

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 62-83

Морозов Д. І.¹, Шевченко І. С.²

¹Канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Донбаський державний технічний університет, м. Алчевськ, Україна, E-mail: dimogozov@mail.ru.

²Канд. техн. наук, доцент, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Донбаський державний технічний університет, м. Алчевськ, Україна

ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БАЗІ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ОБЕРНЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

В статті розглядається варіант реалізації вентильного двигуна як машини постійного струму з зовнішнім вентильним комутатором – аналогом колектора, який винесено з машини. Якір машини має конструкцію, подібну до конструкції фазного ротора асинхронної машини. Запропонований варіант двигуна постійного струму фактично є синхронною машиною оберненої конструкції з частотним регулюванням за якорем та має опис подібний до опису традиційної явно полюсної синхронної машини. Показано, що вентильний двигун на основі вентильного двигуна має кращі динамічні властивості за класичний двигун постійного струму.

Ключові слова: електропривод, синхронна машина, вентильний двигун.

ВСТУП

Успіхи в теорії, проектуванні та технології виготовлення машин постійного струму забезпечили їх високу довершеність. Але вимоги автоматизованого електропривода (ЕП) та електроенергетики у ряді випадків не можуть бути реалізовані при використанні електричних машин з традиційним механічним колектором. Велика окружна швидкість колектора і, як наслідок, високі значення реактивної ЕРС, обмеження перевантажувальної здатності за струмом якоря та швидкістю його змінювання, сильна вібрація і швидке зношування щіток не дозволяють підняти граничну потужність машин постійного струму при частоті обертання 3600 об/хв більше 350 кВт [1].

Досягнення сучасної перетворювальної техніки роблять актуальним питання заміни механічного комутатора (колектора) статичним вентильним – це дозволить підняти машину постійного струму на новий якісний рівень [2]. Електричні машини постійного струму з статичним колектором (комутатором) одержали назву вентильних двигунів. Вентильні електроприводи можуть реалізовуватися на базі синхронних машин (СМ), які мають зараз найбільшу одиничну потужність при частоті обертання 3000 об/хв і більше. У ряді галузей промисловості (нафтовій, газовій, гірничорудній і інш.) необхідні глибоко регульовані ЕП потужністю тисячі кіловат з частотою обертання 6000÷9000 об/хв і більше. Доцільним є використання в режимі вентильного двигуна багатополісних низькочастотних синхронних машин для потужного тихохідного ЕП [3].

Мета роботи – показати високі статичні та динамічні можливості вентильних двигунів постійного струму на базі СМ оберненої конструкції.

МАТЕРІАЛИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Нормальна машина постійного струму, якщо її розглядати окремо від колектора, по суті своїй є багатофаз-

ною синхронною машиною оберненої конструкції. Механічний колектор інвертує постійний струм у багатофазний змінний, що змінюється за трапецевидним законом. Частота основної гармоніки цього струму жорстко пов'язана з частотою обертання ротора, а щітки, які фіксують момент комутації струму, нерухомі відносно полюсів. Тобто, комутація струму в секції (фазі) проходить при певному положенні її відносно індуктора, що визначається місцезнаходженням щіток на колекторі в певний момент часу. Специфічність нормального режиму такої «синхронної» машини заключається в тому, що кут між віссю результуючого магнітного потоку у зазорі та повздовжньою віссю полюсів має обмежене змінювання, при якому неможливий асинхронний хід ротора. Усі секції якірної обмотки або їх симетричні групи можуть бути приєднані до контактних кілець, числом яких буде визначатись фазність змінної напруги якоря, а частотою f – кутова швидкість ω_{ψ} руху його магнітного поля відносно ротора в сторону, протилежну напрямку обертання останнього з такою ж швидкістю в усталених режимах.

Слід наголосити, що магнітні поля, які створюються усіма обмотками машини (рис. 1) практично нерухомі у просторі, що дозволяє розглядати її як машину постійного струму. Отже, при живленні машини постійним струмом зі сторони колектора, або при живленні оберненої СМ змінним струмом частотою f зі сторони контактних кілець, формування її моменту йде за одними й тими ж залежностями, тобто за таких умов синхронна машина еквівалентна за процесами машині постійного струму і останню можна замінити синхронною. Необхідно лише правильно організувати вмикання-вимикання ключів (комутаторів) вентильного перетворювача, що формує m -фазну напругу на контактних кільцях.

