового устаткування, підйомно-транспортних механізмів.

В обох розглянутих випадках відповідно до існуючих залежностей ККД і коефіцієнта потужності $cos\varphi$ від $k_н$ (рис. 2.1) двигуни при недовантаженні працюють з невисокими ККД, а асинхронні двигуни – із зниженим коефіцієнтом потужності $cos\varphi$. Підвищення цих показників призводить до зниження втрат енергії в електроприводі та системі електропостачання і може бути досягнуто, наприклад, заміною малозавантажених двигунів двигунами меншої потужності.

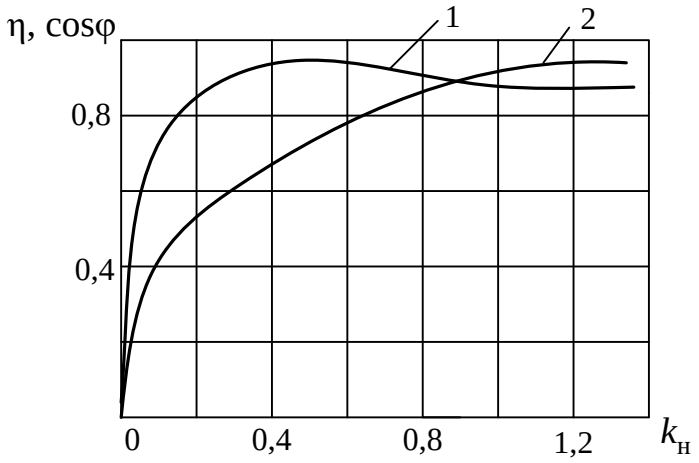


Рисунок 2.1 – Залежності ККД (1) і коефіцієнта потужності (2) від коефіцієнта навантаження двигуна

Заміна малозавантажених двигунів доцільна в тих випадках, коли відбудеться зниження втрат енергії у двигуні, що замінюють, та системі електропостачання, що дозволить окупити капітальні витрати при такій модернізації за прийнятний термін. Розрахунки показують, що при коефіцієнті навантаження $k_н$ < 0,4 у більшості випадків заміна малозавантажених двигунів виявляється економічно доцільною, при $k_н$ > 0,7 – недоцільною, а при 0,4< $k_н$ < 0,7 потрібен техніко-економічний розрахунок.

У практиці експлуатації асинхронних електродвигунів важливим є встановлення найвигіднішого або оптимального коефіцієнта навантаження, оскільки він характеризує ККД і коефіцієнт потужності електродвигуна.

Залежність ККД від коефіцієнта навантаження:

$$\eta = k_н P_{ном} / (k_н P_{ном} + \Delta P),$$

де $\Delta P = \Delta P_x + k_н^2 \Delta P_{н.ном} = P_{ном}\left(\frac{1-\eta_{ном}}{\eta_{ном}}\right)\left(\frac{\gamma + k_н^2}{\gamma + 1}\right)$, $\gamma = \Delta P_x / \Delta P_{н.ном}$ – розрахунковий коефіцієнт, який залежить від конструкції електродвигуна.

Аналіз виразів показує, що ККД електродвигуна сягає найбільшої величини при такому навантаженні, при якому постійні втрати дорівнюють змінним втратам:

$$\Delta P_x = k_н^2 \Delta P_{н.ном}.$$

Втрати неробочого ходу ΔP_x також можна визначити за допомогою каталожних даних:

$$\Delta P_x = (\Delta P - k_н^2 \Delta P_{ном}) / (1 - k_н^2),$$

де $\Delta P = k_н P_{ном}(1/\eta - 1)$ – втрати активної потужності при даному $k_н$; $\Delta P_{ном} = P_{ном}(1/\eta_{ном} - 1)$ – втрати активної потужності в електродвигуні при номінальному навантаженні.

Таким чином, раціональний режим роботи електродвигуна з точки зору найменших втрат буде при коефіцієнті навантаження:

$$k'_{н.опт} = \sqrt{\gamma} = \sqrt{\Delta P_x / \Delta P_{н.ном}}.$$

Зазвичай $k'_{н.опт}$ знаходиться в діапазоні навантажень 0,65 – 0,7, що відповідає γ=0,35-0,5.

Коефіцієнт $k'_{н.опт}$ враховує втрати активної потужності в самому електродвигуні і не враховує втрат в енергосистемі, викликаних реактивною потужністю, споживаною електродвигуном.

Ці втрати враховуються за допомогою коефіцієнта зміни втрат k_e, що вимірюється в кВт/кВАр. Коефіцієнт k_e чисельно дорівнює питомому зниженню втрат активної потужності у всіх елементах системи електропостачання (від джерел живлення до місць споживання електроенергії), при зменшенні переданої підприємству реактивної потужності [11]. Його задають енергосистемою підприємствам або беруть за довідковими даними (табл. 2.1).

Коефіцієнт k_e дозволяє визначити так звані наведені або сумарні втрати активної потужності, тобто суму активних втрат в електродвигуні й активних втрат в енергосистемі від реактивного навантаження електродвигуна. Ці втрати у функції коефіцієнта навантаження мають вигляд:

$$\Delta P_{сум} = \Delta P + k_e Q = \Delta P_x + k_н^2 \Delta P_{н.ном} + k_e \left[Q_x (1 - k_н^2) + k_н^2 Q_{ном} \right],$$

де $Q_x = (Q - k_н^2 Q_{ном})/(1 - k_н^2)$ – намагнічувальна потужність; $k_н = P / P_{ном}$ – коефіцієнт навантаження електродвигуна; P – потужність навантаження на валу електродвигуна; $P_{ном}$ – номінальна потужність електродвигуна; $Q = k_н P_{ном} tg\varphi / \eta$ – реактивна потужність, споживана асинхронним електродвигуном при даному навантаженні (даному $k_н$); η – ККД електродвигуна при даному $k_н$; $tg\varphi$ – тангенс кута зсуву фаз, відповідний коефіцієнту потужності при даному $k_н$; $Q_{ном} = P_{ном} tg\varphi_{ном} / \eta_{ном}$ – реактивна потужність електродвигуна при номінальному навантаженні; $\eta_{ном}$ – номінальний ККД електродвигуна; $tg\varphi_{ном}$ – тангенс кута зсуву фаз, відповідний коефіцієнту потужності.

Таблиця 2.1 – До визначення коефіцієнта зміни втрат k_e

Характеристика трансформаторів та системи електропостачання	k_e, кВт/кВАр	
	у години максимуму енергосистеми	у години мінімуму енергосистеми
Трансформатори, що живляться безпосередньо від шин електростанцій	0,2	0,2
Мережеві трансформатори, що живляться від електростанцій на генераторній напрузі	0,7	0,4
Знижувальні трансформатори 110/35/10 кВ, що живляться від районних мереж	0,1	0,5
Знижувальні трансформатори 10/6/0,4 кВ, що живляться від районних мереж	0,15	0,1

Підставивши отримане значення до формули і розв’язавши цей вираз щодо коефіцієнта навантаження, отримаємо нове значення оптимального коефіцієнта навантаження:

$$k_{н.опт.} = \sqrt{\frac{\Delta P_x + k_e Q_x}{\Delta P_{н.ном} + k_e (Q_{ном} - Q_x)}},$$

яке необхідно враховувати в розрахунковій практиці.

Приклад виконання самостійної роботи

Приклад 1. Для асинхронного електродвигуна серії 4А180М4У3 з паспортними параметрами: $P_{ном} = 30$ кВт, $n_{ном} = 1470$ об/хв., $I_{ном} = 56$ А, $\eta_{ном} = 91$ %, $cos\varphi_{ном} = 0{,}9$; $U_{ном} = 380$ В – визначити оптимальні коефіцієнти навантаження без урахування і з урахуванням коефіцієнта втрат $k_e = 0{,}15$ кВт/кВАр.

Втрати неробочого ходу при $k_н = 0{,}5$:

$$\Delta P_x = (\Delta P - k_н^2 \Delta P_{ном})/(1 - k_н^2) = (1{,}5 - 0{,}5^2 \cdot 2{,}7)/(1 - 0{,}5^2) = 1{,}1 \text{ кВт},$$

де $\Delta P_{ном} = P_{ном}(1/\eta_{ном} - 1) = 30(1/0{,}91 - 1) = 2{,}7$ кВт,

$\Delta P = k_н \cdot P_{ном}(1/\eta - 1) = 0{,}5 \cdot 30(1/0{,}905 - 1) = 1{,}5$ кВт.

Номінальні навантажувальні змінні втрати відповідно в обмотках статора і ротора:

$$\Delta P_{н.ном1} = 3 \cdot I_{ном}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 56^2 \cdot 0{,}12 \cdot 10^{-3} = 1{,}1 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{н.ном2} = P_{ном} \cdot s_{ном}/(1 - s_{ном}) = 30 \cdot 0{,}02/(1 - 0{,}02) = 0{,}6 \text{ кВт},$$

де $R_1 = U_{ном}(1 - \eta_{ном})/\sqrt{3 \cdot k_{сх} \cdot I_{ном}} = 380(1 - 0{,}91)/\sqrt{3 \cdot 3 \cdot 56} = 0{,}12$ Ом;

$s_н = (n_0 - n_{ном})/n_0 = (1500 - 1470)/1500 = 0{,}02$.

Номінальні навантажувальні змінні втрати у двигуні:

$$\Delta P_{н.ном} = \Delta P_{н.ном1} + \Delta P_{н.ном2} = 1{,}1 + 0{,}6 = 1{,}7 \text{ кВт}.$$

При $k_e = 0$ оптимальний коефіцієнт навантаження:

$$k'_{н.опт.} = \sqrt{\Delta P_x / \Delta P_{н.ном}} = \sqrt{1/1{,}7} = 0{,}8.$$

Реактивна потужність неробочого ходу:

$$Q_x = (Q - k_н^2 \cdot Q_{ном})/(1 - k_н^2) = (11{,}1 - 0{,}5^2 \cdot 16{,}8)/(1 - 0{,}5^2) = 9{,}2 \text{ кВАр}.$$

Беремо $k_н = 0{,}5$.

Номінальна реактивна потужність:

$$Q_{ном} = P_{ном} \cdot tg\varphi_{ном} / \eta_{ном} = 30 \cdot 0{,}51 / 0{,}91 = 16{,}8 \text{ кВАр.}$$

Реактивна потужність при $k_l = 0{,}5$:

$$Q = k_н \cdot P_{ном} \cdot tg\varphi / \eta = 0{,}5 \cdot 30 \cdot 0{,}67 / 0{,}905 = 11{,}1 \text{ кВАр.}$$

При $k_е = 0{,}15$ кВт/кВАр

$$k_{н.опт.} = \sqrt{\frac{\Delta P_x + k_е Q_x}{\Delta P_{н.ном} + k_е (Q_{ном} - Q_x)}} = \sqrt{\frac{1 + 0{,}15 \cdot 9{,}2}{1{,}7 + 0{,}15(16{,}8 - 9{,}2)}} = 0{,}92.$$

Наведені розрахунки показують, що якщо не враховувати вплив споживаної реактивної потужності на величину сумарних втрат активної потужності, тобто якщо $k_е = 0$, що було б неправильним, то оптимальні коефіцієнти навантаження виявляться набагато заниженими.

Завдання до теми

Для асинхронного електродвигуна, паспортні параметри якого наведені у таблиці Б.1 додатка Б, визначити оптимальні коефіцієнти навантаження без урахування і з урахуванням коефіцієнта втрат $k_е = 0{,}15$ кВт/кВАр, при $k_н = 0{,}5$ коефіцієнти корисної дії та потужності дорівнюють $\eta = 90{,}5$ % і $cos\varphi = 0{,}83$ відповідно.

Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт навантаження і як його визначають?
2. У яких випадках доцільною є заміна малозавантажених двигунів двигунами меншої потужності?
3. При якому коефіцієнті навантаження будуть мінімальними втрати потужності у двигуні? Що враховує коефіцієнт навантаження?
4. Що таке коефіцієнт зміни втрат? Як його визначають?

***Література**: [5, с. 60–64; 11, с. 19–25].*

Практична робота № 3

Тема. Розрахунок економії енергії при перемиканні обмоток статора за схемою «трикутник–зірка»

Мета: визначення зниження втрат потужності в електроприводі за рахунок перемикання обмоток двигуна зі схеми «трикутник» на схему «зірка».

Рекомендації щодо виконання

Ефективним засобом енергозбереження в асинхронних електроприводах є зниження напруги, що підводиться до двигуна при його роботі з малими навантаженнями або в режимі неробочого ходу. При цьому відбувається зниження споживаної реактивної потужності і тим самим втрат в елементах системи електропостачання електропривода, а при певних коефіцієнтах навантаження – і втрат потужності у двигуні.

Споживана асинхронним двигуном реактивна потужність Q при використанні П-подібної схеми заміщення визначається формулою:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{ГП} + Q_{ПР} = 3U_1 I_{\mu} + 3I_1^{\,2} X_1 + 3I_2'^{2} X_2' = \\ &= 3U_1^2 / X_{\mu} + 3I_2'^{2} X_{к} = 3U_1^2 / X_{\mu} + M\omega_0 s X_{к} / R_2', \end{aligned} \qquad (3.1)$$

де $Q_{ГП}$, $Q_{ПР}$ – реактивні потужності відповідно магнітного головного поля (ГП) і магнітних полів розсіювання (ПР) обмоток статора і ротора; U_1 – напруга, що подається на двигун; I_{μ}, X_{μ} – відповідно струм і реактивний опір контуру намагнічування; I_1 – струм статора; I_2' – приведений струм ротора; X_1, X_2', $X_{к} = X_1 + X_2'$ – індуктивні опори відповідно обмотки статора, приведений опір обмотки ротора і короткого замикання; M, ω_0, s – відповідно момент, швидкість неробочого ходу і ковзання асинхронного двигуна.

З виразу випливає, що за рахунок зниження підведеної до двигуна напруги можна впливати на рівень споживаної двигуном реактивної потужності і тим самим на значення cosφ.

Це положення ілюструють залежності струму намагнічування I_{μ} і приведеного струму ротора I_2' від напруги живлення двигуна $U_1^* = U_1 / U_{1ном}$

при різних моментах навантаження M_c, наведені на рис. 3.1. З рис. 3.1 видно, що зниження напруги призводить до зменшення струму намагнічування і відповідно тієї частини споживаної реактивної потужності, яка йде на створення головного магнітного потоку двигуна.

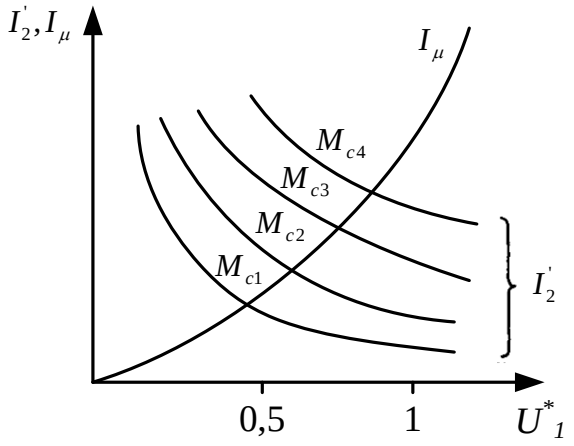


Рисунок 3.1 – Залежності струму намагнічування і приведеного струму ротора від напруги на статорі

Водночас при незмінному моменті навантаження зростають струми у колах статора і ротора двигуна, що викликає підвищення споживання реактивної потужності, яка йде на створення полів розсіювання обмоток статора і ротора. Таким чином, зниження напруги можна проводити тільки при малих навантаженнях двигуна або його неробочому ході, коли зниження напруги, що приводить до зменшення магнітного потоку двигуна, не викличе збільшення струмів у колах двигуна.

Для проведення практичних розрахунків вираз (3.1) зручно записати в наступному вигляді, що дозволяє врахувати ступінь навантаження $k_н$ двигуна:

$$Q = Q_0 + k_н^2 \Delta Q_{ном},$$

де Q_0 – реактивна потужність при неробочому ході двигуна; $\Delta Q_{ном}$ – приріст реактивної потужності при переході двигуна з режиму неробочого ходу в номінальний режим.

Приріст реактивної потужності:

$$\Delta Q_{ном} = (Q_{ном} - Q_0),$$

де $Q_{ном}$ – реактивна потужність у номінальному режимі.

Реактивна потужність у номінальному режимі:

$$Q_{ном} = 3U_{ф} I_{1ном} \sin\varphi_{ном} = P_{ном} tg\varphi_{ном} / \eta_{ном}.$$

На практиці застосування знайшли два способи зниження напруги: за рахунок перемикання обмотки статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» і за допомогою тиристорних регуляторів напруги. Розглянемо перший з названих способів.

Цей спосіб зниження напруги можливий при рівності номінальної фазної напруги обмотки статора двигуна і лінійної напруги мережі. При навантаженнях двигуна, близьких до номінального рівня, обмотки статора ввімкнені за схемою «трикутник» (Δ) і двигун працює при номінальній напрузі з повним магнітним потоком.

При зниженні навантаження обмотки двигуна перемикаються на схему «зірка» (Y), до обмоток підводиться знижена в $\sqrt{3}$ =1,73 раза напруга, за рахунок чого знижуються струм намагнічування, реактивна потужність і сумарні втрати у двигуні та системі електропостачання. Важливо відзначити, що при цьому втрати потужності у двигуні залежно від коефіцієнта його навантаження можуть як зменшуватися, так і збільшуватися.

Залежність реактивної потужності асинхронного двигуна від напруги, яка подається на статор, може бути виражена формулою:

$$Q = k_u^2 Q_0 + k_н^2 \Delta Q_{ном} / k_u^2, \qquad (3.2)$$

де k_u – коефіцієнт зниження напруги, що дорівнює одиниці при з'єднанні обмоток статора в схему «трикутник» і $1/\sqrt{3}$ при з'єднанні обмоток статора в схему «зірка».

Залежність втрат активної потужності асинхронного двигуна від напруги, яка подається на статор, може бути виражена аналогічною формулою:

$$\Delta P = k_u^2 \Delta P_0 + k_н^2 \Delta P_{ном} / k_u^2, \qquad (3.3)$$

де ΔP_0 – втрати потужності у двигуні при неробочому ході, які надалі беруть

рівними постійним втратам К.

Підставляючи до формул (3.2) і (3.3) значення k_u для обох схем, можна визначити зниження реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ при перемиканні обмоток:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_\Delta - \Delta Q_Y = 2Q_0 / 3 - 2k_н^2 \Delta Q_{ном}, \quad (3.4)$$

а також зниження втрат потужності $\Delta P_{\Delta-Y}$ при такому перемиканні:

$$\Delta P_{\Delta-Y} = \Delta P_\Delta - \Delta P_Y = 2\Delta P_0 / 3 - 2k_н^2 \Delta P_{ном}. \quad (3.5)$$

Аналіз співвідношення (3.4) при найбільш імовірних значеннях Q_0 = (0,6...0,75)$Q_{ном}$ показує, що при коефіцієнті навантаження $k_н$ < 0,7 реактивна потужність у схемі «зірка» завжди менша, ніж у схемі «трикутник». Аналіз формули (3.5) при найбільш вірогідному співвідношенні ΔP_0 = (0,3...0,35)$\Delta P_{ном}$ показує, що зниження втрат потужності у двигуні при переході на схему «зірка» буде мати місце, починаючи зі значень коефіцієнта навантаження двигуна $k_н$ < 0,4.

Далі наведено дані, що дозволяють оцінити зміну ККД (табл. 3.1) і cosφ (табл. 3.2) при перемиканні обмоток для різних коефіцієнтів навантаження двигуна $k_н$.

Таблиця 3.1 – Співвідношення ККД для двох схем вмикання обмоток статора

$k_н$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
η_Y / η_Δ	1,27	1,1	1,04	1,01	1,0

Таблиця 3.2 – Співвідношення $cos\varphi_Y / cos\varphi_\Delta$ для двох схем вмикання обмоток статора при різних значеннях $k_н$ і $cos\varphi_{ном}$

$cos\varphi_{ном}$	$k_н$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,78	1,94	1,80	1,64	1,49	1,35
0,80	1,86	1,73	1,58	1,43	1,30
0,82	1,78	1,67	1,52	1,37	1,26
0,84	1,72	1,61	1,46	1,32	1,22
0.86	1,66	1,55	1,41	1,27	1,18
0,88	1,60	1,49	1,35	1,22	1,14
0,90	1,57	1,43	1,29	1,17	1,10
0,92	1,50	1,36	1,23	1,11	1,06

Аналіз даних табл. 3.1 і 3.2 показує, що при $k_н$ < 0,5 ККД і cosφ у схемі «зірка» вище, ніж у схемі «трикутник».

Таким чином, перемикання при таких навантаженнях обмотки статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» забезпечує ефект енергозбереження.

Важливим питанням є оцінка допустимого навантаження двигуна і його перевантажувальної здатності при такому перемиканні.

Раніше вже зазначалося, що зниження напруги при незмінному навантаженні на валу двигуна супроводжується збільшенням струмів ротора і статора, що збільшує втрати потужності та нагрів двигуна. Одночасно з цим пропорційно квадрату напруги знижується максимальний (критичний) момент двигуна, який визначає перевантажувальну здатність асинхронного двигуна.

З цих причин зниження напруги може здійснюватися тільки при знижених навантаженнях двигуна.

Формула для розрахунку максимально можливого відносного моменту навантаження M_c^* при $k_u = 1/\sqrt{3}$, характерного при перемиканні обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка», при якому струм ротора, втрати

потужності і нагрівання не перевищують номінального рівня:

$$Ì_{ñ}^{*} = \frac{(2\lambda_{max}(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1}) - 3)^{1/2}}{\sqrt{3}(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1})}.$$

У табл. 3.3 наведені результати розрахунку за цією формулою.

Таблиця 3.3 – Залежність відносного моменту навантаження M_c^* від коефіцієнта перевантажувальної здатності двигуна при $k_u = 1/\sqrt{3}$ асинхронного двигуна

λ_{max}	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
M_c^*	0,500	0,535	0,550	0,560	0,563

З даних табл. 3.3 випливає, що при вмиканні обмоток статора в схему «зірка» двигун за умовами нагрівання не може нести навантаження більше 60 %.

Приклад виконання самостійної роботи

Визначити сумарне зниження втрат потужності в електроприводі за рахунок перемикання обмоток двигуна АО3-315М-6У3, що працює з коефіцієнтом навантаження $k_н = 0{,}3$, зі схеми «трикутник» на схему «зірка». Номінальні дані двигуна: $P_{ном} = 132$ кВт; $U_{ном} = 380/660$ В; $s_{ном} = 0{,}017$; $I_{1ном} = 138$ А; $cos\varphi_{ном} = 0{,}9$; $sin\varphi_{ном} = 0{,}44$; $\eta_{ном} = 93{,}5\%$; $\lambda_{max} = M_к / M_{ном} = 2{,}6$; $p = 3$; $f_{1ном} = 50$ Гц.

