УДК 62–83

Д. І. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц., Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ;
І. С. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ;
Н. І. АНДРЕЄВА, канд. техн. наук, доц., Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ.

ВПЛИВ ВТРАТИ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ОРІЄНТАЦІЮ ПОТОКІВ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА НА БАЗІ СИНХРОННОЇ МАШИНИ НА ЙОГО РОБОТУ

Актуальність роботи. Орієнтація магнітних потоків у електричній машині формує її електромагнітний момент та визначає режим роботи у якій вона попадає – це буде двигун постійного чи змінного струму. Тому дуже важливо знати результати втрати такої орієнтації при побудові вентильних двигунів.

Матеріали та результати досліджень. В [1 – 3] подана конструкція та теорія роботи вентильного двигуна (ВД) постійного струму на базі синхронної машини (СМ) оберненої конструкції. Основою одержання двигуна постійного струму (ДПС) з СМ є формування кутової орієнтації векторів магнітних потоків через змінення частоти струму, що подається в якірні обмотки СМ. Слід наголосити, що принциповою відмінністю машин постійного струму є нерухомість магнітних потоків індуктора і якоря у просторі. Це досягається тим, що обмотка збудження розташована на нерухомих полюсах, а якірна обмотка живиться від джерела постійного струму через механічний перетворювач частоти у вигляді колектора, вихідна частота струму якого «жорстко» «прив'язана» до швидкості обертання ротора. Така ідеологія побудови двигуна забезпечує обертання магнітного потоку якірної обмотки зі швидкістю ротора у напрямку протилежному руху останнього. Таким чином у статичних режимах роботи забезпечується нерухомість у просторі і магнітного потоку якірної обмотки. Механічний колектор, що розміщений на валу ротора у машини постійного струму традиційної конструкції, у ВД замінюється електронним – перетворювачем частоти (ПЧ), частота струму якого «задається» швидкістю обертання якірної обмотки, тобто ротора. Найбільш повним аналогом механічного колектора ДПС є перетворювач частоти (ПЧ) в режимі джерела струму який формує фазовий кут φ_1 між основними гармоніками струму та ЕРС холостого ходу в якірній обмотці – це так званий електронний колектор першого типу.

Стабілізація кутового положення векторів ЕРС і струму якоря реалізується завдяки регулюванню вихідної частоти ПЧ при зміненні швидкості ротора ВД у випадку збурень. Як тільки збільшується навантаження на вал останній починає зменшувати швидкість. При цьому порушується орієнтація магнітних потоків у просторі і змінюється кут φ_1. ПЧ зменшує частоту струму в якірній обмотці відновлюючи необхідну орієнтацію потоків. А у ВД з'являється статизм у каналі збурення.

У цьому випадку електромагнітний момент, що формується взаємодією потоків індуктора та якірної обмотки, розраховується за простою формулою

$$M_e = C\,\Phi_I\, I_a\,, \tag{1}$$

де I_a – еквівалентний струм якірної обмотки СМ;

Φ_I – магнітний потік одного полюса;

C – конструктивна стала машини,

а механічні характеристики ВД нагадують такі у ДПС.

При втраті контролю за вказаним кутом ВД виходить з режиму ДПС і переходить у синхронний для СМ з коливаннями ротора. При періодичному порушенні синхронного ходу, як відомо, змінюється величина магнітного потоку, що генерується якірною обмоткою, яка знаходиться на роторі. У зв'язку з цим виникають перехідні струми, що протидіють зміненню потокозчеплення обмотки якоря, тобто підтримують його величину. Для одержання виразу електромагнітного моменту для цього режиму розглянемо діаграму напруг для усталеного (рис. 1, *а*) та перехідного (рис. 1, *б*) режиму роботи двигуна.