Основними елементами вентильних двигунів (ВД) є синхронна машина M з датчиком положення ротора BS та вентильний перетворювач частоти ПЧ. Струми фаз ротора регулюються по кожній фазі контуром струму з регуляторами РС (рис. 2). Сигнали завдання на струми

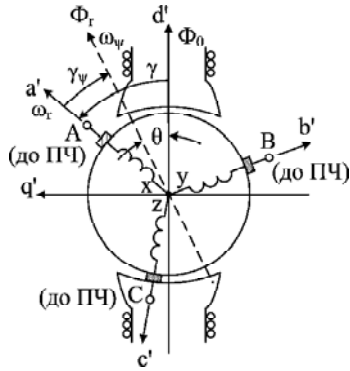


Рисунок 1 – Розрахункова схема вентильного двигуна на базі СМ оберненої конструкції

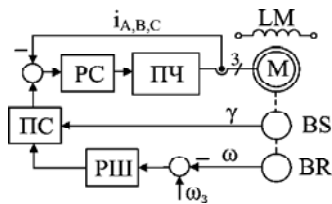


Рисунок 2 – Спрощена функціональна схема ВД

фаз ротора формуються пристроєм синхронізації (ПС) відповідно до положення ротора γ . Рівень активної складової струму ротора задається регулятором швидкості РШ.

Для ВД більш інформативними є механічні характеристики $M(\omega)$. У цьому випадку частота f напруги (струму), яка подається на якірні обмотки, не є незмінною, що забезпечує абсолютно жорсткі механічні характеристики двигуна. У ВД за допомогою змінної частоти f забезпечується певне положення потоків Φ_0 і Φ_r , наприклад 90 електричних градусів. Тому, при збільшенні навантаження на вал машини, система керування за допомогою датчика положення ротора зменшує частоту напруги ПЧ, тобто швидкість якірного потоку відносно ротора, відновлюючи задане просторове положення потоків при зменшеній швидкості обертання ротора. Через це механічні характеристики ВД мають не абсолютну жорсткість і подібні до таких двигунів постійного струму [4].

Вентильний колектор (ПЧ+BS) забезпечує орієнтацію результуючого вектора потоку якоря відносно полюсів індуктора у відповідності з вимогами управління двигуном. Тип вентильного колектора (ВК) визначається способом завдання кутових параметрів, які формують взаємне положення та модулі векторів основних гармонік ЕРС холостого ходу, напруги і струму якоря.

У ВК, що виконується на базі інвертора струму (ІС), який є найбільш повним аналогом механічного колектора, BS задає фазовий кут ψ_1 між основними гармоніками струму та ЕРС холостого ходу. Це так званий ВК І-го типу. У механічному колекторі цей кут незмінний і при розташуванні щіток на геометричній нейтралі дорівнює нулю. Для ВК цей кут може розглядатися як незалежний параметр керування СМ.

У ВК, які виконані на базі інверторів напруги (ІН), BS задає кут між основними гармоніками напруги і струму

якоря (для СМ – кут навантаження θ) – це ВК ІІ-го типу. Якщо у СМ він визначає величину M_e , то при ВК ІІ-го типу цей кут також є незалежним параметром керування, за допомогою якого можна впливати на електромеханічні властивості ВД.

У ВК ІІІ-го типу на базі ІС та датчика ЕРС якоря замість BS задається фазовий кут ϕ_1 між основними гармоніками напруги і струму якірних обмоток.

Як приклад, наведемо рівняння електромеханічної характеристики ВД з ВК І-го типу [4]

$$\omega = \frac{2}{3} \frac{(U_d - 2\Delta U_v) - K_r r_r I_{mr}}{L_{ad} I' f_0 \cos \psi_1 - \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_{mr} \sin \psi_1}, \quad (1)$$

де U_d – напруга на вході інвертора; ΔU_v – падіння напруги на одному вентилі інвертора.

Одержана таким чином машина є синхронною машиною оберненої конструкції, у якій індуктор і якір помінялися місцями. Тому для аналізу як статичних, так і динамічних режимів прийнята загальновідома теорія двох реакцій Блонделя, як і при розгляді процесів в СМ класичного виконання. Для найбільш чіткого виявлення важливих фізичних положень будемо розглядати варіант двигуна з ненасиченою магнітною системою, у якій приймаються до уваги тільки основні хвилі магнітних полів, що створені магніторушійними силами (МРС) незалежного збудження та реакції якоря. При цьому нехтуємо втратами в сталі на вихрові струми та гістерезис, а також активними в обмотках. На рис. 1 показано взаємне положення обмоток якоря та індуктора у певний момент часу t . Для запису рівнянь потোকзчеплень прийняті такі позитивні напрямки осей: повздовжня вісь статора d' – напрямком основного потоку Φ_0 індуктора, тобто обмотки збудження на статорі; поперечна вісь q' – випереджає повздовжню на 90° . За позитивний напрямки осей a', b', c' обмоток якоря (ротора) приймемо напрямком магнітного потоку, що генерується даною обмоткою при проходженні в ній струму від її початку (входу) до кінця (виходу).