Розв'язання

Швидкість ідеального неробочого ходу, номінальні кутова швидкість і момент:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{3} = 104{,}7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{ном} = \omega_0(1 - s_{ном}) = 104{,}7(1 - 0{,}017) = 103 \text{ рад/с};$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{132000}{103} = 1282 \text{ Нм}.$$

Номінальний наведений струм ротора:

$$I'_{2ном} \approx I'_{1ном} \cos\varphi_{ном} = 138 \cdot 0{,}9 = 124 \text{ А.}$$

Струм намагнічування двигуна:

$$I_{\mu} = I_{1ном}\left(\sin\varphi_{ном} - \frac{\cos\varphi_{ном}}{\lambda_м + \sqrt{\lambda_м^2 - 1}}\right) = 138\left(0{,}44 - \frac{0{,}9}{2{,}6 + \sqrt{2.6^2 - 1}}\right) = 36A.$$

Використовуючи вираз для втрат потужності в роторі $V_2 = 3I_2'^2 R_2' = M\omega_0 s$, записаний для номінального режиму, знаходимо наведений активний опір ротора:

$$R_2' = \frac{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}{3I'^2_{2ном}} = \frac{1282 \cdot 104{,}7 \cdot 0.017}{3 \cdot 124^2} = 0{,}05 \text{ Ом.}$$

Реактивна потужність у номінальному режимі:

$$Q_{ном} = 3U_ф I_{1ном} \sin\varphi_{ном} = 3 \cdot 380 \cdot 138 \cdot 0{,}44 = 69221 \text{ ВАр.}$$

Реактивна потужність неробочого ходу:

$$Q_0 = \frac{mP_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{0{,}31 \cdot 132000}{0{,}935} = 43764 \text{ ВАр,}$$

де $m = 2{,}2 - 2{,}1\cos\varphi_{ном} = 2{,}2 - 2{,}1 \cdot 0{,}9 = 0{,}31.$

З виразу для номінальної реактивної потужності:

$$Q_{ном} = 3U_ф I_{\mu} + M_{ном}\omega_0 s_{ном} X_к / R_2' = Q_0 + \Delta Q_{ном}$$

знаходимо $X_к$:

$$X_к = \frac{R_2'(Q_{ном} - Q_0)}{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}} = \frac{0{,}05(69221 - 43764)}{1282 \cdot 107{,}7 \cdot 0.017} = 0{,}55 \text{ Ом.}$$

Використовуючи формулу для критичного моменту асинхронного двигуна, активний опір кола статора:

$$M_к = \frac{3U_ф^2}{2\omega_0\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_к^2}\right)}$$

Виражаючи з неї R_1 як шукану величину, знаходимо:

$$R_1 = \frac{\left(3U_\phi^2 \big/ 2\omega_0 M_к\right)^2 - X_к^2}{2\left(3U_\phi^2 \big/ 2\omega_0 M_к\right)} = \frac{\left(3\cdot 380^2 \big/ 2\cdot 104{,}7\cdot 2.6\cdot 1282\right)^2 - 0{,}55^2}{2\left(3\cdot 380^2 \big/ 2\cdot 104{,}7\cdot 2{,}6\cdot 1282\right)} = 0{,}07 \text{ Ом.}$$

Повні номінальні втрати:

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1-\eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{132000(1-0{,}935)}{0{,}935} = 9176 \text{ Вт.}$$

Змінні номінальні втрати:

$$V_{ном} = V_{1ном} + V_{2ном} = 3\cdot I_{1ном}^2 \cdot R_1 + 3\cdot I_{2ном}^2 \cdot R_2^{'} =$$
$$= 3\cdot 138^2 \cdot 0{,}07 + 3\cdot 124^2 \cdot 0{,}05 = 6306 Вт.$$

Постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{ном} - V_{ном} = 9176 - 6306 = 2870 \text{ Вт.}$$

Зниження реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ при перемиканні обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_\Delta - \Delta Q_Y = 2Q_0 / 3 - 2k_н^2 \cdot \Delta Q_{ном} =$$
$$= 2\cdot 43764 / 3 - 2\cdot 0{,}3^2 \cdot 25456 = 24594 \ ВАр.$$

Розраховуємо зниження активної потужності $\Delta(\Delta P_{\Delta-Y})$ при перемиканні обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = \Delta P_\Delta - \Delta P_Y = 2\Delta P_0 \big/ 3 - 2k_н^2 \cdot \Delta P_{ном} = 2\cdot 3859 \big/ 3 - 2\cdot 0{,}3^2 \cdot 9176 = 921 \text{Вт.}$$

Сумарне зниження втрат потужності становитиме:

$$\Delta P_{ек} = k_п \cdot \Delta Q_{\Delta-Y} + \Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = 0{,}1\cdot 24594 + 921 = 3381 \text{ Вт,}$$

де $k_п$ – коефіцієнт зниження втрат потужності, одержуваного від зниження реактивної потужності Q, кВт/кВАр.

Завдання до теми

Визначити сумарне зниження втрат потужності в електроприводі за рахунок перемикання обмоток двигуна, що працює з коефіцієнтом навантаження $k_н = 0{,}3$, зі схеми «трикутник» на схему «зірка». Номінальні дані двигуна наведені у табл. В.1 додатка В.

Контрольні запитання

1. Назвіть засоби енергозбереження в асинхронних електроприводах.
2. Які способи зниження напруги в асинхронних електроприводах знайшли практичне застосування?
3. За рахунок чого перемикання обмоток статора асинхронного двигуна зі схеми «трикутник» на схему «зірка» при малих навантаженнях може привести до підвищення енергетичних показників його роботи?
4. При яких значеннях коефіцієнта навантаження перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» забезпечує енергозберігаючий ефект?

***Література**: [5, с. 64–70; 11, с. 32–35].*

Практична робота № 4

Тема. Підвищення енергетичних показників і зменшення впливу на енергомережу електроприводів з вентильними перетворювачами

Мета: набуття навичок застосування методів регулювання якості електроенергії та зменшення впливу на енергомережу вентильних електроприводів

Рекомендації щодо виконання

У практиці експлуатації знайшли застосування такі методи регулювання якості електроенергії та зменшення впливу на енергомережу вентильних електроприводів [8]:

– використання традиційних способів компенсації реактивної енергії. До них належать синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів;

– застосування багатофункціональних пристроїв – силових резонансних фільтрів. До них належать: фільтрокомпенсуючі та фільтросиметруючі пристрої; пристрої «акумуляторна батарея – перетворювач»; коректори потужності; статичні тиристорні компенсатори. Перераховані пристрої забезпечують одночасно компенсацію реактивної потужності, фільтрацію вищих гармонік, зменшення відхилень і коливань напруги та її симетрування за фазами;

– зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення;

– використання спеціальних способів керування і схемних рішень вентильних перетворювачів;

– застосування систем керування вентильними перетворювачами, що дозволяють поліпшити енергетичні показники електропривода.

Приклад виконання самостійної роботи

Приклад 1. Визначити потужність і ємність конденсаторної батареї, яку необхідно використовувати для підвищення коефіцієнта потужності трифазного асинхронного електропривода від $\cos\varphi_1 = 0{,}8$ $(tg\varphi_1 = 0{,}75)$ до $\cos\varphi_2 = 0{,}96$ $(tg\varphi_2 = 0{,}29)$. Споживана активна потужність електропривода становить 2200 кВт, а номінальна напруга – 6 кВ.

Розв'язання

Необхідна потужність конденсаторної батареї:

$$Q_{ку} = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 2200(0{,}75 - 0{,}29) = 1008 \text{ кВАр.}$$

Ємність конденсаторної батареї на одну фазу:

$$C = \frac{Q_{ку}}{(3 \cdot \omega \cdot U_{ном}^2 \cdot 10^{-6})} = \frac{1008 \cdot 1000}{(3 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 6000^2 \cdot 10^{-6})} = 29{,}72 \text{ мкФ.}$$

Приклад 2. Синхронний двигун СДН-2500-1000 має номінальні потужність $P_{ном} = 2500$ кВт, швидкість $n_{ном} = 1000$ об/хв і напругу $U_{ном} = 6$ кВ і працює з номінальним навантаженням на валу. Потрібно визначити, на скільки зміняться втрати потужності у двигуні порівно з номінальними втратами при генерації реактивної потужності величиною 1500 кВАр.

Розв'язання

Втрати потужності на генерацію потужності $Q_{ном} = 1260$ кВАр відповідно до формули складуть:

$$\Delta P_Q = Д_1 + Д_2 = 8{,}13 + 7{,}74 = 15{,}87 \text{ кВт,}$$

де $Д_1$, $Д_2$ – постійні величини для даного двигуна, які залежать від типу двигуна, його потужності та частоти обертання [5, табл. 2.16].

Втрати потужності на генерацію потужності 1500 кВАр складуть:

$$\Delta P_Q = Д_1 Q / Q_{ном} + Д_2 (Q / Q_{ном})^2 = 8{,}13 \cdot 1500 : 1260 + 7{,}74 \cdot (1500 : 1260)^2 = 20{,}65 \text{ кВт,}$$

де $Q_{ном}$, Q – відповідно номінальна і генерована реактивні потужності двигуна [5, табл. 2.16].

Таким чином, втрати потужності збільшаться на 4,78 кВт. Якщо ці втрати потужності не будуть перевищувати економію втрат потужності в системі електропостачання, то синхронний двигун може розглядатися як прийнятний засіб компенсації.

Приклад 3. Асинхронний двигун типу МТКН 412-6 має наступні паспортні дані: $P_{ном} = 36$ кВт при тривалості включення ПВ = 25 %; $n_{ном} = 920$ об/хв; $I_{ном} = 81$ А; $I_{\mu} = 41{,}5$ А; $R_1 = 0{,}13$ Ом; $X_1 = 0{,}2$ Ом;

$R_2' = 0{,}24$ Ом; $X_2 = 0{,}25$ Ом, $cos\varphi_{ном} = 0{,}82$. Визначити коефіцієнт потужності при його роботі на природній характеристиці з моментом навантаження $M_c = 0{,}5M_{ном}$.

Розв'язання

Швидкість у режимах ідеального неробочого ходу і при номінальному навантаженні двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = 105 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = 96{,}3 \text{ рад/с}.$$

Номінальні ковзання і момент двигуна:

$$s_{ном} = \frac{(\omega_0 - \omega_{ном})}{\omega_0} = 0{,}08;$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = 374 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ковзання на природній характеристиці, що відповідає моменту навантаження $M_c = 0{,}5M_{ном} = 187$ Нм, приймаючи робочу ділянку характеристики лінійною:

$$s_c = \frac{s_{ном} \cdot M_c}{M_{ном}} = 0{,}04.$$

Наведений струм у роторі двигуна при моменті навантаження $M_c = 187$ Нм:

$$I_2' = \sqrt{M_c \cdot \omega_0 / 3R_2^{'}} = \sqrt{187 \cdot 105 \cdot 0{,}04 / (3 \cdot 0{,}24)} = 33 \text{ А}.$$

Номінальна активна споживана потужність з мережі:

$$P_{1ном} = 3 \cdot U_{1ф} \cdot I_{1ном} \cdot cos\varphi_{ном} = 3 \cdot 220 \cdot 81 \cdot 0{,}82 = 43873 \text{ кВт}.$$

Повні номінальні втрати потужності:

$$\Delta P_{ном} = P_{1ном} - P_{ном} = 43873 - 36000 = 7837 \text{ Вт}.$$

Номінальний наведений струм ротора:

$$I'_{2ном} = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}{3 \cdot R'_2}} = \sqrt{\frac{374 \cdot 105 \cdot 0{,}08}{3 \cdot 0{,}24}} = 66 \text{ А}.$$

Постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{ном} - V_{1ном} - V_{2ном} = 7837 - 3 \cdot 81^2 \cdot 0{,}13 - 3 \cdot 66^2 \cdot 0{,}24 = 2142 \text{ Вт},$$

де $V_{1ном} = 3I_{1ном}^2 R_1$, $V_{2ном} = 3I_{2ном}'^2 R_2'$.

