

УДК 621.313

М.А. Яцун , А.М. Яцун, Р.О. Селепина*

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних машин і апаратів,*Луцький державний технічний університет,
кафедра теоретичної та загальної електротехніки

ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД СТРУМУ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ У ВЕНТИЛЬНОМУ РЕАКТИВНОМУ ДВИГУНІ

© Яцун М.А., Яцун А. М., Селепина Р.О., 2003

Визначений гармонічний склад електричного струму й електромагнітного моменту у вентильному реактивному двигуні.

Is determined harmonic composition of electrical current and electromagnetic torque in switched reluctance motor.

Постановка проблеми

Багато приводних механізмів (для аналогового і цифрового запису та відтворення, реєстратори) вимагають стабільності обертання приводних електричних двигунів. Пульсації електромагнітного моменту призводять до нерівномірності обертання вентильних двигунів і є негативним фактором у стрічкопротягувальних механізмах. Тому актуальною є оцінка пульсацій струму й електромагнітного моменту вентильних реактивних двигунів (ВРД), які все частіше застосовуються в регульованих електроприводах.

Аналіз останніх досліджень

Відомо [1], що співвідношення між кількістю зубців статора (Z_c) і ротора (Z_p) для класичної конструкції вентильних реактивних двигунів:

$$Z_p = Z_c (m \pm 1)/m; \quad Z_c = mq; \quad q = 2, 4, 6, \dots, \quad (1)$$

а для конструкції з U – подібним статором: $Z_p = Z_c (2m \pm 1)/(2m); \quad Z_c = mq; \quad q = 4, 6, 8, \dots$, де q – кількість зубців статора на одну фазу; знак “-” застосовується для конструкцій з внутрішнім ротором, а знак “+” – для зовнішнього ротора.

Для класичної конструкції: кут повертання ротора між комутаціями, тобто кут комутації у геометричних градусах

$$\alpha_1 = 2\pi/Z_p - 2\pi/Z_c = 2\pi/[mq(m \pm 1)]; \quad (2)$$

кількість перемикачів (комутацій) за один оберт ротора

$$n_1 = 2\pi/\alpha_1 = mq(m \pm 1); \quad (3)$$

кут у геометричних градусах, який відповідає півперіоду зміни струму живлення ВРД (куту π у електричних градусах),

$$\alpha_0 = 2\pi/(2Z_p) = \pi/Z_p = \pi/[q(m - 1)]; \quad (4)$$

кут комутації в електричних градусах

$$\gamma = \pi \alpha_1 / \alpha_0 = 2\pi / m. \quad (5)$$

При усталеному режимі роботи $\alpha_1 < \alpha_0$, що зводиться до умови $2 < m$. Це означає, що кількість фаз повинна бути більшою від двох.

Для U-подібної конструкції із $q=4$:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{Z_p/2} - \frac{2\pi}{Z_c/2} = \mp \frac{4\pi}{mq(2m \pm 1)};$$

$$n_1 = 2\pi/\alpha_1 = mq(2m-1)/2; \quad \alpha_0 = \pi/Z_p = 2\pi/[q(2m-1)]; \quad \gamma = \pi\alpha_1/\alpha_0 = 2\pi/m.$$

У літературі [2] наведені результати досліджень пульсацій електромагнітного моменту ВРД з буферами енергії, проведених за допомогою комп'ютерного симулювання.

Задачі досліджень

Метою досліджень є отримання аналітичних виразів для аналізу гармонічного складу струму і електромагнітного моменту у вентильному реактивному двигуні у перспективному напрямку зменшення їх пульсацій.

Приймаємо: 1) моменти вимикання попередньої і вмикання наступної фаз (секцій) у вентильному реактивному двигуні збігаються і цей момент (момент комутації) є початком відліку часу t і просторового кута α ; 2) у момент комутації електромагнітний момент і струми у комутуючих фазах приймають середні значення відповідних величин. Тоді момент і струм у фазі, яка вмикається, дорівнюють нулю, а від фази, яка вимикається, відмінні від нуля; 3) у момент вмикання фази (початок комутації) $\theta_{\text{п}} = \beta$ а в момент її вимикання $\theta_{\text{к}} = \beta + \gamma$, де β і γ – відповідно кут запалювання і комутації, які задаються давачем положення ротора; 4) індуктивність фази статора з урахуванням насичення основного магнітного кола наближено визначається виразом