Положення ротора (вісь обмотки A') відносно осі основного потоку Φ_0 статора визначається кутом $\gamma = \int \omega_r dt$, а положення осі результуючого потоку Φ_r якоря відносно осі обмотки A' – $\gamma_\psi = \int \omega_\psi dt$, де ω_r, ω_ψ – електричні швидкості обертання ротора ($\omega_r = p_n \omega$) та потоку якоря відносно ротора ($\omega_\psi = 2\pi f$) відповідно. Положення потоків між собою у просторі (у ідеальному випадку $\Theta = \pi/2$) встановлюється регулюванням змінення частоти f струму (напруги), що підводиться до обмоток якоря від перетворювача частоти (ПЧ).

Оскільки при аналізі будуть враховуватись трансформаторні зв'язки обмоток ротора і статора, то параметри статорних обмоток вважаються приведеними до роторних (основних).

Струми $I_{fd'}$ та $I_{fq'}$ по повздожній і поперечній осях статора створюють МРС

$$F_{fd'} = k_F w I_{fd'}, F_{fq'} = k_F w I_{fq'}, \quad (2)$$

де $I_{fd'}$, $I_{fq'}$ – суми еквівалентних струмів у всіх колах на повздожній та поперечній осях статора; w – приведене до якоря число витків обмотки збудження; k_F – коефіцієнт форми поля.

Потокозчеплення фази А' якоря (ротора), яке створене МРС індуктора (статора)

$$\Psi_{Af} = k_F \lambda_d w^2 I_{fd} \cos \gamma - k_F \lambda_q w^2 I_{fq} \sin \gamma, \quad (3)$$

де λ_d , λ_q – магнітні провідності по повздожній і поперечній осях статора; γ – кут між позитивними напрямками повздожньої осі статора та осі обмотки фази А' ротора.

Для визначення потокозчеплення фази А' обмотки ротора від МРС роторної системи необхідно розглядати потоки роторної системи, що замикаються через магнітопровід статора, та потоки, які замикаються мимо нього, оскільки перші залежать від положення ротора, а другі від останнього не залежать.

Струми i_A, i_B, i_C обмоток ротора (якоря) створюють по повздожній та поперечній осях статора МРС

$$F_d = k_F w [i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - 2\pi/3) + i_C \cos(\gamma + 2\pi/3)]; \\ F_q = -k_F w [i_A \sin \gamma + i_B \sin(\gamma - 2\pi/3) + i_C \sin(\gamma + 2\pi/3)]. \quad (4)$$

Потокозчеплення фази А', що створене МРС якоря

$$\Psi_{Ar} = k_F w^2 \lambda_d \cos \gamma [i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - 2\pi/3) + \\ + i_C \cos(\gamma + 2\pi/3)] + k_F w^2 \lambda_q \sin \gamma [i_A \sin \gamma + \\ + i_B \sin(\gamma - 2\pi/3) + i_C \sin(\gamma + 2\pi/3)]. \quad (5)$$

Після введення таких позначень [5]

$$x_{d1} = k_F w^2 \left[\frac{\lambda_d + \lambda_q}{2} + \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \right] \omega_{0e} = k_F w^2 \lambda_d \omega_{0e}; \\ x_{q1} = k_F w^2 \left[\frac{\lambda_d + \lambda_q}{2} - \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \right] \omega_{0e} = k_F w^2 \lambda_q \omega_{0e} \quad (6)$$

де $\omega_{0e} = 2\pi f$ – кругова частота напруг (струмів) перетворювача частоти, що живить обмотки якоря.

Виразу (5) можна надати такий вид:

$$\Psi_{Ar} = \frac{x_{d1} + x_{q1}}{2\omega_{0e}} \left[i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right] + \\ + \frac{x_{d1} - x_{q1}}{2\omega_{0e}} [i_A \cos 2\gamma + i_B \cos(2\gamma - 2\pi/3) + i_C \cos(2\gamma + 2\pi/3)]. \quad (7)$$

Тоді повне потокозчеплення фази А якоря з усіма потоками, створеними МРС якоря,

$$\Psi_{Ar} = \left\{ x_{\sigma} i_A - x_{\sigma m} (i_B + i_C) + \frac{x_{d1} + x_{q1}}{2} \left[i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{x_{d1} - x_{q1}}{2} [i_A \cos 2\gamma + i_B \cos(2\gamma - 2\pi/3) + \right. \\ \left. + i_C \cos(2\gamma + 2\pi/3)] \right\} \frac{1}{\omega_{0e}}, \quad (8)$$

де x_{σ} – реактивний опір однієї обмотки якоря (ротора) від потоків розсіяння; $x_{\sigma m}$ – реактивний опір взаєміндукції двох обмоток якоря від потоків, що замикаються не через магнітопровід статора.