Із діаграми рисунка 1, *а* видно що

$$\begin{aligned} I_d\, x_d &= E_0 - U_{\text{п}}\cos\theta\,; \\ I_d\, x_q &= E_q - U_{\text{п}}\sin\theta\,, \end{aligned} \tag{2}$$

де $U_{\text{п}}$, E_0 , E_d , E_q – величини відповідно напруги мережі (ПЧ) та ЕРС якірної обмотки, наведеної потоком індуктора при обертанні ротора, а також складові сумарної ЕРС по повздовжній і поперечній осях СМ;

I_d , I_q – складові якірного струму по повздовжній та поперечній осях;

x_d , x_q – синхронні реактивні опори СМ поздовжній та поперечній осях відповідно;

θ – величина кута між осями потоків індуктора та якоря.

Використовуючи (2) одержимо

$$I_d = \frac{E_0 - U_{\text{п}}\cos\theta}{x_d}\,, \tag{3}$$

$$E_q = E_0\frac{x_q}{x_d} + U_{\text{п}}\frac{x_d - x_q}{x_d}\cos\theta\,. \tag{4}$$

© Д.І. Морозов, І.С. Шевченко, Н.І. Андреєва, 2017

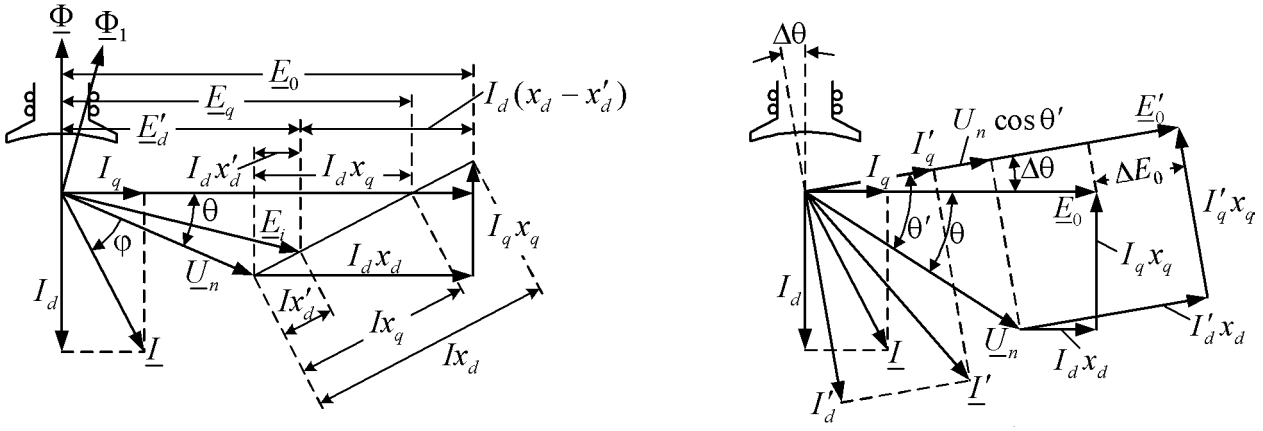

Рис. 1 Векторні діаграми ВД при втраті потрібної орієнтації магнітних потоків:
а – в усталеному режимі, *б* – в перехідному режимі коливань ротора

Величина електромагнітного моменту

$$M_\theta = \frac{P_e}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0}\left[\frac{U_\text{п} E_0}{x_d}\sin\theta + \frac{U_\text{п}^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta\right], \tag{5}$$

де $\omega_0 = 2\pi f_1 / p_d$ – синхронна швидкість СМ на даній частоті f_1 ПЧ.

З (5) не видно у явному виді як коливання ротора впливають через перехідні струми в обмотці збудження на коливання моменту. Якщо прийняти активні опори ВД рівними нулю, то повинна залишатися незмінною величина ЕРС якірної обмотки $E'_d = const$ завдяки незмінній складовій магнітного потоку Φ_0, що зчеплена з обмоткою збудження (див. рис. 1, *а*)

$$E'_d = U_\text{п}\cos\theta + I_d x_d . \tag{6}$$

Тому

$$E_q = E'_d\frac{x_q}{x'_d} + U_\text{п}\frac{x'_d - x_q}{x'_d}\cos\theta . \tag{7}$$

Тоді

$$M'_\theta = \frac{1}{\omega_0}\left[\frac{U_\text{п} E'_d}{x'_d}\cos\theta + \frac{U_\text{п}^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d}\right)\cos 2\theta\right]. \tag{8}$$