$$L = L_0 - L_1 \cos \theta, \quad (6)$$

де $\theta = \beta + Z_p \alpha = \beta + Z_p \Omega t = \beta + \pi n Z_p t / 30 = \beta + \omega t / m$ – кут в електричних градусах між осями паза ротора і зубця статора; $\alpha = \Omega t$ – кут у геометричних градусах; Z_p – кількість зубців ротора; Ω і n – відповідно кутова швидкість і частота обертання ротора; ω – колова частота струму; m – кількість фаз; $L_0 = (L_d + L_q)/2$; $L_1 = (L_d - L_q)/2$; L_d – індуктивність фази статора у момент збігу осей відповідних зубців статора і ротора; L_q – індуктивність фази статора у момент збігу осей відповідного зубця статора і паза ротора; 5) під час роботи одної фази при усталеному режимі двигун обертається зі сталою частотою, що є можливим, бо механічна стала часу набагато більша від електромагнітної сталої часу.

Тоді частота перемикаць (основна частота змінної складової струму джерела живлення): $f = n n_1 / 60$, а відповідна колова частота $\omega = 2\pi f = n_1 \Omega$.

Виклад основного матеріалу

За другим законом Кірхгофа для робочої фази $U + e = iR$, а за рівнянням механічного стану при усталеному режимі роботи $M + M_2 = 0$, де U – стала напруга живлення; e – електрорушійна сила (ЕРС), наведена в робочій фазі при зміні в часі потокозчеплення Ψ ; i –

струм у робочій фазі; R – активний опір цієї фази; M і M_2 – відповідно електромагнітний і гальмівний (навантажувальний) моменти, які діють на ротор двигуна.

Врахуємо, що

$$e = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} [(L_0 - L_1 \cos \theta) i] = -[L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \frac{\partial i}{\partial t} - i L_1 (\omega/m) \sin(\beta + \omega t/m);$$

$$M = \left[\frac{\partial W_M}{\partial \alpha} \right]_{i=\text{const}} = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \alpha} = \frac{i^2}{2} L_1 \sin \Omega \frac{\partial \Omega}{\partial \alpha} = \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \sin \Omega = \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m), \quad (6)$$

де W_M – енергія магнітного поля фази.

Тоді вихідні рівняння електромагнітного і механічного станів набувають вигляду:

$$U = iR + \frac{\partial}{\partial t} \{ [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] i \} =$$

$$= iR + [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\omega}{m} L_1 \sin(\beta + \omega t/m) i$$

$$M = (i^2/2) Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m). \quad (7)$$

$$M = (i^2/2) Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m). \quad (8)$$

Представимо струм у ВРД (робочій секції) рядом Фур'є:

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (I_{k1m} \sin k\omega t + I_{k2m} \cos k\omega t);$$

Тоді рівняння (7), подане рядом Фур'є, набуває вигляду

$$U = I_0 [R + X_1/(2\pi)] + \sum_{k=1}^{\infty} [(RI_{k1m} + B_{km}) \sin k\omega t + (RI_{k2m} + C_{km}) \cos k\omega t], \quad (9)$$

де $X_1 = \omega L_1 [\cos \beta - \cos(\beta + \gamma)]$;

$$B_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{\partial}{\partial t} \left\{ [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \left[I_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (I_{i1m} \sin i\omega t + I_{i2m} \cos i\omega t) \right] \right\} \sin k\omega t dt =$$

$$= -\frac{2k\omega}{T} \int_0^T [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \left[I_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (I_{i1m} \sin i\omega t + I_{i2m} \cos i\omega t) \right] \cos k\omega t dt; \quad (10)$$

$$C_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{\partial}{\partial t} \left\{ [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \left[I_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (I_{i1m} \sin i\omega t + I_{i2m} \cos i\omega t) \right] \right\} \cos k\omega t dt =$$

$$= \frac{2k\omega}{T} \int_0^T [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] \left[I_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (I_{i1m} \sin i\omega t + I_{i2m} \cos i\omega t) \right] \sin k\omega t dt. \quad (11)$$