Вираз для повного потокозчеплення обмотки фази А якоря матиме вид:

$$\Psi_{Ar} = \Psi_{Af} + \Psi_{Ar} = \left\{ x_{d1} I_{fd} \cos \gamma - x_{q1} I_{fq} \sin \gamma + \right. \\ \left. + x_{\sigma} i_A - x_{\sigma m} (i_B + i_C) + \frac{x_{d1} + x_{q1}}{2} \left[i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{x_{d1} - x_{q1}}{2} [i_A \cos 2\gamma + i_B \cos(2\gamma - 2\pi/3) + \right. \\ \left. + i_C \cos(2\gamma + 2\pi/3)] \right\} \frac{1}{\omega_{0e}}. \quad (9)$$

Враховуючи [5], що

$$x_{\sigma} + x_{\sigma m} + \frac{3}{2} x_{d1} = x_d = x_r + x_{ad}; \\ x_{\sigma} + x_{\sigma m} + \frac{3}{2} x_{q1} = x_q = x_r + x_{aq}; \\ x_{\sigma} + x_{\sigma m} = x_r; \quad \frac{3}{2} x_{d1} = x_{ad}; \quad \frac{3}{2} x_{q1} = x_{aq};$$

$$x_{d1} = \frac{2}{3} x_{ad}; \quad x_{q1} = \frac{2}{3} x_{aq}, \quad (10)$$

повні потокозчеплення фаз А,В,С якоря можна записати так:

$$\Psi_A = \left\{ \frac{2}{3} x_{ad} I_{fd} \cos \gamma - \frac{2}{3} x_{aq} I_{fq} \sin \gamma + \right. \\ \left. + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{x_0}{3} (i_A + i_B + i_C) + \frac{x_d - x_q}{3} [i_A \cos 2\gamma + i_B \cos(2\gamma + \right. \\ \left. + 4\pi/3) + i_C \cos(2\gamma - 4\pi/3)] \right\} \frac{1}{\omega_{0e}};$$

$$\begin{aligned} \Psi_B = & \left\{ \frac{2}{3} x_{ad} I_{fd} \cos(\gamma - 2\pi/3) - \frac{2}{3} x_{aq} I_{fq} \sin(\gamma - 2\pi/3) + \right. \\ & + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_B - \frac{i_C + i_A}{2} \right) + \\ & + \frac{x_0}{3} (i_A + i_B + i_C) + \frac{x_d - x_q}{3} [i_A \cos(2\gamma - 4\pi/3) + \\ & \left. + i_B \cos 2\gamma + i_C \cos(2\gamma + 4\pi/3)] \right\} \frac{1}{\omega_{0e}}; \\ \Psi_C = & \left\{ \frac{2}{3} x_{ad} I_{fd} \cos(\gamma + 2\pi/3) - \frac{2}{3} x_{aq} I_{fq} \sin(\gamma + 2\pi/3) + \right. \\ & + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_C - \frac{i_A + i_B}{2} \right) + \\ & + \frac{x_0}{3} (i_A + i_B + i_C) + \frac{x_d - x_q}{3} [i_A \cos(2\gamma + 4\pi/3) + \\ & \left. + i_B \cos(2\gamma - 4\pi/3) + i_C \cos 2\gamma] \right\} \frac{1}{\omega_{0e}}, \quad (11) \end{aligned}$$

де $x_0 = (x_\sigma - 2x_m)$ – індуктивний опір для струмів нульової послідовності; x_d, x_q – синхронні реактивні опори обмоток якоря по повздожній та поперечній осях.

Повні потокозчеплення статора по повздожній та поперечній осях можна визначити так:

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} = \Psi'_{sd} + \Psi_{fd} = & \frac{(x_{\sigma d} + x_{d1})}{\omega_{0e}} I_{fd} + \frac{x_{d1}}{\omega_{0e}} [i_A \cos \gamma + \\ & + i_B \cos(\gamma - 2\pi/3) + i_C \cos(\gamma + 2\pi/3)]; \\ \Psi_{sq} = \Psi'_{sq} + \Psi_{fq} = & \frac{(x_{\sigma q} + x_{q1})}{\omega_{0e}} I_{fq} - \frac{x_{q1}}{\omega_{0e}} [i_A \sin \gamma + \\ & + i_B \sin(\gamma - 2\pi/3) + i_C \sin(\gamma + 2\pi/3)], \quad (12) \end{aligned}$$

де Ψ'_{fd}, Ψ'_{fq} – потокозчеплення обмоток статора від МРС обмоток ротора, відповідно по осях d' і q' ; Ψ_{fd}, Ψ_{fq} – потокозчеплення від потоків статора, які замикаються через ротор; $x_{\sigma q}$ – реальний реактивний опір демпферної обмотки від потоків розсіяння (поперечна вісь); $x_{\sigma d}$ – еквівалентний реактивний опір обмоток збудження та демпферної обмотки від потоків розсіяння (спільний шлях по повздожній осі).

