

УДК 621.313

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СИЛА ДІЇ НА ВАЛ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ВІД ДЕФЕКТІВ У ДЕКІЛЬКОХ СТРИЖНЯХ КОРОТКОЗАМКНЕНОЇ КЛІТКИ РОТОРА

М. Яцун, А. Яцун, В. Ігнатюк, М. Євсюк

*Національний університет Львівська політехніка
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

Обчислено миттєве значення електромагнітної сили, що діє на вал асинхронного двигуна від дефектів у декількох стрижнях короткозамкненої клітки ротора.

Ключові слова: асинхронний двигун, клітка ротора, дефекти у стрижнях, електромагнітна сила на валу.

У процесі виробництва й експлуатації асинхронних двигунів у короткозамкненої клітці ротора можуть виникати дефекти (недоливи, тріщини, обриви тощо). Вони призводять до збільшення електричного опору елементів клітки ротора з дефектами, погіршення техніко-економічних характеристик і підвищення вібрації та шумів під час роботи двигунів. Тому актуальним є дослідження впливу розмірів і взаємного розташування дефектів у короткозамкненої клітці ротора на електромагнітну силу, що діє на вал асинхронного двигуна і призводить до його вібрації.

У відомій літературі [1–4] проаналізовано додаткові струми, додатковий електромагнітний момент і електромагнітну силу дії на вал асинхронного двигуна від дефекту тільки в одному стрижні клітки ротора. Однак загалом дефекти можуть бути в декількох стрижнях і мати довільне розміщення. Розподіл додаткових струмів за наявності дефектів у декількох стрижнях клітки ротора досліджений у [5]. Тоді внаслідок дефектів несиметрія клітки зумовлена збільшенням комплексних опорів Z_c декількох стрижнів (першого, i -го, m -го) на значення, відповідно, Z_{d1} , Z_{di} і Z_{dm} , і комплексні опори дефектних стрижнів дорівнюють $Z_c + Z_{d1}$, $Z_c + Z_{di}$, $Z_c + Z_{dm}$. Звичайно зростають переважно лише активні опори цих стрижнів, тобто $Z_{d1} = R_{d1}$, $Z_{di} = R_{di}$ і $Z_{dm} = R_{dm}$. Відповідно зменшаться комплексні струми в дефектних стрижнях порівняно зі струмами I_{c1c} , I_{cic} і I_{cmc} у цих стрижнях без дефектів, а також зміняться струми в усіх інших елементах короткозамкненої клітки ротора.

Метою дослідження є отримання аналітичної залежності електромагнітної сили дії на вал короткозамкненого асинхронного двигуна від дефектів у декількох стрижнях клітки ротора та їхнього взаємного розташування за різних навантажень (ковзань) двигуна, параметрів обмотки статора і клітки ротора і різної кількості

пар полюсів. Припускаємо, що напруга живлення і струм неробочого ходу у разі незначного порушення симетрії короткозамкненої клітки ротора є незмінними. Стан магнітної системи враховуватимемо коефіцієнтом насичення K_n . Аналіз будемо проводити за основними (першими) гармоніками магнітної індукції, електрорушійних сил і струмів.

У випадку колового обертового магнітного поля, створеного трифазною симетричною системою струмів у трифазній симетричній обмотці статора, для комплексних струмів у стрижнях (i, m) клітки ротора без дефектів одержимо [5]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{cic} &= \dot{I}_{c1c} \exp[-j2\pi p(i-1)/n] = \dot{I}_{c1c} a_i; \\ \dot{I}_{cmc} &= \dot{I}_{c1c} \exp[-j2\pi p(m-1)/n] = \dot{I}_{c1c} a_m, \end{aligned} \quad (1)$$

де p – кількість пар полюсів обертового магнітного поля; n – кількість стрижнів у клітці ротора. Тут напрям обертання ротора і порядок нумерації стрижнів вибрані у позитивному напрямі кутової координати α (проти ходу годинникової стрілки).