Споживана активна потужність при заданому моменті навантаження:

$$P_a = M_c \omega_c + K + V_{1c} + V_{2c} = 187 \cdot 105(1 - 0{,}04) + 2142 + 3 \cdot 33^2(0{,}13 + 0{,}24) = 22200 \text{Вт},$$

де $V_{1c} + V_{2c} = 3I_2'^2(R_1 + R_2')$, $\omega_c = \omega_0(1 - s_c)$.

Реактивна потужність:

$$Q = 3 \cdot U_ф \cdot I_\mu + 3 \cdot I_2'^2 \cdot X_к = 3 \cdot 220 \cdot 41{,}5 + 3 \cdot 33^2 \cdot 0{,}45 = 28860 \text{ ВАр},$$

де $X_к = X_1 + X_2$.

Шуканий коефіцієнт потужності при роботі двигуна в заданій точці:

$$cos\varphi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}} = \frac{22000}{\sqrt{22000^2 + 28860^2}} = 0{,}57.$$

Завдання до теми

Визначити коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при його роботі на природній характеристиці з моментом навантаження $M_c = 0{,}5M_{ном}$. Паспортні дані асинхронного двигуна наведені у табл. В.1 додатка В. Струм намагнічування розраховують за формулою $I_{\mu ном} = I_{1ном}(sin\varphi_{ном} - \frac{cos\varphi_{ном} s_{ном})}{s_k}$.

Контрольні запитання

1. Назвіть і охарактеризуйте методи регулювання якості електроенергії та зменшення впливу на мережу вентильних електроприводів.

2. Які способи компенсації реактивної енергії належать до традиційних?

3. Охарактеризуйте силові резонансні фільтри енергетичного призначення.

4. Наведіть приклад використання ненастроєних фільтрів? Поясніть принцип роботи.

5. Що дозволяє застосування багатофункціональних пристроїв на основі

активних фільтрів?

6. Охарактеризуйте галузь використання статичних тиристорних компенсаторів.

7. За рахунок чого досягається зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення?

8. Які спеціальні способи керування і схемні рішення вентильних перетворювачів застосовують для регулювання якості електроенергії та зменшення впливу на мережу?

9. Охарактеризуйте системи керування вентильними перетворювачами, що дозволяють поліпшити енергетичні показники електропривода.

***Література**: [5, с. 76–88; 8, с. 355–404; 15, с. 297–298]*.

Практична робота № 5

Тема. Оптимізація асинхронного двигуна за мінімумом втрат потужності, струму статора і споживаної потужності

Мета: набуття навичок виконання розрахунків параметрів асинхронного електропривода при різних способах енергетичної оптимізації.

Рекомендації щодо виконання

Тиристорні регулятори напруги (ТРН) знаходять широке застосування в електроприводах змінного струму, де за рахунок регулювання напруги на статорі асинхронних двигунів забезпечується регулювання струмів і моментів двигунів у перехідних режимах, симетрування струмів у фазах, ряд захистів двигуна і деякі інші опції. Одна з них пов'язана з підвищенням енергетичних показників роботи асинхронних електроприводів при малих навантаженнях. Тиристорні регулятори напруги, що виконують цю функцію, отримали назву регуляторів економічності, або економайзерів.

Можливість енергозбереження цим способом ілюструють залежності струму статора I_1 від прикладеної до двигуна напруги U_1 (рис. 5.1) при різних моментах навантаження $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$. Ці залежності іноді називають U-подібними характеристиками двигуна.

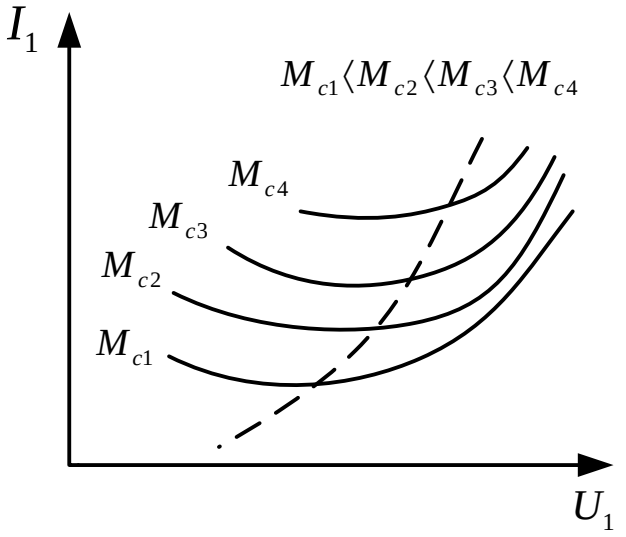


Рисунок 5.1 – U-подібні характеристики асинхронного двигуна

Як видно з графіків, при кожному навантаженні двигуна є така напруга, при якій споживаний струм мінімальний. Зниження струму відбувається за рахунок зменшення його реактивної складової. За рахунок цього забезпечуються зниження втрат енергії у двигуні, підвищення його ККД і коефіцієнта потужності $cos\varphi$.

На рис. 5.2 показані побудовані для двигунів 4А180М4 потужністю 30 кВт залежності ККД η, коефіцієнта потужності $cos\varphi$, відносних струму статора I_1^* і втрати потужності у двигуні ΔP^* від відносної напруги U_1^* при моменті навантаження M_c, що дорівнює 20 % від номінального. З кривих видно, що найкращих значень ці показники досягають при напругах, рівних 0,6 ... 0,8 номінального значення.

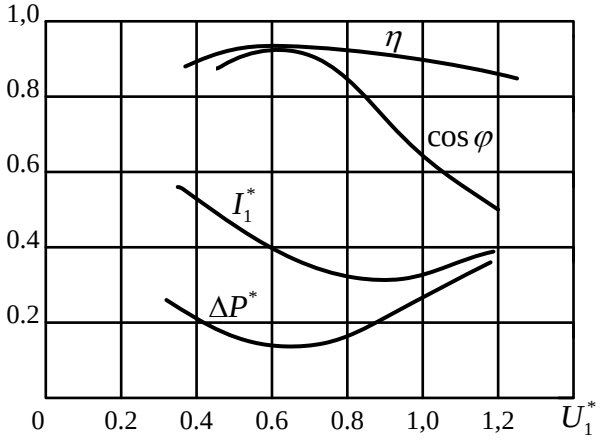


Рисунок 5.2 – Залежність струму статора, втрат потужності, ККД та коефіцієнта потужності від напруги

Досягнення екстремальних значень вказаних змінних може бути забезпечене за допомогою двох можливих схем вмикання асинхронного двигуна.

На рис. 5.3 наведена одна з них – схема з так званим екстремальним регулятором, що дозволяє мінімізувати споживаний двигуном струм при різних навантаженнях. Схема містить асинхронний двигун АД, ТРН зі схемою управління СУ, датчики струму ДС та напруги ДН, функціональний перетворювач ФП і інерційну ланку ІЛ. За рахунок вибору характеристики ФП

забезпечується мінімізація споживання струму при різних навантаженнях двигуна, а інерційна ланка ІЛ спільно з від'ємним зворотним зв'язком за напругою усуває можливі автоколивання в системі.

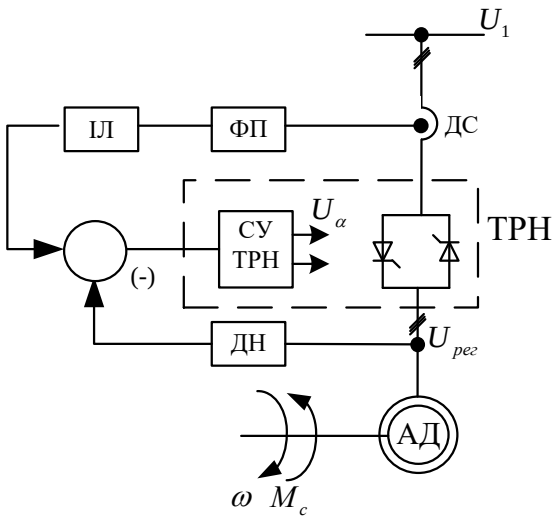


Рисунок 5.3 – Структурна схема електропривода з електронним регулятором

Експериментальні значення змінних двигуна забезпечуються при певних (оптимальних) його ковзаннях, які повинні підтримуватися постійними при будь-яких навантаженнях [5].

Проведемо порівняльний аналіз різних способів енергетичної оптимізації асинхронного електропривода. Для цього виразимо втрати в асинхронному двигуні через параметри його схеми заміщення:

$$\Delta P_\Sigma = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' + 3I_{\mu a}^2 R_\mu, \qquad (5.1)$$

де I_1 – фазний струм статора, I_2' – приведений струм ротора; $I_{\mu a}$ – активна складова струму намагнічування; R_1, R_2', R_μ – відповідно активний опір статора, приведений активний опір обмотки ротора і активний опір контуру намагнічування.

Для спрощення подальших викладок у (5.1) не враховані механічні та додаткові втрати.

Втрати в роторному колі асинхронного двигуна:

$$3I_2'^2 R_2' = M\omega_0 s,$$

де M, s – відповідно момент і ковзання двигуна; ω_0 – швидкість неробочого ходу.

Це співвідношення легко отримати, якщо проаналізувати, як розподіляється електромагнітна потужність, що передається від статора до ротора двигуна. Вона дорівнює добутку момента на кутову швидкість електромагнітного поля:

$$P_1 = M\omega_0 .$$

Ця потужність поділиться на дві частини, одна з яких передається на вал двигуна, який обертається зі швидкістю ω:

$$P = M\omega ,$$

а друга її частина виділяється у вигляді теплоти в роторному колі двигуна:

$$P_2 = P_1 - P = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s .$$

Якщо врахувати, що для реальних асинхронних машин $R_\mu >> X_\mu$, а при малих значеннях ковзань, що відповідають роботі двигунів на лінійній частині його механічної характеристики, можна припустити, що $X'_2 << R'_2 / s$, то можна отримати наступні співвідношення для схеми заміщення:

$$I_1^2 \approx I_2'^2 + I_{\mu p}^2; \quad Å^2 \approx (I'_2 R'_2 / s)^2 = M\omega_0 R'_2 /(3s),$$

де $I_{\mu p}$ – реактивна складова струму намагнічування; E – ЕРС двигуна.

З урахуванням цього отримуємо такий вираз для втрат:

$$\begin{aligned} \Delta P_\Sigma &= 3I_2'^2 R'_2(1 + R_1 / R'_2) + 3I_{0p}^2 R_1 + 3I_{\mu p}^2 R_\mu = \\ &= M\omega_0 s(1 + R_1 / R'_2) + M\omega_0 (R_1 R'_2 / X_\mu^2 + R'_2 / R_\mu) / s \end{aligned}, \qquad (5.2)$$

де $I_{\mu p} = E / X_\mu$; $I_{\mu a} = E / R_\mu$; X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування.

