

Алгоритм виконання експрес-діагностування гідроустановок за запропованою методикою автоматизується за допомогою ПЕОМ, у пам'яті якої закладена еталонна сигнатура *NH*-характеристики, а поточні робочі значення напору і потужності сприймаються відповідними датчиками, порівнюються з еталонними значеннями, і в результаті приймається рішення щодо діагнозу про вид несправності гідроустановки.

1. *Техническая диагностика гидравлических приводов* / Под общ. ред. Т.М. Башты // М.: Машиностроение, 1989. – 263с.

2. *Богомолов Н.А. Закономерности изменения режимов работы шахтных водоотливных установок в процессе эксплуатации // Шахтные стационарные установки: – Сб. науч. тр. ИГМТК им. М.М. Федорова. – М.: Недра, 1972. – Вып. 26. – С. 12–15.*

УДК 621.313.322-81:62-83

ЕЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНІЗМІВ ЗА СХЕМОЮ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЗМІННИМ СТРУМОМ

***В.М. Чермалих, докт. техн. наук, О.М. Закладний, канд. техн. наук,
О.Я. Яценко, Бардавіл Імад, аспіранти (НТУУ "КПІ", ІЕЕ)***

Рассмотрены электромеханические свойства вентиляного двигателя со звеном постоянного тока с возбуждением трехфазным переменным током низкой частоты.

Турбомеханізми (вентилятори, насоси, турбокомпресори) є машинами масового застосування. Вони споживають близько 25% всієї вироблюваної електроенергії. Тому технічна досконалість та економічність електроприводів турбомеханізмів значною мірою визначають раціональність використання електроенергії в країні.

У процесі експлуатації машин цього типу в багатьох випадках необхідно регулювати їх подачу (продуктивність). Регулювання подачі зміною частоти обертання електродвигуна – найбільш економічний спосіб. Для таких режимів підходить привод постійного струму, але через складність конструкції електричних машин постійного струму він не застосовується для турбомеханізмів. Тому як регульований електропривод великої потужності застосовують асинхронні машини (АМ) з фазним ротором у режимі подвійного живлення за однією з каскадних схем.

Аналіз спеціальної літератури показав, що для більшості турбомеханізмів досить мати три–чотири робочих швидкості, що досягаються економічними з точки зору споживання електроенергії засобами. Такі режими легко реалізуються електроприводом за схемою вентильного двигуна (ВД) на основі синхронної машини зі збудженням постійним струмом. Управління тиристорами інвертора здійснюється сигналом датчика положення або датчика ЕРС ротора. Головний недолік подібної схеми – відсутність машинної комутації вентилів інвертора під час пуску і роботи на малих частотах обертання. Цей недолік усувається у ВД зі збудженням трифазним змінним струмом (рис. 1).

Якорем двигуна служить ротор АМ, в коло якого включений перетворювач з ланкою постійного струму (ПВ). Як індуктор використовується статор АМ, що живиться від перетворювача трифазної напруги низької частоти (ПНЧ). У даній схемі магнітне поле збудження обертається, завдяки чому в роторі наводиться ЕРС навіть при нульовій швидкості двигуна. Цим забезпечується машинна комутація залежного інвертора в усьому діапазоні частот обертання, в тому числі й при пуску. Важливою перевагою ВД зі збудженням змінним струмом є також відсутність необхідності у встановленні на валу АМ датчика положення ротора.

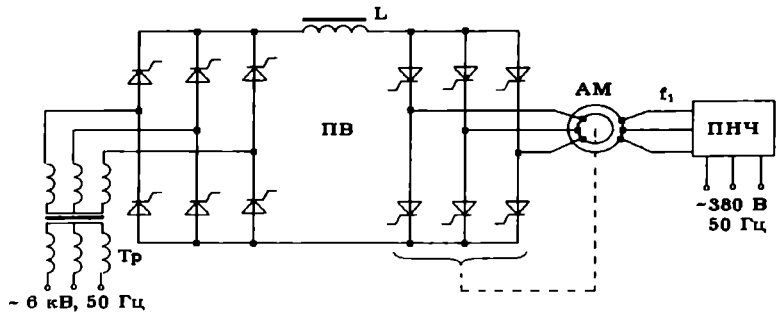


Рис. 1

Аналітичні залежності, що визначають механічні характеристики ВД зі збудженням змінним струмом, можна отримати, якщо розглядати схему як машину подвійного живлення [1] або асинхронно-вентильний каскад (АВК) з керованою роторною групою вентилів [2].