Після інтегрування у виразах (10) і (11) і прирівнювання коефіцієнтів при однакових гармоніках у виразі (9) одержимо систему із $2k+1$ рівнянь для визначення сталої складової і амплітуд I_{k1m} і I_{k2m} усіх (k) гармонік струму:

$$U = I_0 [R + X_1/(2\pi)]. \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
& RI_{k1m} - kX_0 I_{k2m} + \frac{mkX_2 I_0}{\pi(m^2 k^2 - 1)} + \frac{m^2 k X_1}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} I_{i1m} \left[\frac{i+k}{m^2(i+k)^2 - 1} + \frac{i-k}{m^2(i-k)^2 - 1} \right] + \\
& + \frac{mkX_2}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} I_{i2m} \left[\frac{1}{m^2(i+k)^2 - 1} + \frac{1}{m^2(i-k)^2 - 1} \right] = 0; \\
& RI_{k2m} + kX_0 I_{k1m} - \frac{m^2 k^2 X_1 I_0}{\pi(m^2 k^2 - 1)} + \frac{mkX_2}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} I_{i1m} \left[\frac{1}{m^2(i+k)^2 - 1} - \frac{1}{m^2(i-k)^2 - 1} \right] - \\
& - \frac{m^2 k X_1}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} I_{i2m} \left[\frac{i+k}{m^2(i+k)^2 - 1} - \frac{i-k}{m^2(i-k)^2 - 1} \right] = 0,
\end{aligned}$$

де $X_0 = \omega L_0$; $X_2 = \omega L_1 [\sin \beta - \sin(\beta + \gamma)]$. Звичайно $X_2 < X_1$.

Зобразимо електромагнітний момент у ВРД рядом Фур'є

$$M = M_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (M_{k1m} \sin k\omega t + M_{k2m} \cos k\omega t). \quad (13)$$

Стала складова M_0 (середнє значення) і амплітуди гармонік M_{k1m} і M_{k2m} електромагнітного моменту ВРД визначаються виразами

$$\begin{aligned}
M_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m) = \\
&= \frac{Z_p L_1}{2T} \int_0^T \left[I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} (I_{k1m}^2 \sin^2 k\omega t + I_{k2m}^2 \cos^2 k\omega t) + 2I_0 \sum_{k=1}^{\infty} (I_{k1m} \sin k\omega t + I_{k2m} \cos k\omega t) + \right. \\
&\quad \left. + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (I_{k1m} \sin k\omega t + I_{k2m} \cos k\omega t) \sum_{i=k+1}^{\infty} (I_{i1m} \sin i\omega t + I_{i2m} \cos i\omega t) \right] \sin(\beta + \omega t/m) dt \times \\
&\quad \times \sin(\beta + \omega t/m) dt; \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{k1m} &= \frac{2}{T} \int_0^T M \sin(k\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m) \sin(k\omega t) dt = \\
&= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \{ \sin[\pi/2 + \beta + (1 - km)\omega t/m] - \sin[\pi/2 + \beta + (1 + km)\omega t/m] \} dt;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{k2m} &= \frac{2}{T} \int_0^T M \cos(k\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m) \cos(k\omega t) dt = \\
&= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i^2}{2} Z_p L_1 \{ \sin[\beta + (1 - km)\omega t/m] + \sin[\beta + (1 + km)\omega t/m] \} dt.
\end{aligned}$$