Складові потокозчеплення ротора (якоря) по осях d' – q' , відповідно Ψ_{sd} та Ψ_{sq} , можна одержати, виконавши прямі перетворення Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C :

$$\Psi_{rd} = \frac{2}{3} \left[\Psi_A - \frac{1}{2} (\Psi_B + \Psi_C) \right]; \Psi_{rq} = (\Psi_B - \Psi_C) / \sqrt{3}. \quad (13)$$

Замінимо в (11)–(13) γ на $\gamma_\psi + \Theta = \omega_\psi t + \Theta = 2\pi f t + \Theta$. Скориставшись загальновідомим виразом для електромагнітного моменту

$$M_e = \frac{3}{2} p_n \frac{k_s}{\sigma x_d} \omega_{0e} [\Psi_{sd} \Psi_{rq} - \Psi_{sq} \Psi_{rd}], \quad (14)$$

та виконавши відповідні перетворення, одержимо рівняння кутової характеристики явнопольосного двигуна при живленні його від джерела симетричної трифазної напруги U_j ($i_0 = i_A + i_B + i_C = 0, i_A - (i_B + i_C) / 2 = 0$) в усталеному режимі

$$M_e = \frac{3}{z_q \omega_0} [E_q U_1 \sin(\theta + \alpha) - E_q^2 \sin \alpha], \quad (15)$$

де $U_j = U_m \sin(2\pi f t - \phi_j) = i_j r_r + \frac{d\Psi_j}{dt} = i_j r_r + E_{\sigma j} + E_{0j}$,

$j = A, B, C, \phi_j = 0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$; U_1 – ефективне значення

напруги живлення, $U_1 = U_m / \sqrt{2}$; E_q – еквівалентна ЕРС явнопольосної синхронної машини, якщо розглядати її як неявно полюсну з синхронним опором, що дорівнює x_q реальної явнопольосної,

$$\begin{aligned} E_q = E_0 + I_d (x_d - x_q) = & E_0 + \frac{x_d - x_q}{x_d} (U_1 \cos \theta - E_0) = \\ = E_0 \frac{x_q}{x_d} + \left(1 - \frac{x_q}{x_d} \right) & U_1 \cos \theta; \quad (16) \end{aligned}$$

де E_σ, E_0 – величини ЕРС, що наводяться (індукуються) в обмотках якоря від потоків розсіяння та основного (індуктора) відповідно; z_d, z_q – повна величина опору якірної (роторної) обмотки відповідно по повздожній та поперечній осях машини, $z_d = \sqrt{r_r^2 + x_d^2}$;

$z_q = \sqrt{r_r^2 + x_q^2}$; r_r – величина активного опору якірної обмотки; α – кут, що враховує активний опір обмотки якоря в кутовій характеристиці двигуна, $\alpha = \arcsin(r_r / z_d)$; k_s – коефіцієнт магнітного зв'язку статорних і роторних обмоток, $k_s = x_{ad} / x_d$; σ – коефіцієнт розсіяння по Блонделю.

При нехтуванні величиною активного опору якірних обмоток ($r_r = 0$) рівняння (15) перетворюється у відоме спрощене рівняння кутової характеристики явнопольосного синхронного двигуна [6]:

$$M_e = \frac{3}{x_q \omega_0} U_1 E_0 \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

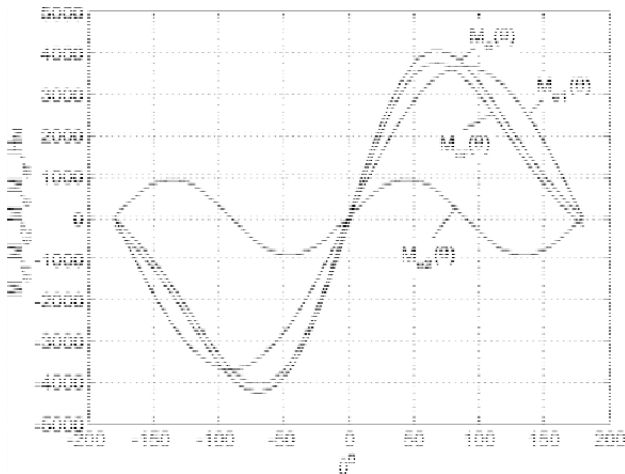


Рисунок 3 – Кутові характеристики вентильного двигуна при фіксованій частоті f якірної напруги