Вхідні комплексні струми ланцюгових схем між дефектними стрижнями визначені виразами [5]:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{c1c} D_1/D; \quad \dot{I}_i = \dot{I}_{c1c} D_i/D; \quad \dot{I}_m = \dot{I}_{c1c} D_m/D, \quad (2)$$

де

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{1i} & a_{1m} \\ a_{i1} & a_{ii} & a_{im} \\ a_{m1} & a_{mi} & a_{mm} \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} h_1 & a_{1i} & a_{1m} \\ h_i & a_{ii} & a_{im} \\ h_m & a_{mi} & a_{mm} \end{vmatrix}; \quad D_i = \begin{vmatrix} a_{11} & h_1 & a_{1m} \\ a_{i1} & h_i & a_{im} \\ a_{m1} & h_m & a_{mm} \end{vmatrix};$$

$$D_m = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{1i} & h_1 \\ a_{i1} & a_{ii} & h_i \\ a_{m1} & a_{mi} & h_m \end{vmatrix};$$

$$a_{11} = d_{11} + c_{11}b_{11}; \quad a_{ii} = d_{ii} + c_{ii}b_{ii}; \quad a_{mm} = d_{mm} + c_{mm}b_{mm};$$

$$a_{1i} = c_{11}b_{1i} + d_{1i} - b_{ii}; \quad a_{im} = c_{ii}b_{im} + d_{im} - b_{mm}; \quad a_{m1} = c_{mm}b_{m1} + d_{m1} - b_{11};$$

$$a_{1m} = -b_{im}; \quad a_{i1} = -b_{m1}; \quad a_{mi} = -b_{1i};$$

$$h_1 = a_m g_{im} - a_i c_{11} g_{1i} - a_i \underline{Z}_{di}; \quad h_i = g_{m1} - a_m c_{ii} g_{im} - a_m \underline{Z}_{dm};$$

$$h_m = a_i g_{1i} - c_{mm} g_{m1} - \underline{Z}_{d1};$$

$$b_{11} = \frac{\underline{Z}_0 \{ (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) ch[(i-2)\gamma_1] + \underline{Z}_0 sh[(i-2)\gamma_1] \}}{\underline{Z}_0 ch[(i-2)\gamma_1] + (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) sh[(i-2)\gamma_1]};$$

$$b_{ii} = \frac{\underline{Z}_0 \{(\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{ch}[(m-i-1)\gamma_1] + \underline{Z}_0 \operatorname{sh}[(m-i-1)\gamma_1]\}}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(m-i-1)\gamma_1] + (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(m-i-1)\gamma_1]};$$

$$b_{mm} = \frac{\underline{Z}_0 \{(\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{ch}[(n-m)\gamma_1] + \underline{Z}_0 \operatorname{sh}[(n-m)\gamma_1]\}}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(n-m)\gamma_1] + (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(n-m)\gamma_1]};$$

$$b_{li} = -\frac{\underline{Z}_0 (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c)}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(i-2)\gamma_1] + (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(i-2)\gamma_1]};$$

$$b_{im} = -\frac{\underline{Z}_0 (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c)}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(m-i-1)\gamma_1] + (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(m-i-1)\gamma_1]};$$

$$b_{m1} = -\frac{\underline{Z}_0 (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c)}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(n-m)\gamma_1] + (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(n-m)\gamma_1]};$$

$$g_{li} = \frac{\underline{Z}_0 \underline{Z}_{di}}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(i-2)\gamma_1] + (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(i-2)\gamma_1]};$$

$$g_{im} = \frac{\underline{Z}_0 \underline{Z}_{dm}}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(m-i-1)\gamma_1] + (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(m-i-1)\gamma_1]};$$

$$g_{m1} = \frac{\underline{Z}_0 \underline{Z}_{d1}}{\underline{Z}_0 \operatorname{ch}[(n-m)\gamma_1] + (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(n-m)\gamma_1]};$$

$$d_{11} = (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c) \operatorname{ch}[(i-2)\gamma_1]; \quad c_{11} = -(\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c) \operatorname{sh}[(i-2)\gamma_1] / \underline{Z}_0;$$

$$d_{li} = -(\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k);$$

$$d_{ii} = (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c) \operatorname{ch}[(m-i-1)\gamma_1]; \quad c_{ii} = -(\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c) \operatorname{sh}[(m-i-1)\gamma_1] / \underline{Z}_0;$$

$$d_{im} = -(\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k);$$

$$d_{mm} = (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c) \operatorname{ch}[(n-m)\gamma_1]; \quad c_{mm} = -(\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c) \operatorname{sh}[(n-m)\gamma_1] / \underline{Z}_0;$$

$$d_{m1} = -(\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k);$$

$\underline{Z}_0 = \sqrt{\underline{Z}_k(\underline{Z}_k + 2\underline{Z}_c)}$; $th\gamma_1 = \sqrt{\underline{Z}_k(\underline{Z}_k + 2\underline{Z}_c)}/(\underline{Z}_k + \underline{Z}_c)$; \underline{Z}_k – комплексний опір елемента короткозамкненого кільця між двома сусідніми стрижнями.