Оскільки поняття ковзання S у схемі ВД має такий же зміст, що й у нормальній схемі вмикання АМ, при обертанні ротора в напрямку проти обертання поля статора (що завжди буває при пуску), то $S = (\omega_1 + \omega) / \omega_1 = \omega_2 / \omega_1 = f_2 / f_1$, де ω – частота обертання ротора; $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$, $\omega_2 = 2\pi f_2 / p$ – кутові швидкості обертання магнітного поля машини відносно статора і ротора; $f_1, f_2 = f_1 + p / (2\pi)$ – частоти напруги статора і ротора; p – число пар полюсів АМ. З формули (1) випливає, що завжди при такому режимі $S \geq 1$.

Дослідження характеристик ВД виконуються на основі загальноприйнятих допущень про заміну реальних несинусоїдальних напруг, ЕРС і струмів їх першими гармоніками. Рівняння електричної рівноваги фаз первинної і вторинної обмоток АМ в режимі ВД за аналогією з нормальною схемою вмикання мають вигляд

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S + j \dot{I}_1 X_{m1} + j \dot{I}_2 X_{21} / S = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S - \dot{E}_1; \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 + j \dot{I}_2 X_{m2} + j \dot{I}_1 X_{12} = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 - \dot{E}_2, \quad (2)$$

де I_1, I_2 – струми статора і ротора; U_1, U_2, E_1, E_2 – фазні напруги і ЕРС статора і ротора; X_1, X_2 – індуктивні опори розсіювання статора і ротора; X_{m1}, X_{m2} – головні індуктивні опори, зумовлені основними гармоніками магнітного поля в повітряному проміжку; X_{12}, X_{21} – індуктивні опори взаємної індукції статора і ротора; r_1, r_2 – активні опори. Всі індуктивні опори в (1), (2) зведені до частоти ротора f_2 , тому в рівнянні (1) є коефіцієнт $1/S$. Якщо позначити $\epsilon = f_{1n}/f_1$, де $f_{1n} = 50$ Гц, то індуктивні опори в (1) і (2) будуть зв'язані з відповідними номінальними значеннями (на частоті 50 Гц) множником S : $X_1 = X_{1n}S/\epsilon$, $X_2 = X_{2n}S/\epsilon$ тощо.

Зведемо режим роботи машини, що обертається, до еквівалентного режиму нерухомої машини. Помноживши обидві частини рівняння (1) на S , перейдемо до величин, зведених до параметрів ротора, і тоді отримаємо

$$SU_1' = I_1' r_1' S + j I_1' X_1' - S E_1'; \quad U_2 = I_2 r_2 + j I_2 X_2 - E_2. \quad (3)$$

Рівнянню (3) відповідає схема заміщення на рис. 2, де X_0 – індуктивний опір намагнічувального контуру, наведений до ротора. Через опір намагнічувального контуру протікає струм $I_0 = I_1' + I_2$, а напруга на затискачах цього кола така: $S E_1' = E_2$.

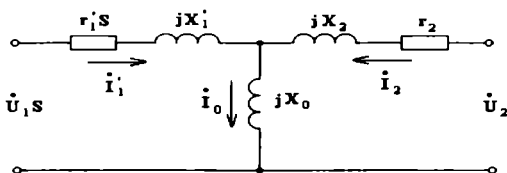


Рис. 2

Для дослідження процесів у колі ротора доцільно перетворити схему (див. рис. 2) згідно з теоремою про еквівалентний генератор (рис. 3).