Ковзання $s_{\text{опт}}$, яке відповідає мінімуму втрат, знаходять з виразу:

$$\frac{dp_\Sigma}{ds} = M\omega_0 \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) - \frac{M\omega_0}{s^2}\left(\frac{R_1 R'_2}{X_\mu^2} + \frac{R'_2}{R_\mu}\right) = 0,$$

$$s_{опт} = \frac{R_2'}{X_\mu}\sqrt{\frac{X_\mu^2 / R_\mu + R_1}{R_1 + R_2'}}. \qquad (5.3)$$

Проведений аналіз дозволяє зробити важливий висновок: для забезпечення мінімальних втрат у двигуні необхідно при будь-яких навантаженнях підтримувати постійне оптимальне ковзання, що зумовлюється виразом (5.3). Ця властивість асинхронного двигуна дозволяє забезпечувати мінімізацію втрат у системі автоматичного керування зі зворотним зв'язком за ковзанням (або швидкістю).

Так, у системах автоматичного управління асинхронним ЕП з регулюванням напруги статора у системі зі зворотним зв’язком за швидкістю за рахунок стабілізації швидкості напруга статора двигуна змінюється автоматично функції моменту на валу за законом:

$$U_{опт} \approx E_{опт} = \sqrt{\frac{M\omega_0 R_2'}{3s_{опт}}}, \qquad (5.4)$$

забезпечуючи мінімальні втрати:

$$\Delta P_{\Sigma min} = 2M\omega_0\sqrt{\left(R_1 + R_2'\right)\left(\frac{R_1}{X_\mu^2} + \frac{1}{R_\mu}\right)}. \qquad (5.5)$$

Аналогічні дослідження на екстремум виразів для струму статора:

$$I_1^2 = \left(I_2' + I_{\mu a}\right)^2 + I_{\mu p}^2 \approx I_2'^2 + I_{\mu p}^2 + 2I_2' I_{\mu a} = \frac{M\omega_0}{3}\left(\frac{s}{R_2'} + \frac{R_2'}{sX_\mu^2} + \frac{2}{R_\mu}\right), \qquad (5.6)$$

та активної споживаної потужності:

$$P_1 = P_1 + 3I_1^2 R_1 + 3I_{\mu a}^2 R_\mu = M\omega_0\left(1 + \frac{sR_1}{R_2'} + \frac{R_2' R_1}{sX_\mu^2} + \frac{R_2'}{sR_\mu}\right), \qquad (5.7)$$

Оптимальні ковзання $s_{опт}$ визначають за формулами:

- при мінімізації струму статора

$$s_{опт\ I} = \frac{R_2'}{X_\mu}; \qquad (5.8)$$

- при мінімізації втрат потужності

$$s_{опт\,\Delta p} = (R_2' \sqrt{(X_\mu^2 / R_\mu + R_1)/(R_2' + R_1)}) / X_\mu; \quad (5.9)$$

- при мінімізації активної споживаної потужності

$$s_{опт\ p} = R_2' \sqrt{1 + X_\mu^2 / (R_\mu R_1)} / X_\mu; \quad (5.10)$$

- при максимізації коефіцієнта потужності

$$s_{опт\ \cos\varphi} = R_2' (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\mu X_к}) / (X_\mu X_к), \quad (5.11)$$

де $X_к = X_1 + X_2'$ – індуктивний опір контуру короткого замикання.

Значення струму статора при оптимальному ковзанні може бути обчислене за такою формулою:

$$I_{1min} = \sqrt{2M_c \omega_0 / 3X_\mu},$$

де M_c – момент навантаження двигуна.

Необхідний рівень оптимального ковзання може бути реалізований у замкнутій за швидкістю системі ТРН-АД, схема якої наведена на рис. 5.4. На схемі позначено: ТГ – тахогенератор, ЗП – потенціометр задання необхідної швидкості (ковзання) двигуна. Схема забезпечує підтримку швидкості ω і тим самим ковзання з певною точністю при змінах моменту навантаження M_c.

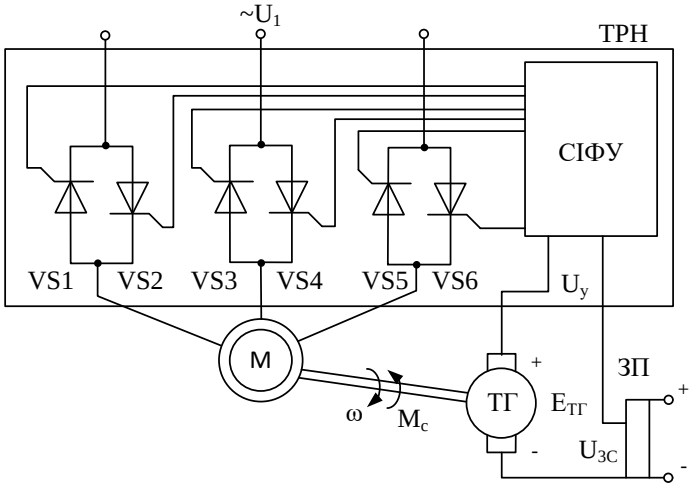


Рисунок 5.4 – Схема замкненої системи ТРН-АД зі зворотним зв'язком за швидкістю

До появи доступних перетворювачів частоти в нашій країні робилися спроби використовувати ТРН для регулювання швидкості асинхронних

двигунів насосів, що працюють у тривалому режимі.

Теоретично таке регулювання, яке називається параметричним, можливе, оскільки механічні характеристики в розімкнутій системі мають вигляд, показаний на рис. 5.5 суцільними лініями, а при використанні від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю (рис. 5.5) – штрихованими. Однак таке рішення пов'язане з технічним обмеженням, яке робить його практично недоцільним.

Втрати в роторному колі в номінальному режимі, які можна вважати допустимими, складають:

$$\Delta P_{2ном} = M_{ном}\omega_0 s_{ном};$$

втрати при регулюванні швидкості складають

$$\Delta P_{2рег} = M_{доп}\omega_0 s_{рег}.$$

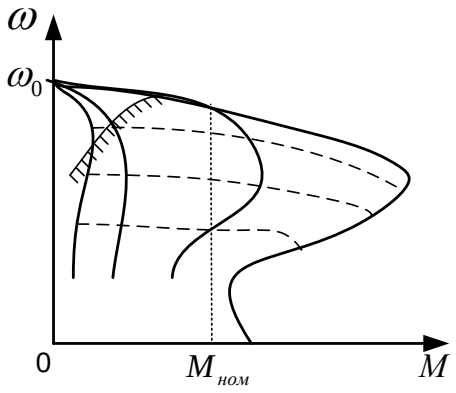


Рисунок 5.5 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при регулюванні напруги на статорі

Прирівнявши $\Delta P_{2рег} = \Delta P_{2ном}$, отримаємо:

$$M_{доп} = M_{ном} s_{ном} / s_{рег}.$$

З формули випливає, що допустиме навантаження різко спадає зі зменшенням швидкості. При $s_{доп} = 0{,}03$ зниження швидкості всього на 15 % $(s_{доп} \approx 0{,}15)$ вимагає зниження моменту в 5 разів (рис. 5.6, лінія із засіками).

У зв'язку з викладеним обмеженням використання ТРН у тривалому режимі навіть при сприятливій «вентиляторній» характеристиці навантаження

($M_c \sim \omega^2$) робить необхідним завищення потужності двигуна в 2,5–3 рази (збільшення $M_{ном}$), використання ротора з підвищеним опором ($s'_{ном} > s_{ном}$), застосування спеціальних засобів (вентилятор-«наїзник») для видування теплових втрат з двигуна. Це робить зовні привабливий спосіб регулювання швидкості неконкурентоспроможним.

Разом з тим, тиристорний регулятор напруги, який використовується за основним призначенням – плавний пускач, енергозберігаючий пристрій при малих навантаженнях, – дуже корисний засіб, що широко використовується за кордоном, але мало застосовується в нашій країні.

Приклад виконання самостійної роботи

Розрахувати оптимальне ковзання при мінімізації струму статора, втрат потужності, активної споживаної потужності та максимальному значенні коефіцієнта потужності для двигуна 4А180М4У3, що має наступні номінальні параметри: $P_{ном} = 30$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $\omega_0 = 157$ с$^{-1}$; $\eta = 0{,}91$; $\cos\varphi_{ном} = 0{,}89$; $I_{1ном} = 56{,}1$ А; $s_{ном} = 0{,}019$; $X_\mu = 15{,}3$ Ом; $R_1 = 0{,}133$ Ом; $X_1 = 0{,}267$ Ом; $R'_2 = 0{,}071$ Ом; $X_2 = 0{,}47$ Ом; $s_k = 0{,}14$; $\lambda_{max} = 2{,}3$; $\lambda_n = 1{,}4$; $\lambda_{min} = 1$; $J = 0{,}23$ кг м^2. Розрахувати втрати потужності, струм статора, активну потужність при розрахованих оптимальних ковзаннях. Побудувати залежності втрат потужності $\Delta P_{\Sigma min} = f(M)$ і ЕРС $E_{опт} = f(M)$ від моменту асинхронного двигуна при різних способах енергетичної оптимізації при моменті навантаження, що складає 10 % від номінального.

Розв'язання

Оптимальні ковзання $s_{опт}$ при різних способах енергетичної оптимізації обчислюємо за формулами (5.8)-(5.11):

при мінімізації струму статора

$$s_{опт\ I} = \frac{R'_2}{X_\mu} = \frac{0{,}071}{15{,}3} = 0{,}0046;$$

при мінімізації втрат потужності

$$s_{опт\ \Delta p} = \frac{R_2^{'}}{X_\mu}\sqrt{\frac{\frac{X_\mu^2}{R_\mu}+R_1}{R_1+R_2^{'}}} = \frac{0{,}071}{15{,}3}\sqrt{\frac{\frac{15{,}3^2}{198{,}82}+0{,}133}{0{,}133+0{,}071}} = 0{,}012,$$

де $R_\mu = \frac{3\cdot U_н^2}{\Delta P_{с.ном}} = 198{,}82$ Ом; $\Delta P_{с.ном} = \Delta P_{\sum ном} - (\Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2}) = 730{,}307$ Вт – номінальні втрати в сталі; $\Delta P_{\sum ном} = P_{ном}\frac{1-\eta}{\eta} = 2967$ Вт – номінальні втрати потужності у двигуні; $\Delta P_{мех} = 0{,}01P_{ном} = 300$ Вт, $\Delta P_{дод} = 0{,}005P_{ном} = 150$ Вт, $\Delta P_{м1} = 3I_{1ном}{}^2R_1 = 1256$ Вт, $\Delta P_{м2} = 3I^{'}{}_{2ном}{}^2R_2^{'} = 531$ Вт – втрати потужності відповідно механічні, додаткові, в обмотках статора і ротора; $I_{2ном}^{'} = I_{1ном}\cos\varphi_{ном} = 49{,}929$ А;

при мінімізації активної споживаної потужності

$$s_{опт\ p} = \frac{R_2^{'}}{X_\mu}\sqrt{1+\frac{X_\mu^2}{R_1R_\mu}} = \frac{0{,}071}{15{,}3}\sqrt{1+\frac{15{,}3^2}{0{,}133\cdot 198{,}82}} = 0{,}015;$$

при максимізації коефіцієнта потужності

$$s_{опт\ \cos\varphi} = \frac{R_2^{'}\left(R_1+\sqrt{R_2^{'}+X_\mu X_к}\right)}{X_\mu X_к} = \frac{0{,}071\left(0{,}133+\sqrt{0{,}071+15{,}3\cdot 0{,}737}\right)}{15{,}3\cdot 0{,}737} = 0{,}022,$$

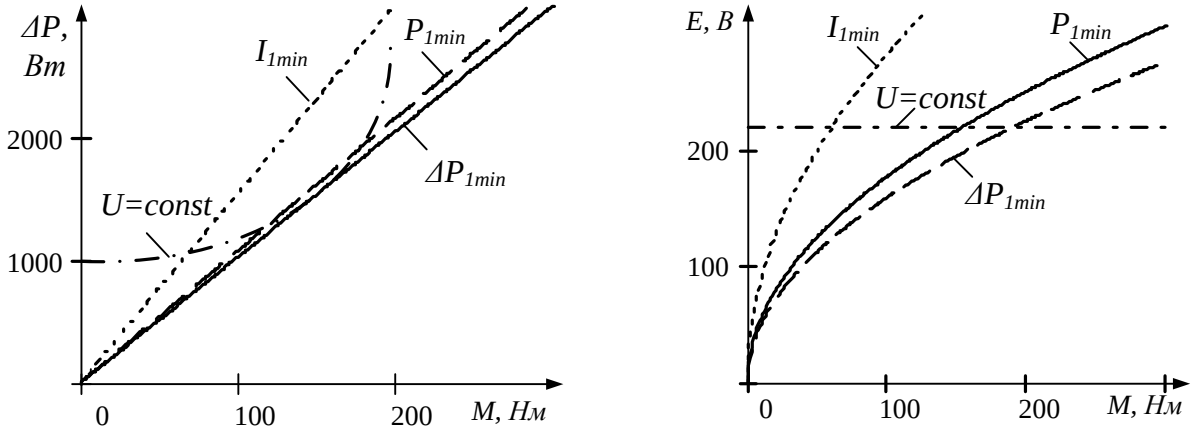
де $X_к = X_1 + X_2^{'} = 0{,}737$ Ом.