Після інтегрування в (14) і групування остаточно одержимо

$$\begin{aligned}
 M_0 = I_0^2 X_1 / (4\pi\Omega) + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{X_1 [2k^2 m^2 I_{k1m}^2 + (2k^2 m^2 - 1) I_{k2m}^2]}{4\pi\Omega (4k^2 m^2 - 1)} + \frac{I_0 (km X_2 I_{k1m} - X_1 I_{k2m})}{2\pi\Omega (k^2 m^2 - 1)} \right\} - \\
 - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{ik X_1 I_{k1m} I_{i1m}}{\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - 1] [m^2 (i-k)^2 - 1]} + \frac{X_1 I_{k2m} I_{i2m}}{2\pi\Omega [m^2 (i-k)^2 - 1]} + \right. \\
 \left. + \frac{m X_2 (k I_{k1m} I_{i2m} - i I_{k2m} I_{i1m})}{2\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - 1]} \right\}; \\
 M_{k1m} = km I_0^2 X_1 / [\pi\Omega (1 - k^2 m^2)] + \\
 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{X_2 [2k^2 m^2 I_{k1m}^2 + (2k^2 m^2 - (1 - km)^2) I_{k2m}^2]}{4\pi\Omega (1 - km) (4k^2 m^2 - (1 - km)^2)} - \right. \\
 \left. - \frac{X_2 [2k^2 m^2 I_{k1m}^2 + (2k^2 m^2 - (1 + km)^2) I_{k2m}^2]}{4\pi\Omega (1 + km) (4k^2 m^2 - (1 + km)^2)} + \right. \\
 \left. + \frac{I_0 (km X_1 I_{k1m} + (1 - km) X_2 I_{k2m})}{2\pi\Omega (k^2 m^2 - (1 - km)^2)} + \frac{I_0 (km X_1 I_{k1m} + (1 + km) X_2 I_{k2m})}{2\pi\Omega (k^2 m^2 - (1 + km)^2)} \right\} + \\
 + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{ik (1 - km)^3 X_2 I_{k1m} I_{i1m}}{\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - (1 - km)^2] [m^2 (i-k)^2 - (1 - km)^2]} + \right. \\
 \left. + \frac{ik (1 + km)^3 X_2 I_{k1m} I_{i1m}}{\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - (1 + km)^2] [m^2 (i-k)^2 - (1 + km)^2]} \right\} + \\
 + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{(1 - km) X_2 I_{k2m} I_{i2m}}{2\pi\Omega [m^2 (i-k)^2 - (1 - km)^2]} + \frac{(1 + km) X_2 I_{k2m} I_{i2m}}{2\pi\Omega [m^2 (i-k)^2 - (1 + km)^2]} \right\} - \\
 - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{m X_1 (k I_{k1m} I_{i2m} - i I_{k2m} I_{i1m})}{2\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - (1 - km)^2]} + \frac{m X_1 (k I_{k1m} I_{i2m} - i I_{k2m} I_{i1m})}{2\pi\Omega [m^2 (i+k)^2 - (1 + km)^2]} \right\}; \\
 M_{k2m} = I_0^2 X_1 / [\pi\Omega (1 - k^2 m^2)] +
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{X_1 \left[2k^2 m^2 I_{k1m}^2 + (2k^2 m^2 - (1-km)^2) I_{k2m}^2 \right]}{4\pi\Omega(1-km)(4k^2 m^2 - (1-km)^2)} + \right. \\
& \left. + \frac{X_1 \left[2k^2 m^2 I_{k1m}^2 + (2k^2 m^2 - (1+km)^2) I_{k2m}^2 \right]}{4\pi\Omega(1+km)(4k^2 m^2 - (1+km)^2)} + \right. \\
& \left. + \frac{I_0 (kmX_2 I_{k1m} - (1-km)X_1 I_{k2m})}{2\pi\Omega(k^2 m^2 - (1-km)^2)} + \frac{I_0 (kmX_2 I_{k1m} - (1+km)X_1 I_{k2m})}{2\pi\Omega(k^2 m^2 - (1+km)^2)} \right\} - \\
& - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{ik(1-km)^3 X_1 I_{k1m} I_{i1m}}{\pi\Omega \left[m^2 (i+k)^2 - (1-km)^2 \right] \left[m^2 (i-k)^2 - (1-km)^2 \right]} + \right. \\
& \left. + \frac{ik(1+km)^3 X_1 I_{k1m} I_{i1m}}{\pi\Omega \left[m^2 (i+k)^2 - (1+km)^2 \right] \left[m^2 (i-k)^2 - (1+km)^2 \right]} \right\} - \\
& - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{(1-km)X_1 I_{k2m} I_{i2m}}{2\pi\Omega \left[m^2 (i-k)^2 - (1-km)^2 \right]} + \frac{(1+km)X_1 I_{k2m} I_{i2m}}{2\pi\Omega \left[m^2 (i-k)^2 - (1+km)^2 \right]} \right\} - \\
& - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \frac{mX_2 (kI_{k1m} I_{i2m} - iI_{k2m} I_{i1m})}{2\pi\Omega \left[m^2 (i+k)^2 - (1-km)^2 \right]} + \frac{mX_2 (kI_{k1m} I_{i2m} - iI_{k2m} I_{i1m})}{2\pi\Omega \left[m^2 (i+k)^2 - (1+km)^2 \right]} \right\}.
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}$$

Обмежимося сталою складовою струмою, тобто прийнемо, що $i = I_0$. Тоді із (7) одержимо:

$$U = I_0 R + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\partial}{\partial t} \{ [L_0 - L_1 \cos(\beta + \omega t/m)] I_0 \} dt$$

і остаточно

$$U = I_0 \{ R + \omega L_1 [\cos \beta - \cos(\beta + \gamma)] / (2\pi) \} \text{ або } U = I_0 [R + \omega L_1 \sin(\beta + \gamma/2) \sin(\gamma/2) / \pi] \quad (22)$$

Із (8) одержимо

$$M_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_0^2}{2} Z_p L_1 \sin(\beta + \omega t/m) dt$$