Розділимо M'_θ на дві складові – ту що сформована основним усталеним струмом обмотки збудження i_{f0}, і ту, що залежить від перехідних струмів Δi_f. Скористаємося діаграмою напруг рисунка 1, *б* при швидкому повороті ротора на кут $\Delta\theta' = \theta' - \theta$. При такому повороті ротора збільшується струм якірної (роторної) обмотки від *I* до *I'* та відповідно і струм обмотки збудження, а ЕРС від нього – від E_0 до E'_0

$$E'_0 - E_0 = \Delta E_0 + \Delta I_d (x_d - x'_d) . \tag{9}$$

У цьому випадку

$$\Delta I_d = \frac{E'_0 - U_\text{п}\cos\theta'}{x_d} - I_d = \frac{(E'_0 - E_0) + U_\text{п}(\cos\theta - \cos\theta')}{x_d} . \tag{10}$$

Тоді $E'_0 = E_0 + U_\text{п}\frac{x_d - x'_d}{x'_d}(\cos\theta - \cos\theta')$,

$$M'_\theta = \frac{1}{\omega_0}\left[\frac{U_\text{п} E_0}{x_d}\cos\theta' + \frac{U_\text{п}^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\theta' + U_\text{п}^2\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}\right)\left(\cos\theta\cdot\cos\theta' - \frac{1}{2}\cos 2\theta'\right)\right] = M_{\theta y} + \Delta M_\theta . \tag{11}$$

Якщо прийняти $\theta' \approx \theta$, то додатковий синхронізуючий момент, що визваний перехідними струмами, буде таким

$$\Delta M_\theta = \frac{1}{\omega_0} U_\text{п}^2\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}\right)\sin^2\theta . \tag{12}$$

Реальна обмотка збудження має активний опір r_f . Тому перехідний струм в ній від коливання ротора буде формуватись реактивною складовою напруги ПЧ – $U_\text{п}\sin\theta\cdot\sin\varphi'$, оскільки активна складова – $U_\text{п}\sin\theta\cdot\cos\varphi'$ буде направлена на покриття додаткових теплових втрат $\Delta P = (\Delta i_f)^2 rf$. Величина кута φ' визначаються таким чином

$$\sin\varphi' = \frac{x'_f s}{\sqrt{r_f^2 + (x'_f s)^2}} = \frac{x'_f \cdot s / r_f}{\sqrt{1 + (x'_f s / r_f)^2}} , \tag{13}$$

де x'_f – еквівалентний перехідний опір обмотки збудження,

$$x_f^{'} = x_f + \frac{x_a x_{ad}}{x_a + x_{ad}}, \tag{14}$$

x_a , x_{ad} – синхронні реактивні опори обмоток ВД від потоків розсіяння та робочого;
$s = f_к / f_1$ – ковзання при коливаннях ротора,
$f_к$ – частота коливань ротора;
f_1 – частота струму ПЧ.

Таким чином, при врахуванні активного опору обмотки збудження величина додаткового синхронізуючого моменту від коливання ротора може бути розрахована за виразом

$$\Delta M_\theta = \frac{1}{\omega_0} U_п^2 \left(\frac{1}{x_d^{'}} - \frac{1}{x_d} \right) \sin^2\theta \cdot \sin^2\varphi^{'} = \frac{1}{\omega_0} U_п^2 \left(\frac{1}{x_d^{'}} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{T_{d^2}^{'} s^2}{1 + T_{d^2}^{'} s^2} \sin^2\theta . \tag{15}$$

де $T_d^{'} = x_f^{'} / r_f$ – перехідна стала часу обмотки збудження (якщо час вимірювати у радіанах).