Відповідно, струми у бездефектних стрижнях (k) визначають як різниці сусідніх вхідного і вихідного струмів: $\dot{I}_{ck} = \dot{I}_{k-1} - \dot{I}_k = \underline{D}_k \dot{I}_{c1c} = \dot{I}_{c1c} D_k \exp(j\varphi_{Dk})$.

Після підстановки для цих струмів одержимо:

при $1 < k < i$

$$\dot{I}_{ck1} = 2sh(\gamma_1/2) \left\{ (\dot{U}_1/\underline{Z}_0) ch[(k-3/2)\gamma_1] - \dot{I}_1 sh[(k-3/2)\gamma_1] \right\}; \quad (3)$$

при $i < k < m$

$$\dot{I}_{cki} = 2sh(\gamma_1/2) \left\{ (\dot{U}_i/\underline{Z}_0) ch[(k-i-1/2)\gamma_1] - \dot{I}_i sh[(k-i-1/2)\gamma_1] \right\}; \quad (4)$$

при $m < k \leq n$

$$\dot{I}_{ckm} = 2sh(\gamma_1/2) \left\{ (\dot{U}_m/\underline{Z}_0) ch[(k-m-1/2)\gamma_1] - \dot{I}_m sh[(k-m-1/2)\gamma_1] \right\}, \quad (5)$$

де

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{I}_1 \left\{ (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) ch[(i-2)\gamma_1] + \underline{Z}_0 sh[(i-2)\gamma_1] \right\} - \dot{I}_i (\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c) + a_i \underline{Z}_{di}}{ch[(i-2)\gamma_1] + [(\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k)/\underline{Z}_0] sh[(i-2)\gamma_1]},$$

$$\dot{U}_i = \frac{\dot{I}_i \left\{ (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) ch[(m-i-1)\gamma_1] + \underline{Z}_0 sh[(m-i-1)\gamma_1] \right\}}{ch[(m-i-1)\gamma_1] + [(\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k)/\underline{Z}_0] sh[(m-i-1)\gamma_1]} - \frac{\dot{I}_m (\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c) + a_m \underline{Z}_{dm}}{ch[(m-i-1)\gamma_1] + [(\underline{Z}_{dm} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k)/\underline{Z}_0] sh[(m-i-1)\gamma_1]},$$

$$\dot{U}_m = \frac{\dot{I}_m \left\{ (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) ch[(n-m)\gamma_1] + \underline{Z}_0 sh[(n-m)\gamma_1] \right\}}{ch[(n-m)\gamma_1] + [(\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k)/\underline{Z}_0] sh[(n-m)\gamma_1]} - \frac{\dot{I}_1 (\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c) + \underline{Z}_{d1}}{ch[(n-m)\gamma_1] + [(\underline{Z}_{d1} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k)/\underline{Z}_0] sh[(n-m)\gamma_1]}.$$

Струми у дефектних стрижнях визначимо за виразами:

$$\dot{I}_{c1} = \dot{I}_{c1c} D_1 \exp(j\varphi_{D1}) = \dot{I}_m ch[(n-m)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_m}{\underline{Z}_0} sh[(n-m)\gamma_1] - \dot{I}_1; \quad (6)$$

$$\dot{I}_{ci} = \dot{I}_{c1c} D_i \exp(j\varphi_{Di}) = \dot{I}_1 ch[(i-2)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_0} sh[(i-2)\gamma_1] - \dot{I}_i; \quad (7)$$

$$\dot{I}_{cm} = \dot{I}_{c1c} D_m \exp(j\varphi_{Dm}) = \dot{I}_i ch[(m-i-1)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_i}{\underline{Z}_0} sh[(m-i-1)\gamma_1] - \dot{I}_m. \quad (8)$$