На рис. 3 наведені кутові характеристики вентильного явнопольного двигуна на базі параметрів машини СМ 136-8 при врахуванні та нехтуванні ($\alpha = 0$) величиною активного опору якірної обмотки ($r_r = 0$) і при $f = \text{const}$. Як видно з нього, активний опір останньої зміщує кутову характеристику вниз і вліво відносно координатних осей. Це природно, оскільки для покриття втрат енергії в r_r у режимі генератора з вала необхідно взяти більше енергії, для чого магнітний потік якірної (роторної) обмотки повинен випереджати основний потік індуктора на більший кут θ . При роботі ж машини двигуном ці втрати зменшують енергію взаємодії магнітних потоків, через що двигун випадає з синхронізму раніше (при меншому θ). На рис. 3 позначені електромагнітні моменти: M_{e1} – синхронний; M_{e2} – індукторний (реактивний); M_e – повний момент без врахування падіння напруги на опорі r_r , $M_e = M_{e1} + M_{e2}$; M_{er} – повний момент з врахуванням впливу опору r_r .

При коливаннях ротора, при інших порушеннях синхронного ходу, а також при зміннях струмів в якірних (роторних) обмотках завдяки трансформаторному зв'язку в обмотці збудження виникає додатковий змінний струм. Активна складова цього струму при взаємодії з потоком ротора генерує асинхронний момент такого ж роду, як і в нормальній асинхронній машині при наявності ковзання s ротора відносно результуючого магнітного потоку:

$$M_a = \frac{3E_2^2 r_2 s}{\omega_0 (r_2^2 + x_k^2 s^2)}, \quad (17)$$

де E_2 – фазна ЕРС, яка наводиться в роторній обмотці; r_2, x_k – параметри АМ.

Для синхронної машини можна записати:

$$\begin{cases} E_2^2 = (U_1 \sin \theta)^2 (x'_f / x'_1); \\ r_2 = r_f; x_k = x'_f; \\ \frac{1}{x'_1} = \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}; s = \frac{f_k}{f_1}, \end{cases} \quad (18)$$

де U_1 – фазна напруга, яка підводиться до якірних (роторних) обмоток; f_k, f_1 – частоти коливань ротора та напруги роторних обмоток відповідно; x'_f, x'_d – еквівалентні перехідні опори обмотки збудження та якірної по повздовжній осі.

Тоді

$$\frac{x'_f}{x'_1} = \frac{1}{1 + (x_1 / x_{ad})^2} = \frac{1}{\sigma_1^2}, \quad (19)$$

де σ_1 – коефіцієнт приведення опорів в схемах заміщення. Після підстановки (18) в (17) одержимо:

$$M_a = \frac{3U_1^2}{\sigma_1^2 \omega_0} \frac{r_f s}{(r_f^2 + x_f^2 s^2)} \sin^2 \theta.$$

Враховуючи, що $\theta = \theta_0 + st$ (t – час в радіанах) та зв'язок між асинхронним M_a і демпферним моментами.

$$M_a = M_d \frac{d\theta}{dt} = M_d s,$$

Маємо вираз для визначення величини демпферного моменту СМ, який «заспокоює» ротор при коливаннях:

$$M_d = \frac{3U_1^2}{\sigma_1^2 \omega_0} \frac{r_f}{(r_f^2 + x_f^2 (f_k / f_1)^2)}. \quad (20)$$

Для підсилення заспокійливого ефекту в СМ на магнітній осі основних полюсів можна розмістити додатково короткозамкнені демпферні обмотки.

Вентильний двигун на базі синхронної машини оберненої конструкції має більшу переважувальну здатність порівняно з двигуном постійного струму тієї ж номінальної потужності і швидкості завдяки тому, що струм ротора не обмежується механічним інвертором – колектором. До того ж електромагнітні інерційності якої традиційної машини постійного струму та СМ оберненої конструкції практично однакові. Якщо ж у СМ оберненої конструкції зменшити повітряний зазор, наприклад за рахунок використання неявнопольної конструкції індуктора [2, 7] як це реалізовано в машинах серії 4П,

оскільки дію реакції ротора (якоря) можна зменшувати положенням потоків якоря відносно потоку індуктора за допомогою ПЧ, то можна зменшувати і індуктивності розсіяння останньої та підвищувати швидкодію формування її якірних струмів.