Результати розрахунків втрат потужності, струму статора, активної потужності при розрахованих оптимальних ковзаннях за допомогою формул (5.2), (5.6), (5.7) наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахункові параметри АД при різних способах енергетичної оптимізації

Спосіб оптимізації	$s_{опт}$	ΔP, кВт	I_1, А	P_1, кВт
Мінімум втрат потужності, ΔP	0,012	0,207	14,33	3229
Мінімум струму статора, I_1	0,0046	0,303	11,98	3347
Мінімум активної потужності, P_1	0,015	0,211	15,51	3225
Максимум cosφ	0,022	0,249	18,46	3240

Залежності втрат потужності й ЕРС від моменту асинхронного двигуна при різних способах енергетичної оптимізації при моменті навантаження, що складає 10 % від номінального, побудовані за виразами (5.2), (5.4), наведені на рис. 5.6.



а) б)

Рисунок 5.6 – Залежності втрат (а) і ЕРС (б) від моменту асинхронного двигуна при різних способах енергетичної оптимізації

З отриманих графіків рис. 5.4, а видно, що мінімізація за струмом і потужністю доцільна тільки при малих завантаженнях. Залежності, наведені на рис. 5.6, б, показують, що мінімум струму вимагає підвищеної, а мінімум потужності – зниженої напруги порівняно з напругою при мінімумі втрат.

Завдання до теми

Розрахувати оптимальне ковзання при мінімізації струму статора, втрат потужності, активної споживаної потужності та максимальному значенні коефіцієнта потужності для двигуна 4А180М4У3, номінальні параметри якого наведені у табл. Г.1 додатка Г. Розрахувати втрати потужності, струм статора, активну потужність при розрахованих оптимальних ковзаннях. Побудувати залежності втрат потужності $\Delta P_{\Sigma min} = f(M)$ і ЕРС $E_{опт} = f(M)$ від моменту асинхронного двигуна при різних способах енергетичної оптимізації при моменті навантаження, що складає 10 % від номінального.

Контрольні запитання

1. Які залежності ілюструють можливість енергозбереження в асинхронному електроприводі при використанні тиристорного регулятора напруги?

2. З яких причин і в яких випадках регулювання швидкості асинхронних двигунів з використанням тиристорного регулятора напруги є доцільним?

3. При яких напругах показники асинхронного електропривода досягають найкращих значень при малих навантаженнях?

4. Наведіть схему електропривода з екстремальним регулятором, що дозволяє мінімізувати споживаний двигуном струм при різних навантаженнях.

5. Наведіть схему замкненої системи ТРН-АД зі зворотним зв'язком за швидкістю.

Література: *[4, с. 93–101; 5, с. 105–111].*

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

Тема 1 Державна політика, правове забезпечення та економічний механізм стимулювання енергозбереження

Питання для самоперевірки

1. Назвіть пріоритетні напрями енергозбереження в промисловості.
2. Проведіть оцінку енергоресурсозбереження за рахунок технологічного фактора.
3. Назвіть правові документи, які регулюють енергоресурсозбереження в Україні
4. Які заходи лежать в основі енегоресурсозбереження в Україні?
5. Охарактеризуйте складові економічного механізму стимулювання енергозбереження.

Література: [6, с. 8–13].

Тема 2 Використання синхронної машини як компенсатора реактивної потужності

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте роботу синхронного генератора в режимі компенсатора реактивної потужності.
2. Приведіть U-подібні характеристики роботи синхронного компенсатора.
3. За якої умови синхронний двигун споживає реактивну потужність з мережі?
4. Який параметр і чому необхідно регулювати для повного використання компенсуючих властивостей синхронного двигуна?
5. Перелічіть переваги застосування синхронних компенсаторів.

Література: [5, с. 77–80].

Тема 3 Енергетичні особливості перетворювачів енергії

Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення перетворювачів енергії та назвіть пристрої, які до них відносять.
2. Назвіть енергетичні параметри електропривода, які поліпшують перетворювачі енергії.
3. Надайте порівняльну характеристику енергетичних властивостей статичних та електромашинних перетворювачів.
4. Назвіть та охарактеризуйте енергетичні параметри електропривода, які поліпшуються при використанні перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією.
5. Наведіть основні схемні рішення, які використовують при застосуванні перетворювачів енергії, що покращують енергетичні характеристики електропривода.

Література: [4, с. 55–62].

Тема 4 Економічна оцінка ефективності енергоресурсозбереження в електроприводі

Питання для самоперевірки

1. Назвіть методи і засоби енергоресурсозбереження в електроприводі.
2. Яким чином визначають економічну ефективність енергозберігаючих технологій?
3. Охарактеризуйте статичні та динамічні методи економічного оцінювання енергоресурсозберігаючих заходів.
4. Дайте визначення терміну окупності ресурсозберігаючого проекту.
5. Які фактори забезпечують ефективність енергетичного процесу в електроприводі?

Література: [5, с. 35–43].

Тема 5 Енергозбереження в режимі частих пусків. Компенсація реактивної потужності

Питання для самоперевірки

1. Для якого режиму роботи електропривода характерні часті пуски?
2. За рахунок чого може здійснюватися збільшення частоти ввімкнення двигунів?
3. Як між собою пов’язані допустима частота ввімкнення двигунів та втрати потужності?
4. Назвіть способи компенсації реактивної потужності.
5. Які схеми і технічні засоби використовують для компенсації реактивної потужності?

Література: [5, с. 72–76].

Тема 6 Асинхронний електропривод з реалізацією енергії ковзання. Електропривод з векторним керуванням

Питання для самоперевірки

1. Який енергетичний параметр погіршується при збільшенні енергії ковзання? Наведіть математичну залежність.
2. За допомогою яких пристроїв відбувається використання енергії ковзання в електроприводі? Назвіть їх переваги та недоліки.
3. Наведіть схеми пристроїв та охарактеризуйте енергозберігаючі режими роботи вентильних каскадів.
4. Перерахуйте енергоефективні способи керування вентильними двигунами.
5. За допомогою яких пристроїв відбувається оцінка якості перетворення енергії вентильним двигуном? Назвіть їх переваги.
6. Яким чином здійснюється енергетична оптимізація параметрів електроустаткування привода з вентильним двигуном?

Література: [8, с. 287–324].

Тема 7 Загальна методологія розвязання задач енергозбереження в організації

Питання для самоперевірки

1. Дайте характеристику стратегічному управлінню енергозбереженням в забезпеченні енергоефективності організації.
2. Дайте характеристику організаційно-функціональному методу реалізації стратегії енергозбереження в організації.
3. Проведіть організаційно-економічний аналіз основних тенденцій зміни структури енергоспоживання, показників енергоємності та енергозбереження на прикладі організації.
4. Назвіть основні етапи впровадження енергозберігаючих технологій в організації.
5. Назвіть та охарактеризуйте основні задачі енергозбереження на прикладі навчального закладу.

Література: [14, с. 134–148].

2 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ АСПІРАНТІВ

Результати роботи аспіранта на практичних роботах оцінюються за формулою:

$$E_{LB} = 40 \cdot \sum_{i=1}^{N} E_i \Big/ (12 \cdot N); \quad E_{LB.\max} = 40,$$

де N – кількість практичних робіт N = 2; E_i – оцінка за кожну практичну роботу:

$$E_i = A_i \cdot 2 + R_i \cdot 2 + Q_i \cdot 2 + D_i \cdot 6; \quad E_{i.\max} = 12,$$

де A_i – активність під час виконання практичних робіт (0/1); R_i – наявність звіту (0/1); Q_i – якість виконання звіту (0/1); D_i – захист звіту (0/1).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Академия, 2004. 256 с.
2. Булгар В. В. Теорія електроприводу: збірник задач. Одеса: Поліграф, 2006. 408 с.
3. Жежеленко И. В., Божко В. М., Вагин Г. Я., Рабинович М. Л. Эффективные режимы работы электротехнологических установок. Київ: Техніка, 1987. 183 с.
4. Ильинский Н. Ф., Рожанковский Ю. В., Горнов А. О.Энергосбережение в электроприводе. Москва: Высш. шк, 1989. 127 с.
5. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Москва: Академия, 2008. 208 с.
6. Данилов О. Л., Костюченко П. А. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов. Москва: АСВ, 2006. 668 с.
7. Ефимов К. А., Львов Д. С. Эффективность новой техники. Москва: Экономика, 1979. 144 с.
8. Закладний А. Н., Праховник А. В. , Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посібник. Київ: Контор, 2005. 408 с.
9. Зеркалов Д. В. Енергозбереження в Україні: у 2 книгах. Кн. 1: Нормативно-правова основа. Енциклопедичний довідник. Київ: Основа, 2006. 684 с.
10. Зеркалов Д. В. Правова основа енергозбереження: довідник. Київ: КНТ, 2007. 400 с.
11. Кузнецов Б. В. Расчеты экономии электроэнергии. − Мінськ: Беларусь, 1983. 80 с.
12. Курчавин В. М., Мезенцев А. П. Экономия тепловой и электрической энергии в поршневых компрессорах. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. 80 с.
13. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. Москва: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.

14. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Хрестоматия энергосбережения: справочное издание. Кн. 1. Москва: Теплотехник, 2005. 668 с.
15. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник [для студ. высш. учебн. заведений]. Москва: Академия, 2007. 368 с.
16. Онищенко Г. Б. Электрический привод: учебник для вузов. Москва: РАСХН, 2003. 320 с.
17. Піцан Р., Бардачекський В., Бойчук Б. Збірник задач з курсу «Електропривод»: навч. посібник. Львів: Видавництво державного університету «Львівська політехніка», 1999. 426 с.
18. Руководство по энергоэффективности. (Сокращенно) Energy Efficiency Handbook /Alliance to Save Energy, Council of Industrial Boiler Operators, U.S. DOE Office of Industrial Technologies. 1998. 64 p.
19. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
20. Яворский М. И. Энергосбережение на промышленных предприятиях: учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2000. 134 с.

Додаток А

Технічні параметри двигунів постійного та змінного струмів

Таблиця А.1 – Технічні параметри двигунів постійного струму серії 2П з висотою осі обертання 225-315 мм, $U_н$=440 В.