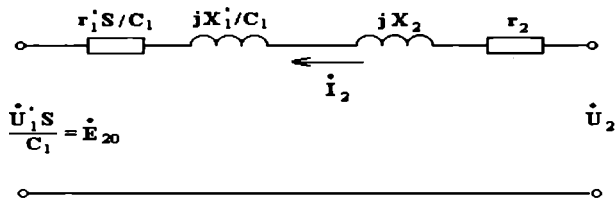


Рис. 3

Коефіцієнт \dot{C}_1 , відомий з теорії АМ, має вигляд

$$\dot{C}_1 = \dot{U}_1 / \dot{E}_1 = 1 + X_1' / X_{0н} - j r_1' \varepsilon / X_{0н} \approx 1 + X_{1н} / X_{0н}. \quad (4)$$

Для того, щоб у схемі ВД забезпечити номінальний намагнічувальний струм машини $I_{0н}$, коли нема струму в роторі, напруга збудження U_1 і номінальна напруга статора в нормальній схемі ввімкнення $U_{1н}$ повинні дорівнювати

$$\begin{aligned} U_1 &= C_1 E_1 = C_1 I_{0н} (X_{1н} + X_{m1н}) / \varepsilon; \\ U_{1н} &= C_1 E_{1н} = C_{1н} I_{0н} (X_{1н} + X_{m1н}), \end{aligned}$$

звідки $U_1 / U_{1н} = E_1 / E_{1н} = 1 / \varepsilon$, що відповідає відомому закону зміни напруги при частотному управлінні асинхронним двигуном.

Середнє значення ЕРС на вході інвертора згідно з [2] визначається за формулою

$$E_d = 3(\sqrt{6} E_{20} \cos \omega + X_x I_x) / \pi, \quad (5)$$

де X_x – комутаційний індуктивний опір; β – кут випередження відкривання вентилів інвертора відносно комутуючої ЕРС.

Електромагнітний момент ВД має вигляд

$$M = E_d I_d (S - 1) / (S \omega) = 3(\sqrt{6} E_{20} I_d \cos \beta + X_x I_d^2) / (\pi \omega_2). \quad (6)$$

Хоч в формулу (6) входить частота ω_2 , електромагнітний момент від неї не залежить, оскільки E_{20} і X_k також пропорційні ω_2 : $E_{20} = E_{2н} S / \epsilon$; $X_k = X_{кн} S / \epsilon$; $\omega_2 = \omega_{1н} S / \epsilon$, де $E_{2н}$ – номінальна фазна ЕРС ротора АМ; $X_{кн}$ – значення X_k на частоті 50 Гц. Отже, $M = 3(\sqrt{6}E_{2н}I_d \cos\beta + X_{кн}I_d^2) / (\pi\omega_{1н})$.

Для даної системи приводу дуже важливим є визначення оптимальної частоти збудження, що забезпечує мінімальну потужність перетворювачів в статорі і роторі.

Якщо при $\omega = \omega_n$ поле статора і ротор обертаються в одному напрямку, то частота струму в роторі обчислюється за формулою

$$f_2 = \omega_{1н} p / (2\pi) - f_{10}. \quad (7)$$

Якби магнітне поле і ротор оберталися в протилежних напрямках, то така частота струму в роторі мала б місце при швидкості $\omega' < \omega_{1н}$, зв'язаній з f_2 співвідношенням

$$f_2 = \omega' p / (2\pi) + f_{10}. \quad (8)$$

Прирівнюючи праві частини (7) і (8), маємо

$$\omega' = \omega_{1н} - 2\omega_1 = \omega_{1н} (1 - 2/\epsilon). \quad (9)$$

Із залежності (9) видно, що чим більша частота поля збудження f_{10} , тим більшу частину потужності привод споживає через статор і тим меншу – через ротор. Тому сумарна встановлена потужність перетворювальних агрегатів у роторі і статорі може мати мінімум при деякому значенні f_{10} .

Сумарна потужність двох перетворювачів дорівнює $P = 3(U_1 I_{1н} + E_{2т} I_{2н})$, де $I_{1н}$, $I_{2н}$ – номінальні струми статора і ротора АМ; U_1 – фазна напруга статора; $E_{2т}$ – напруга вторинної обмотки трансформатора при холостому ході.