На рис. 4 наведені результати моделювання перехідних процесів пуску та накиду навантаження для двох дви-

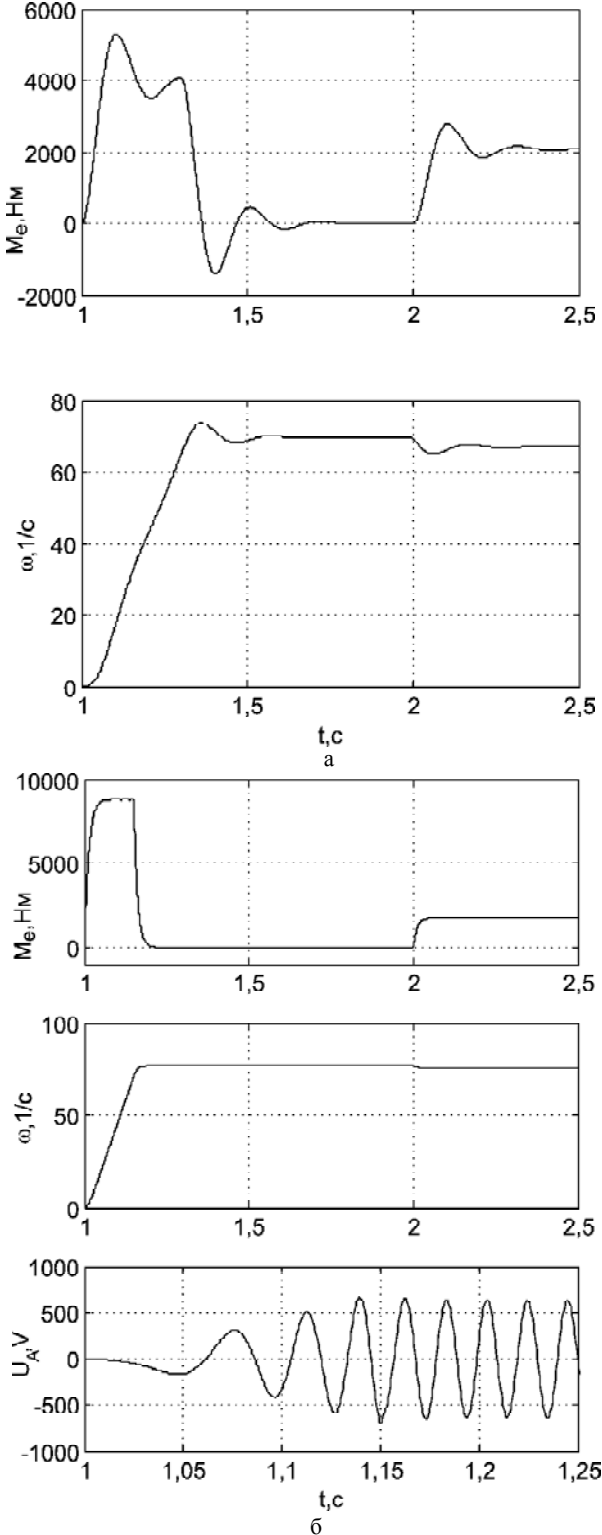


Рисунок 4 – Перехідні процеси: а – традиційного двигуна постійного струму, б – ВД на базі СМ оберненої конструкції

гунів – вентиляного з електричними параметрами машини СМ136-8 ($P_n = 146$ кВт, $n_n = 750$ об/хв, $U_n = 380$ В, $I_n = 312$ А, $J = 21,75$ кгм²) та традиційного постійного струму ДП-82А ($P_n = 140$ кВт, $n_n = 640$ об/хв, $U_n = 220$ В, $I_n = 700$ А, $J = 17,0$ кгм²). Модель вентиляного двигуна побудовано за відомим описом неявнополюсної СМ традиційної конструкції в реальних просторових координатах. Як видно з рисунку, час розгону ВД приблизно в 2 рази менший, ніж двигуна постійного струму тільки за рахунок підвищення перевантажувальної здатності за струмом у першого. Якщо момент інерції ВД прийняти як у другого (і меншим через відсутність колектора), то динаміка його буде ще кращою.

Слід зауважити, що максимальна швидкість ротора традиційного двигуна постійного струму обмежується комутацією на колекторі (загрозою «кругового вогню»). У ВД це обмеження знімається і максимальна швидкість (а значить і потужність) його може бути суттєво підвищена. Все сказане забезпечить електроприводу на базі такої машини значно більшу конкурентність у використанні за всіма показниками по відношенню до традиційної системи ТП-Д і навіть ПЧ-АД [8, 9].

ВИСНОВКИ

1. За рахунок зменшення моменту інерції ротора, а також збільшення перевантажувальної здатності за струмом динамічні властивості вентиляного двигуна на базі СМ оберненої конструкції по відношенню до двигуна постійного струму значно (на десятки процентів) посилюються.

2. Завдяки зняттю ряду обмежень по комутації струмів, рівні максимальних швидкостей, а значить, і потужностей, у ВД можуть бути суттєво підвищені.

3. Реалізація неявнополюсної конструкції статора значно спрощує ВД, а значить і трудомісткість його виготовлення, та втрати в міді.