Необхідно зауважити, що при коливаннях ротора через трансформаторний зв'язок між обмотками якоря (ротора) та індуктора (збудження) в останній виникає змінний струм, активна складова якого генерує з полем якоря (ротора) гальмівний (демпферний) момент як у звичайній асинхронній машині. Використовуючи традиційний підхід можемо записати момент асинхронної машини (синхронної в режимі коливань)

$$M = I_f^2 \frac{r_2}{s\omega_0} = \frac{U_2^2}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_k^2} \left(\frac{r_2}{s\omega_0} \right) = \frac{U_2^2 r_2 / \omega_0}{r_2^2 + x_k^2 s^2} . \tag{16}$$

Тут

$$U_2 = U_п \sin\theta \cdot \frac{x_f^{'}}{x_1^{'}} ; \tag{17}$$

$$r_2 = r_f ; \quad x_k = x_f^{'} ; \tag{18}$$

$$\frac{1}{x_1^{'}} = \frac{1}{x_d^{'}} - \frac{1}{x_d} ; \tag{19}$$

$$x_f^{'} = \frac{x_f x_{ad} + x_a x_f + x_a x_{ad}}{x_a + x_{ad}} . \tag{20}$$

Враховуючи (18) – (20), маємо:

$$\frac{x_f^{'}}{x_1^{'}} = \left(\frac{x_{ad}}{x_a + x_{ad}} \right)^2 = \frac{1}{\sigma_1^2} \ ; \ \sigma_1^2 = 1 + \frac{x_a}{x_{ad}} . \tag{21}$$

Демпферний момент для синхронної машини можна виразити через (16) і подати так [4]

$$M = I_f^2 \frac{r_f}{s\omega_0} = M_д \frac{d\theta}{dt} = M_д s = U_п^2 \left(\frac{1}{x_d^{'}} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{x_f^{'} r_f s}{r_f^2 + (x_f^{'} s)^2} \sin^2\theta . \tag{22}$$

Звідки демпферний момент [4]

$$M_д = U_п^2 \left(\frac{1}{x_d^{'}} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{x_f^{'} r_f}{r_f^2 + (x_f^{'} s)^2} \sin^2\theta = \left(\frac{U_п}{\sigma_1} \right)^2 \frac{r_f}{r_f^2 + (x_f^{'} s)^2} \sin^2\theta . \tag{23}$$

Таким чином, при коливаннях ротора ВД в ньому буде генеруватись момент, що є сумою синхронізуючого за (12) та демпферного за (23).

Автоматично постає питання стійкості ВД в такому режимі – як статичної, так і динамічної. Як відомо [4] вона визначається перевантажувальних здатністю за моментом. Саме момент є інтегруючим фактором що дозволяє при зміненні збурень на машину (збурення, параметри навантаження та інші) і поверненні їх на попередній рівень вернути ВД у початковий стан тобто, не дає йому «випасти» з синхронізму. Статична перевантажувальна здатність ($\lambda_m = M_\theta / M_н$) ВД у режимі, що розглядаються, при нехтуванні величиною активного опору якірної обмотки визначається максимальним значенням електромагнітного моменту за (5). Оскільки ВД має явнополюсну конструкцію магнітної системи, то максимальне значення електромагнітного моменту $M_{\theta m}$ наступає при кутах навантаження $\theta < \pi/2$, які залежать від збудження.

Як було сказано вище, у випадку динамічних режимів ВД в обмотці збудження виникають перехідні струми, що перешкоджають зміненням магнітного потоку як якоря, так індуктора. Тому ці струми генерують додатковий електромагнітний момент за (12), збільшуючи перевантажувальну здатність ВД у динамічних режимах.

Причому якщо динаміка пов'язана з механікою (накид–зняття навантаження на валу машини), то процеси у демпферний системі швидко закінчуються (порівняно з механічними), а вирішальними будуть тільки перехідні струми в контурі збудження. Коли ж збурення виникає по каналу живлення (ПЧ), то перехідні струми в обмотці збудження суттєво залежать і від перехідних процесів у демпферній системі. Додатковий момент, що генерується при перехідних процесах в обмотці збудження при коливаннях ротора ВД, можна розрахувати за (24) і, як видно, сильно залежить від різниці у x_d та x'_d, а також величин початкового навантаження (θ) і збурення ($\Delta\theta = \theta' - \theta$) [4]

$$\Delta M_\tau = \frac{U_\text{п}^2}{\omega_0}\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d}\right)\left(\cos\theta - \cos\theta'\right)\sin\theta' . \qquad (24)$$