Установлена потужність перетворювачів у відносних одиницях

$$P^* = P / (3E_{2н} I_{2н}) = C_1 k_i / \epsilon + U_{2*}, \quad (10)$$

де $C_1 = U_1/E_1$; $k_i = I_{1н}/I_{2н}$; $I_{1н}$ – номінальний струм статора, наведений до ротора; E_1 – ЕРС статора; U_{2*} – коефіцієнт запасу відносно номінальної ЕРС ротора АМ.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в одному напрямку, то

$$U_{2*}' = \cos\beta \{ A_{\max} [(\varepsilon - 1)(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon - 1 \} / \varepsilon, \quad (11)$$

де

$$\left. \begin{aligned} A_{\max} &= 0,5(1/\cos\beta - 1), \quad \beta < 60^\circ; \\ A_{\max} &= (\sqrt{1 + \sin(2\beta - 60^\circ)/\cos^2\beta} - 1)/2, \quad \beta \geq 60^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

r_{1*} , r_{2*} – еквівалентні опори статора і ротора.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в протилежних напрямках, то

$$U_{2*}' = \cos\beta \{ A_{\max} [(\varepsilon + 1)(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon + 1 \} / \varepsilon. \quad (13)$$

Продиференціювавши (10) по ε з урахуванням (11) і (13) і прирівнявши похідні до нуля, дістанемо

$$\varepsilon_0' = \sqrt{(c_1 k_i / \cos\beta - A_{\max} - 1) / (r_{1*} A_{\max})}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{(c_1 k_i / \cos\beta + A_{\max} + 1) / (r_{1*} A_{\max})}. \quad (15)$$

Співвідношення (14) має зміст тільки при

$$c_1 k_i / \cos\beta > A_{\max} + 1. \quad (16)$$

Вважаючи, що $\beta < 60^\circ$ і підставляючи A_{\max} з (12) в (16), після перетворень дістанемо

$$c_1 k_i > \cos^2(\beta/2). \quad (17)$$

Оскільки $c_1 \geq 1$ і $k_i > 1$, то нерівність (17) завжди виконується і функція (10) має мінімум. Порівняння співвідношень (14) і (15) показує, що $\varepsilon_0' < \varepsilon_0$, тобто в системі з реверсом напрямку поля збудження оптимальна частота поля більша.

За допомогою формули (10) при заданій частоті збудження можна визначити мінімальну сумарну потужність перетворювачів.

Формування сигналу заданої частоти (f_{13}) перетворювача–збуджувача відбувається звичайно в функції заданої швидкості обертання двигуна. При пуску поле збудження обертається в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, з частотою $f_1 = f_{13}$. У такому режимі система працездатна до досягнення швидкості $\omega = \omega_n(1-1/\epsilon)(1-2/\epsilon)$.

При подальшому збільшенні швидкості відбувається зменшення частоти f_1 до нуля з наступним збільшенням її до первинного значення f_{10} , але з напрямком обертання поля, що збігається з напрямком обертання ротора.

Дослідження отриманих залежностей показує, що:

у ВД зі збудженням змінним струмом існує оптимальне значення частоти поля збудження, що забезпечує мінімальну сумарну встановлену потужність перетворювальних агрегатів у роторі і статорі. Ця частота залежно від кута β випередження відмикання вентилів інвертора становить 4–6 Гц;

керуючи частотою поля збудження і напрямком його обертання, можна змінювати швидкість обертання робочого колеса турбомашини при куті управління трансформаторною групою вентилів $\alpha_\tau = 0$, що забезпечує найбільш економічний режим;

при переведенні АМ у режим ВД зі збудженням змінним струмом виключається несиметричне нагрівання обмоток статора, знижуються теплові втрати і, отже, відпадає необхідність у значному запасі потужності двигуна [3].

1. Сонин Ю.П. Статические характеристики машины двойного питания в режиме вентиляного двигателя // *Электричество*. – 1985. – №4. – С. 62–64.
2. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентиляные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
3. Чермалых В.М., Баринберг В.А. Перегрузочная способность асинхронной машины с фазным ротором в схеме вентиляного двигателя // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1985. – №4. – С. 34–40.