4. Для аналізу процесів власне у вентиляному двигуні та одержання його моделі можна використовувати відомі підходи, подібні до таких для СМ та ДПТ. На характеристики електропривода з вентиляним двигуном будуть впливати процеси в силовому комутаторі, які слід враховувати додатково.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hoover D. B. Rotating-exciter design keeps pace with generator // Progress Power. – 1960. – April. – P. 445–447.
2. Луцик В. Д. Неявнополюсні машини постійного струму : монографія / В. Д. Луцик. – Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2013. – 120 с.
3. Аракелян А. К. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев, М. Г. Чиликин ; под ред. М. Г. Чиликина. – М. : Энергия, 1977. – 224 с.
4. Шевченко І. С. Електромеханічні і енергетичні процеси в синхронному електроприводі : навч. посіб. / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов, Н. І. Андреева. – Алчевськ : ДонДТУ, 2011. – 396 с.

5. Костенко М. П. Электрические машины. Ч.2 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л. : Энергия, 1973.
6. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963.
7. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
8. Петренко А. Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания / А. Н. Петренко // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21–23.
9. Логинова Е. Ю. Обоснование выбора тягового электропривода локомотива по критериям условной эффективности / Е. Ю. Логинова, Д. А. Солдатенко // Сб. трудов МИИТа: Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – № 10. – С. 15–19.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014.
Після доробки 21.12.2014.

Морозов Д. И.¹, Шевченко И. С.²

¹ Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем, Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

² Канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных электромеханических систем, Донбасский государственный технический университета, г. Алчевск, Украина

ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ОБРАЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

В статье рассмотрен вариант реализации вентильного двигателя как машины постоянного тока с вентильным коммутатором – аналогом коллектора, вынесенным пределы машины. При этом якорь имеет конструкцию подобную фазному ротору асинхронной машины. Предложенный вариант двигателя постоянного тока фактически является синхронной машиной обратной конструкции с частотным регулированием по якору и описывается уравнениями, аналогичными уравнениям описания традиционной явнополюсной синхронной машины. Показано, что вентильный двигатель на основе вентильного двигателя имеет лучшие динамические свойства по сравнению с классическим двигателем постоянного тока.

Ключевые слова: электропривод, синхронная машина, вентильный двигатель.

Morozov D. I.¹, Shevchenko I. S.²

¹ Ph.D., associate professor, assistant professor of automated electromechanical systems, Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

² Ph.D., professor, professor of automated electromechanical systems, Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

VALVE DIRECT CURRENT MOTOR ON THE BASIS OF THE SYNCHRONOUS MACHINE OF INVERSE DESIGN

A mechanical collector of conventional DC machine is the element that limits the current and the armature speed and increases inertia. DC machine rectification realized on the basis of conventional DC machine is described; it externally rectifies the switch which is the analogue of the collector. The armature has a design similar to a phase-wound rotor of induction machine. It is shown that the switching frequency is determined by the armature rotation speed. Static mechanical characteristic of the rectifying DC machine is similar to that of the independent excitation of DC motor. The proposed variant of the DC motor is actually a synchronous machine of inverse design with armature regulation frequency. The motor is described as traditional salient pole synchronous machine. Starting dynamics simulation shows that the rectifying DC machine has better dynamic properties compared to the conventional DC motor due to overload capability and reduces the inertia of the armature.

Keywords: electric drive, synchronous machine, rectifying machine.

REFERENCES

1. Hoover D. B. Rotating-exciter design keeps pace with generator, *Progress Power*, 1960, April, pp. 445–447.
2. Lushyk V. D. Nejavropoljusni mashyny postijnogo strumu : monografija. Lugans'k, Knowledge Publ., 2013, 120 p.
3. Arakelyan A. K., Afanas'ev A. A., Chilikin M. G. Ventil'nyi elektroprivod s sinkhronnym dvigatelem i zavisimym invertorom. Moscow, Energiya Publ., 1977, 224 p.
4. Shevchenko I. S., Morozov D. I., Andrejeva N. I. Elektromehanichni i energetychni procesy v synhronnomu elektroprivodi: Navch. Posib. Alchevsk, DonDSU Publ., 2011, 396 p.
5. Kostenko M. P., Piotrovskii L. M. Elektricheskie mashiny. Ch.2. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 648 p.
6. Andreev V. P., Sabinin Yu. A. Osnovy elektroprivoda. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963, 772 p.
7. Tokarev B. F. Elektricheskie mashiny: Ucheb. posobie dlya vuzov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 624 p.
8. Petrenko A. N. Eksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravlyaemogo asinkhronnogo dvigatelya pri razlichnykh istochnikakh pitaniya *Elektrotekhnika i elektromekhanika*, 2010, vol. 5, pp. 21–23.
9. Loginova E. Yu., Soldatenko D.A. Obosnovanie vybora tyagovogo elektroprivoda lokomotiva po kriteriyam uslovnoi effektivnosti, *Sbornik trudov MIITa: Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2004, vol. 10, pp. 15–19.