№ вар-та	$P_н$, кВт	$I_н$, А	$n_н$, об/хв	$n_{макс}$, об/хв	$\eta_н$	$R_{оя}$, Ом	$R_{дн}$, Ом	$R_{оз}$, Ом	$M_{с,}$ *Нм*	$J_д$, $кгм^2$
1	37	97,2	1500	1850	0,865	0,168	0,0679	43,0	165	0,534
2	18,5	50,7	750	1500	0,830	0,473	0,2080	49,7	165	0,6
3	30	80,7	1060	2250	0,845	0,196	0,0700	38,6	190	
4	22	66,0	1000	1000	0,825	0,353	0,1110	43,0	150	0,47
5	37	96,7	1500	2700	0,870	0,148	0,0640	43,0	165	
6	18,5	50,7	750	1500	0,830	0,473	0,2080	49,1	165	0,58
7	30	80,2	1060	2250	0,850	0,196	0,0800	39,6	190	
8	18	50,8	600	1800	0,805	0,570	0,2500	37,9	200	1,067
9	22	61,7	850	2400	0,810	0,235	0,0960	28,7	175	
10	37	98,9	1060	2500	0,850	0,152	0,0780	28,7	235	
11	50,0	130,6	1500	1800	0,870	0,110	0,0540	29,8	225	
12	55	143,7	1700	2800	0,870	0,059	0,0260	20,2	220	
13	22	61,0	600	1800	0,820	0,380	0,1900	34,4	245	1,131
14	28,0	76,7	750	1900	0,830	0,260	0,1100	34,4	250	
15	45	119,6	1000	1500	0,855	0,122	0,0640	33,4	300	
16	71,0	182,3	1500	2800	0,855	0,065	0,0310	31,2	320	
17	22	62,5	600	1800	0,800	0,568	0,2520	38,0	245	1,22
18	30	84,2	850	2100	0,810	0,235	0,0630	26,8	235	
19	37	98,9	1060	2500	0,850	0,152	0,0780	28,7	235	
20	50,0	130,6	1500	1800	0,870	0,110	0,0540	29,8	225	
21	55	143,7	1700	2800	0,870	0,590	0,0260	20,2	220	
22	26,5	73,9	600	1800	0,815	0,380	0,1950	34,7	300	
23	30	80,9	750	2000	0,843	0,261	0,1150	33,4	270	
24	37	99,8	750	2000	0,832	0,122	0,0640	25,1	330	
25	45	118,9	1000	1500	0,860	0,122	0,0640	33,4	300	

Таблиця А.2 – Технічні параметри асинхронних двигунів

№ вар-та	$P_н$, кВт	$n_н$, об/хв	n_0, об/хв	$I_н$, А	$\eta_н$, %	$cos\varphi_н$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	R_1, Ом	x_1, Ом	R'_2, Ом	x'_2, Ом	$J_д$, кгм^2
1	37,00	2943	3000	70,00	90,0	0,89	7,5	1,4	2,5	0,0900	0,300	0,0700	0,3800	0,15000
2	45,00	2946	3000	83,8	91,0	0,90	7,5	1,4	2,5	0,0700	0,2300	0,0520	0,3400	0,17000
3	55,00	2946	3000	100,0	91,0	0,92	7,5	1,4	2,5	0,0570	0,2000	0,0420	0,2700	0,25000
4	75,00	2958	3000	140,0	91,0	0,89	7,5	1,2	2,5	0,0330	0,1300	0,0240	0,2100	0,47000
5	90,00	2958	3000	165,0	92,0	0,90	7,5	1,2	2,5	0,0260	0,1000	0,0210	0,1700	0,52000
6	110,0	2940	3000	206,0	91,0	0,89	7,0	1,2	2,2	0,0180	0,1000	0,0140	0,1100	1,10000
7	132,0	2940	3000	247,0	91,5	0,89	7,0	1,2	2,2	0,0150	0,0850	0,0110	0,0900	1,20000
8	160,0	2943	3000	294,0	92,0	0,90	6,5	1,0	1,9	0,0110	0,0700	0,0090	0,0900	1,40000
9	200,0	2943	3000	365,0	92,5	0,9	7,0	1,0	1,9	0,0070	0,0500	0,0070	0,0800	1,60000
10	250,0	2943	3000	459,0	92,5	0,90	7,0	1,0	1,9	0,0060	0,0400	0,0050	0,0600	2,90000
11	315,0	2940	3000	564,0	93,0	0,91	7,0	1,0	1,9	0,0050	0,0350	0,0040	0,0400	3,20000
12	55,00	1479	3000	100,0	92,5	0,90	7,0	1,3	2,5	0,0593	0,1890	0,0330	0,3080	0,64000
13	75,00	1482	3000	136,0	93,0	0,90	7,0	1,2	2,3	0,0405	0,1440	0,0227	0,1780	1,00000
14	90,00	1481	3000	162,0	93,0	0,91	7,1	1,2	2,3	0,0328	0,1270	0,0191	0,1640	1,20000
15	110,0	1496	3000	201,0	92,5	0,90	6,0	1,2	2,0	0,0253	0,1340	0,0209	0,1760	2,30000
16	132,0	1466	3000	239,0	93,0	0,90	6,0	1,3	2,0	0,0193	0,1060	0,0166	0,1680	2,50000
17	160,0	1479	3000	285,0	93,5	0,91	6,5	1,3	2,2	0,0139	0,0826	0,0131	0,1158	3,10000
18	200,0	1481	3000	351,0	94,0	0,92	6,5	1,3	2,2	0,0088	0,0540	0,0088	0,0753	3,60000
19	250,0	1485	3000	438,0	94,5	0,92	7,5	1,2	2,0	0,0066	0,0454	0,0066	0,0656	6,00000
20	315,0	1485	3000	548,0	94,5	0,92	7,0	1,2	2,0	0,0048	0,0397	0,0056	0,0561	7,00000
21	37,00	982	3000	69,22	91,0	0,89	6,5	1,2	2,3	0,1300	0,3200	0,0600	0,4000	0,74000
22	46,00	986	3000	85,59	91,5	0,89	6,5	1,2	2,1	0,1000	0,2300	0,0400	0,3600	1,20000
23	55,00	987	3000	103,0	91,5	0,89	6,5	1,2	2,1	0,0700	0,1700	0,0300	0,3000	1,30000
24	75,00	980	3000	139,0	92,0	0,89	7,0	1,2	2,2	0,0500	0,2000	0,0300	0,2100	2,90000
25	90,00	982	3000	165,0	92,5	0,89	7,0	1,2	2,2	0,0400	0,1400	0,0250	0,1600	3,40000

Таблиця А.3 – Технічні параметри асинхронних двигунів

№ вар -та	$P_н$, кВт	2p	s_n	s_k	$\eta_н$, %	$cos\varphi_н$	$\frac{I_n}{I_н}$	$\frac{M_n}{M_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	R_1', Ом	X_1, Ом	R_2', Ом	X_2', Ом	$J_д$, $кгм^2$
Синхронна швидкість обертання 1500/3000 об/хв														
1	0,27	2	12,3	60	61	0,75	4	1,2	2,2	0,089	0,17	0,12	0,12	0,0012
2	0,37	2	14,9	61	61	0,88	4	1,1	1,8	0,19	0,089	0,16	0,12	0,0013
3	0,75	2	11	64	67	0,89	4	1,2	1,8	0,13	0,083	0,12	0,11	0,0014
4	0,95	2	11,3	64,5	69	0,89	4,5	1,3	1,9	0,13	0,084	0,12	0,11	0,0016
5	1,50	2	6,2	42,0	72,0	0,89	4,0	1,5	1,8	0,120	0,067	0,072	0,073	0,0033
6	2,00	2	7,6	40,5	74,0	0,86	5,0	1,7	1,9	0,110	0,074	0,088	0,086	0,0035
7	2,50	2	5,1	44,5	77,0	0,89	6,0	1,8	2,1	0,090	0,066	0,060	0,069	0,0063
8	3,40	2	5,0	41,0	77,0	0,91	6,0	1,8	2,2	0,076	0,78	0,059	0,082	0,0092
9	4,20	2	4,5	40,5	80,0	0,92	7,0	1,8	2,2	0,065	0,070	0,051	0,082	0,0120
10	5,00	2	3,1	29,0	77,0	0,89	7,5	1,1	1,8	0,072	0,071	0,037	0,074	0,0170
11	6,7	2	2,8	24	78	0,9	7,5	1,1	1,8	0,054	0,08	0,033	0,082	0,028
12	9,5	2	2,6	24,5	81	0,9	7,5	1,1	1,8	0,051	0,076	0,03	0,077	0,04
13	14	2	2,7	16,5	83	0,92	7,5	1,2	2	0,06	0,1	0,029	0,11	0,11
14	17	2	2,4	16	84	0,92	7,5	1,2	2	0,054	0,92	0,026	0,11	0,14
15	21	2	2,2	13,5	85	0,93	6,5	1,1	1,8	0,46	0,999	0,023	0,099	0,21
Синхронна швидкість обертання 750/1500 об/хв														
16	1,00	4	4,7	26,5	75,0	0,85	7,5	1,3	1,8	0,120	0,096	0,063	0,160	0,0060
17	1,70	4	4,9	23,0	80,0	0,87	6,0	1,4	1,9	0,110	0,092	0,510	0,150	0,1200
18	2,40	4	5,2	22,0	81,0	0,89	6,0	1,2	1,8	0,100	0,093	0,010	0,150	0,0150
19	3,00	4	4,5	32,5	75,0	0,89	7,5	1,0	1,8	0,100	0,085	0,060	0,092	0,0180
20	3,60	4	3,9	32,0	77,0	0,88	7,5	1,0	1,8	0,092	0,077	0,053	0,088	0,0240
21	5,30	4	3,7	23,5	80,0	0,90	7,5	1,0	1,8	0,089	0,081	0,042	0,100	0,0430
22	7,1	4	2,2	24	82	0,9	7,5	1,0	1,8	0,077	0,075	0,039	0,096	0,058
23	9	4	2,5	15	84	0,92	7	1,2	2	0,062	0,078	0,024	0,12	0,15
24	13	4	2,6	14	86,5	0,91	7,0	1,2	2	0,064	0,86	0,026	0,14	0,2
25	18	4	2,2	11,5	87,5	0,92	6,5	1	1,8	0,64	0,11	0,026	0,14	0,28

Додаток Б

Основні технічні дані асинхронних двигунів серії 4А (номінальна напруга $U_{ном}$=380 В, ступінь захисту 1Р4, 1Р23)