і після інтегрування

$$M_0 = I_0^2 \omega L_1 [\cos \beta - \cos(\beta + \gamma)] / (4\pi\Omega)$$

або

$$M_0 = I_0^2 \omega L_1 \sin(\beta + \gamma/2) \sin(\gamma/2) / (2\pi\Omega). \quad (23)$$

Із (23) з урахуванням (22) одержимо вираз для середнього значення електромагнітного моменту ВРД

$$M_0 = \frac{\pi\omega L_1 U^2 \sin(\beta + \gamma/2)\sin(\gamma/2)}{2\Omega[\pi R + \omega L_1 \sin(\beta + \gamma/2)\sin(\gamma/2)]^2}. \quad (24)$$

Відповідно електромагнітна потужність ВРД

$$P_{\text{ем}} = M_0 \Omega = \frac{\pi\omega L_1 U^2 \sin(\beta + \gamma/2)\sin(\gamma/2)}{2[\pi R + \omega L_1 \sin(\beta + \gamma/2)\sin(\gamma/2)]^2}. \quad (25)$$

Якщо обмежитися сталою складовою і першою гармонікою струму, то із рівнянь (12) одержимо

$$\begin{aligned} I_0 [R + X_1/(2\pi)] &= U; \\ I_{11m} [\pi(4m^2 - 1)R + m^2 X_1] + I_{12m} [m(1 - 2m^2)X_2 - \pi(4m^2 - 1)X_0] &= -\frac{m(4m^2 - 1)X_2}{m^2 - 1} I_0; \\ I_{11m} [\pi(4m^2 - 1)X_0 + 2m^3 X_2] + I_{12m} [\pi(4m^2 - 1)R - m^2 X_1] &= \frac{m^2(4m^2 - 1)X_1}{m^2 - 1} I_0; \end{aligned} \quad (26)$$

з розв'язками

$$I_0 = \frac{U}{[R + X_1/(2\pi)]}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned} I_{11m} &= I_0 \frac{m(4m^2 - 1)}{m^2 - 1} \times \\ &\times \frac{mX_1 [m(2m^2 - 1)X_2 + \pi(4m^2 - 1)X_0] + X_2 [m^2 X_1 - \pi(4m^2 - 1)R]}{\pi^2(4m^2 - 1)^2 R^2 - m^4 X_1^2 + [\pi(4m^2 - 1)X_0 + 2m^3 X_2] [m(2m^2 - 1)X_2 + \pi(4m^2 - 1)X_0]}; \\ I_{12m} &= I_0 \frac{m(4m^2 - 1)}{m^2 - 1} \times \\ &\times \frac{mX_1 [\pi(4m^2 - 1)R + m^2 X_1] + X_2 [\pi(4m^2 - 1)X_0 + 2m^3 X_2]}{\pi^2(4m^2 - 1)^2 R^2 - m^4 X_1^2 + [\pi(4m^2 - 1)X_0 + 2m^3 X_2] [m(2m^2 - 1)X_2 + \pi(4m^2 - 1)X_0]}. \end{aligned}$$

Числові розрахунки у програмному середовищі MathCAD показують, що складова середнього значення електромагнітного моменту ВРД від першої і другої гармонічних складових струму, розрахована за (15) на основі (12), не перевищує 10 % від електромагнітного моменту за наявності тільки сталої складової струму. Вираз (25) доцільно використати для порівняльного аналізу електромеханічної частини ВРД з іншими електричними машинами.

Висновки

Науковою новизною проведених досліджень є аналітичні вирази для визначення гармонічного складу струму й електромагнітного моменту вентильних реактивних двигунів. Ці вирази порівняно прості для сталої складової і першої гармоніки, а загальні вирази (15)

для складових електромагнітного моменту є громіздкими, але при виконанні розрахунків на комп'ютері це не призводить до особливих труднощів. Отримані результати мають теоретичне і практичне значення для оцінки техніко-економічних показників при використанні і проектуванні таких двигунів із заданими характеристиками. Надалі доцільно провести різнобічні розрахунки за отриманими аналітичними виразами шляхом комп'ютерного симулювання і виявити певні закономірності з метою зменшення пульсацій струму й електромагнітного моменту вентильних реактивних двигунів.

1. Осідач Ю., Ткачук В. *Основи проектування вентильних реактивних двигунів // Електромеханіка. Теорія і практика: Пр. наук.-техн. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження видатного українського вченого – електромеханіка Тихона Губенка. – Львів – Славськ, 1966. – С. 143–145.* 2. Ткачук В.І., Каша Л.В., Гайдук В.Г. *Дослідження пульсацій електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна з буферами енергії // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 449. – С. 164–169.*