Для оцінки впливу цього моменту на стійкість ВД у динамічних режимах наводимо рис. 2 [4], на якому зображені криві перевантажувальної здатності СМ що взята за основу при побудові ВД ($x_d^* = 1$; $x_d'^* = 0{,}4$; $x_q^* = 0{,}6$; $U_\text{п}^* = 1$; $E_0^* = 1{,}4$). Як видно з рисунка вплив електромагнітних процесів в обмотках ВД при коливаннях ротора суттєвий, що дозволяє збільшити динамічну стійкість ВД.

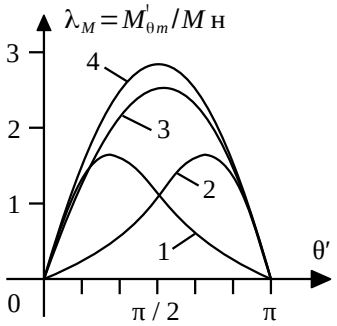

Рис. 2 Криві моментів двигуна у динамічних режимах:

1 – $M_{\theta y}(\theta')$;

2 – $M'_\theta(\theta')$ при $\theta = \pi/2$;

3 – $M'_\theta(\theta')$ при $\theta = \pi/4$;

4 – $M'_\theta(\theta')$ при $\theta = 0$

$M_{\theta y}$ – момент в усталених режимах

Висновок. При втраті контролю за орієнтацією магнітних потоків у вентильному двигуні постійного струму останній переходить в режим синхронного з коливаннями ротора при збуреннях. При роботі вентильного двигуна постійного струму в асинхронному режимі виникає додатковий момент, який збільшує момент машини і завдяки йому підвищується стійкість машини.

Список літератури: 1. *Шевченко І. С.* Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка синхронного електропривода: навч. посіб. / *І. С. Шевченко, Д. І. Морозов.* – К. : Кафедра, 2014. – 276 с. **2.** *Шевченко І. С.* Електромеханічні і енергетичні процеси в синхронному електроприводі: навч. посіб. / *І. С. Шевченко, Д. І. Морозов, Н. І. Андреєва.* – Алчевськ : ДонДТУ, 2011. – 396 с. **3.** *Морозов Д. І.* Вентильний двигун постійного струму на базі синхронної машини оберненої конструкції / *Д. І. Морозов, І. С. Шевченко* // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2. – С. 6-12. **4.** *Костенко М. П.* Электрические машины. Ч. 2 / *М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский.* – Л. : Энергия, 1973. – 648 с. **5.** *Кононенко Е. В.* Электрические машины (спец. курс). Уч. пособие для вузов. / *Е. В. Кононеко, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков.* – М. : Высш. школа, 1975. – 279 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shevchenko I. S., Morozov D. I. *Spetsial'ni pytannya teoriyi elektropryvoda. Dynamika synkhronnoho elektropryvoda* [Special issues of electric driwe theory. Dynamics of synchronous electric driwe]. Kiev, Kafedra Publ., 2014. 276 p. **2.** Shevchenko I. S., Morozov D. I., Andreyeva N. I. *Elektromekhanichni i enerhetychni protsesy v synkhronnomu elektropryvodi* [Electromechanical and energy processes in synchronous electric driwe]. Alchevs'k, Donbass State Technical University Publ., 2011. 396 p. **3.** Morozov D. I., Shevchenko I. S. Ventyl'nyy dvyhun postiynoho strumu na bazi synkhronnoyi mashyny obernenoyi konstruktsiyi [Valve direct current machine on base of the synchronous machine inverse designs] *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka.* 2014, no. 2, pp. 6-12. **4.** Kostenko M. P., Piotrovskii L. M. *Elektricheskie mashiny. Ch. 2* [Electric machines. Part 2]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 648 p. **5.** Kononenko E. V., Sipajlov G. A., Hor'kov K. A. *Jelektricheskie mashiny (spec. kurs). Uch. posobie dlja vuzov* [Electric machines]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1975. 279 p.

Надійшла 4.06.2017