Таблиця Б.1 – Параметри асинхронних двигунів серії 4А

№	Типорозмір двигуна	$P_н$	$n_н$	$I_н$	$\eta_н$	$cos\varphi_н$	$\frac{I_и}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	R_1	X_1	R'_2	X'_2	$J_д$
		кВт	об/хв	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кгм^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Синхронна швидкість обертання n_0=3000 об/хв														
1	4А200L2	45	2946	83,8	91	0,9	7,5	1,4	2,5	0,07	0,23	0,052	0,34	0,17
2	4А225М2	55	2946	100	91	0,92	7,5	1,4	2,5	0,057	0,2	0,042	0,27	0,25
3	4А250S2	75	2958	140	91	0,89	7,5	1,2	2,5	0,033	0,13	0,024	0,21	0,47
4	4А250М2	90	2958	165	92	0,9	7,5	1,2	2,5	0,026	0,1	0,021	0,17	0,52
5	4А280S2	110	2940	206	91	0,89	7	1,2	2,2	0,018	0,1	0,014	0,11	1,1
6	4А280М2	132	2940	247	91,5	0,89	7	1,2	2,2	0,015	0,085	0,011	0,09	1,2
7	4А315S2	160	2943	294	92	0,9	6,5	1	1,9	0,011	0,07	0,009	0,09	1,4
8	4А315М2	200	2943	365	92,5	0,9	7	1	1,9	0,007	0,05	0,007	0,08	1,6
9	4А335S2	250	2943	459	92,5	0,9	7	1	1,9	0,006	0,04	0,005	0,06	2,9
Синхронна швидкість обертання n_0=1500 об/хв														
10	4А180М4	30	1472	62,4	91	0,89	6,5	1,4	2,3	0,12	0,24	0,063	0,423	0,23
11	4А200М4	37	1475	68,8	91	0,9	7	1,4	2,5	0,125	0,273	0,058	0,45	0,37
12	4А200L4	45	1476	82,6	92	0,9	7	1,4	2,5	0,0908	0,219	0,0454	0,374	0,45
13	4А225М4	55	1479	100	92,5	0,9	7	1,3	2,5	0,0593	0,189	0,033	0,308	0,64
Синхронна швидкість обертання n_0=1000 об/хв														
14	4А225М6	37	982	69,22	91	0,89	6,5	1,2	2,3	0,13	0,32	0,06	0,4	0,74
15	4А250S6	46	986	85,59	91,5	0,89	6,5	1,2	2,1	0,1	0,23	0,04	0,36	1,2
16	4А250М6	55	987	103	91,5	0,89	6,5	1,2	2,1	0,07	0,17	0,03	0,3	1,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
17	4A280S6	75	980	139	92	0,89	7	1,2	2,2	0,05	0,2	0,03	0,21	2,9
18	4A280M6	90	982	165	92,5	0,89	7	1,2	2,2	0,04	0,14	0,025	0,16	3,4
Синхронна швидкість обертання n_0=3000 об/хв														
19	4AH160M2	30	2913	55,5	90	0,91	7	1,3	2,2	0,2458	0,4757	0,111	0,5946	0,055
20	4AH180S2	37	2946	67,7	91	0,91	7	1,2	2,2	0,1137	0,273	0,0617	0,325	0,08
21	4AH180M2	45	2943	82,34	91	0,91	7	1,3	2,2	0,1015	0,2378	0,0561	0,2939	0,093
22	4AH200M2	55	2940	102	91	0,9	7	1,3	2,5	0,0582	0,1876	0,0410	0,2588	0,16
23	4AH200L2	75	2940	137	92	0,9	7	1,3	2,5	0,045	0,1509	0,0337	0,2248	0,19
Синхронна швидкість обертання n_0=1500 об/хв														
24	4AH200M4	45	1473	84,19	91	0,89	6,5	1,3	2,5	0,1115	0,2549	0,0531	0,4248	0,35
25	4AH200L4	55	1475	101,8	92	0,89	6,5	1,3	2,5	0,08	0,1923	0,0389	0,3242	0,42

Додаток В

Параметри асинхронних двигунів серії 4А (номінальна напруга $U_{ном}$=380 В, ступінь захисту 1Р4, 1Р23)

Таблиця В.1 – Параметри асинхронних двигунів серії 4А

№	Типорозмір двигуна	$P_н$	$n_н$	$I_н$	$\eta_н$	$cos\varphi_н$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	R_1	X_1	R'_2	X'_2	$J_д$
		кВт	об/хв	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг*м^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Синхронна швидкість обертання n_0=3000 об/хв														
1	4А250М2	90	2958	165	92	0,9	7,5	1,2	2,5	0,026	0,1	0,021	0,17	0,52
2	4А280S2	110	2940	206	91	0,89	7	1,2	2,2	0,018	0,1	0,014	0,11	1,1
3	4А280М2	132	2940	247	91,5	0,89	7	1,2	2,2	0,015	0,085	0,011	0,09	1,2
4	4А315S2	160	2943	294	92	0,9	6,5	1	1,9	0,011	0,07	0,009	0,09	1,4
5	4А315М2	200	2943	365	92,5	0,9	7	1	1,9	0,007	0,05	0,007	0,08	1,6
Синхронна швидкість обертання n_0=1500 об/хв														
6	4А250М4	90	1481	162	93	0,91	7	1,2	2,3	0,0328	0,127	0,0191	0,164	1,2
7	4А280S4	110	1496	201	92,5	0,9	6	1,2	2	0,0253	0,134	0,0209	0,176	2,3
8	4А280М4	132	1466	239	93	0,9	6	1,3	2	0,0193	0,106	0,0166	0,168	2,5
9	4А315S4	160	1479	285	93,5	0,91	6,5	1,3	2,2	0,0139	0,0826	0,0131	0,1158	3,1
10	4А315М4	200	1481	351	94	0,92	6,5	1,3	2,2	0,0088	0,054	0,0088	0,0753	3,6
Синхронна швидкість обертання n_0=1000 об/хв														
11	4А280М6	90	982	165	92,5	0,89	7	1,2	2,2	0,04	0,14	0,025	0,16	3,4
12	4А315S6	110	982	199	93	0,9	7	1	2,2	0,029	0,111	0,02	0,133	4
13	4А315М6	132	983	239	93,5	0,9	7	1,4	2,2	0,021	0,091	0,017	0,11	4,5
14	4А355S6	160	988	291	93,5	0,9	7	1,4	2,2	0,015	0,076	0,011	0,1060	7,3
15	4А355М6	200	987	362	94	0,9	7	1,4	2,2	0,011	0,055	0,008	0,079	8,8

Продовження додатка В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Синхронна швидкість обертання n_0=750 об/хв														
16	4A315S8	90	739	173	93	0,85	6,5	1,2	2,3	0,0292	0,1399	0,0242	0,1653	4,9
17	4A315M8	110	739	211	93	0,85	6,5	1,2	2,3	0,024	0,1043	0,0198	0,1251	5,8
18	4A355S8	132	740	252	93,5	0,85	6,5	1,2	2,2	0,0201	0,1048	0,0148	0,1397	9
19	4A355M8	160	740	305	93,5	0,85	6,5	1,2	2,2	0,0144	0,0866	0,0123	0,1154	10
Синхронна швидкість обертання n_0=3000 об/хв														
20	4A225M2	90	2943	168	92	0,88	7	1,2	2,2	0,0367	0,131	0,0275	0,1571	0,24
21	4A250S2	110	2952	208	93	0,88	7	1,2	2,2	0,0264	0,0994	0,019	0,1481	0,44
22	4A250M2	132	2943	244	93	0,88	7	1,2	2,2	0,0243	0,0902	0,018	0,1352	0,49
23	4A280S2	160	2958	287	94	0,9	6,5	1,2	2,2	0,0169	0,0843	0,0115	0,0997	0,85
24	4A280M2	200	2958	356	94,5	0,9	6,5	1,2	2,2	0,013	0,0569	0,0087	0,0742	1
25	4A315M2	250	2964	440	94,5	0,91	6,5	1	1,9	0,0085	0,05	0,006	0,06	1,7

Додаток Г

Технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А (фазна напруга $U_ф$=220 В)

Таблиця Г.1 – Технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А

№	Типорозмір	$P_н$	η	$cos\varphi$	I_1	$s_н$	X_μ	R_1	X_1	R'_2	X'_2	$\frac{M_{кр}}{M_к}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$s_{кр}$	J
		кВт	%	-	А	-	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	-	-	-	-	$кгм^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Синхронна кутова швидкість 314 $с^{-1}$																
1	4А112М2У3	7,5	87,5	0,88	14,8	0,025	55,2	0,686	0,865	0,417	2,09	2,8	2	1,8	0,17	0,010
2	4А132М2У3	11,6	88	0,9	21	0,023	43,9	0,418	0,638	0,261	1,25	2,8	1,7	1,5	0,19	0,023
3	4А160S2У3	15	88	0,91	28,4	0,021	31	0,403	0,713	0,171	0,93	2,2	1,4	1	0,12	0,048
4	4А160М2У3	18,5	88,5	0,92	34,4	0,021	28,8	0,313	0,588	0,141	0,767	2,2	1,4	1	0,125	0,053
5	4А180S2У3	22	88,5	0,91	41,4	0,019	19,1	0,207	0,483	0,106	0,585	2,5	1,4	1,1	0,125	0,07
6	4А180М2У3	30	90,5	0,9	55,8	0,018	15	0,118	0,288	0,071	0,434	2,5	1,4	1,1	0,125	0,085
7	4А200М2У3	37	90	0,89	70	0,019	12,9	0,091	0,295	0,66	0,377	2,5	1,4	1	0,115	0,15
8	4А200L2У3	45	91	0,9	83,3	0,018	12,95	0,071	0,233	0,053	0,344	2,5	1,4	1	0,115	0,17
Синхронна кутова швидкість 157 $с^{-1}$																
9	4А132S4У3	7,5	87,5	0,86	15,1	0,029	43,7	0,699	1,24	0,481	1,89	3	2,2	1,7	0,195	0,028
10	4А132М4У3	11	87,5	0,87	21,9	0,028	32,1	0,432	0,854	0,321	1,31	3	2,2	1,7	0,195	0,04
11	4А160S4У3	15	88,5	0,88	29,2	0,023	30,2	0,354	0,648	0,188	0,98	2,3	1,4	1	0,16	0,1
12	4А160М4У3	18,5	89,5	0,88	35,6	0,022	26,6	0,26	0,525	0,148	0,803	2,3	1,4	1	0,16	0,13
13	4А180S4У3	22	90	0,9	41,2	0,02	21,4	0,219	0,428	0,112	0,641	2,3	1,4	1	0,14	0,19
14	4А200М4У3	37	91	0,9	68,5	0,017	14,1	0,125	0,276	0,058	0,45	2,5	1,4	1	0,1	0,37
15	4А200L4У3	45	92	0,9	82,4	0,016	12,3	0,091	0,219	0,045	0,374	2,5	1,4	1	0,1	0,45
Синхронна кутова швидкість 104,7 $с^{-1}$																
16	4А132М6У3	7,5	85,5	0,81	16,4	0,032	28,2	0,804	0,939	0,536	1,47	2,5	2	1,8	0,26	0,06
17	4А160S6У3	11	86	0,86	22,5	0,027	29,3	0,713	1,07	0,293	1,46	2	1,2	1	0,15	0,14

Продовження додатка Г

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	4A160M6Y3	15	87,5	0,87	22,9	0,026	22,1	0,457	0,737	0,206	1,18	2	1,2	1	0,14	0,18
19	4A180M6Y3	18,5	88	0,87	36,6	0,024	17,4	0,337	0,661	0,156	0,781	2	1,2	1	0,135	0,22
20	4A200M6Y3	22	90	0,9	41,2	0,023	21,9	0,267	0,588	0,128	0,748	2,4	1,3	1	0,135	0,4
21	4A200L6Y3	30	90,5	0,9	55,8	0,021	14,6	0,181	0,473	0,087	0,512	2,4	1,3	1	0,135	0,45
Синхронна кутова швидкість 78,5 $с^{-1}$																
22	4A160M8Y3	11	87	0,75	25,5	0,025	17,2	0,568	1,12	0,267	1,55	2,2	1,4	1	0,15	0,18
23	4A180M8Y3	15	87	0,82	31,9	0,026	16,6	0,442	0,898	0,207	1,17	2	1,2	1	0,13	0,25
24	4A200M8Y3	18,5	88,5	0,84	37,7	0,023	15,2	0,333	0,759	0,152	0,934	2,2	1,2	1,1	0,13	0,4
25	4A200L8Y3	22	88,5	0,84	44,8	0,027	15,2	0,304	0,687	0,142	0,883	2	1,2	1,1	0,13	0,45