У місцях розташування стрижнів обмотки ротора ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) магнітна індукція основного магнітного поля [3]

$$B_{0k} = \frac{\mu_0}{K_H K_\delta \delta} \frac{0,45}{p} m I_0 w_1 K_{o\delta 1} \sin \left[s \omega t + \frac{\pi}{\tau} x_0 - 2\pi p(k-1)/n \right], \quad (9)$$

де μ_0 – магнітна стала; K_δ і δ – коефіцієнт і величина повітряного проміжку; $i_0 = I_0 \sqrt{2} \sin \omega t$ – струм неробочого ходу у фазі A обмотки статора; m і w_1 – кількість фаз і витків у фазі статора; $K_{o\delta 1}$ і τ – відповідно, обмотковий коефіцієнт і полюсний крок; s – ковзання ротора; $\omega = 2\pi f$ – колова частота; f – частота змінного струму; t – координата часу; x_0 – початкова координата першого стрижня відносно осі фази A .

Тепер визначимо у декартовій системі координат з початком на осі першого стрижня проекції (складові) миттєвого значення поперечної сили, що діє на вал (вісь обертання) ротора і зумовлена дефектами у першому, i -му і m -му стрижнях. Дотична і радіальна відцентрова складові цієї сили визначені, відповідно, виразами

$$\begin{aligned} F_{\delta o} &= \sum_{k=1}^n B_{0k} l i_{ck} \cos [2\pi(k-1)/n] = l \sum_{k=1}^n \frac{\mu_0}{K_H K_\delta \delta} \frac{0,45}{p} \times \\ &\times m I_0 w_1 K_{o\delta 1} \sin \left[s \omega t + \frac{\pi}{\tau} x_0 - 2\pi p(k-1)/n \right] \sqrt{2} D_k I_{c1c} \times \\ &\times \sin (s \omega t + \pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk}) \cos [2\pi(k-1)/n] = \\ &= \frac{fsD}{\pi p^3 Z_E} \left(\frac{\mu_0 m I_0 w_1 K_{o\delta 1} l}{K_H K_\delta \delta} \right)^2 \sum_{k=1}^n D_k \cos [2\pi(k-1)/n] \times \\ &\times \{ \cos [\varphi_{Dk} - \varphi_E + 2\pi p(k-1)/n] - \\ &- \cos [2s \omega t + 2\pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk} - 2\pi p(k-1)/n] \}; \\ F_{\delta p} &= - \sum_{k=1}^n B_{0k} l i_{ck} \sin [2\pi(k-1)/n] = -l \sum_{k=1}^n \frac{\mu_0}{K_H K_\delta \delta} \frac{0,45}{p} \times \\ &\times m I_0 w_1 K_{o\delta 1} \sin \left[s \omega t + \frac{\pi}{\tau} x_0 - 2\pi p(k-1)/n \right] \sqrt{2} D_k I_{c1c} \times \\ &\times \sin (s \omega t + \pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk}) \sin [2\pi(k-1)/n] = \\ &= - \frac{fsD}{\pi p^3 Z_E} \left(\frac{\mu_0 m I_0 w_1 K_{o\delta 1} l}{K_H K_\delta \delta} \right)^2 \sum_{k=1}^n D_k \sin [2\pi(k-1)/n] \times \\ &\times \{ \cos [\varphi_{Dk} - \varphi_E + 2\pi p(k-1)/n] - \\ &- \cos [2s \omega t + 2\pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk} - 2\pi p(k-1)/n] \}, \end{aligned} \quad (10)$$

де i_{ck} – миттєве значення струму в k -му стрижні; l і D – розрахункова довжина і діаметр розташування стрижнів (осердя) ротора;

$\underline{Z}_E = \underline{Z}_c + \underline{Z}_k / \sqrt{2 \sin^2(\pi p / n)} = Z_E \exp(j\varphi_E)$ – еквівалентний комплексний опір фази короткозамкненої клітки ротора [1];

$$\dot{I}_{c1c} = \dot{E}_{01} / \underline{Z}_E = E_{01} \exp[j(\pi x_0 / \tau - \varphi_E)] / Z_E = I_{c1c} \exp[j(\pi x_0 / \tau - \varphi_E)];$$

$$\dot{E}_{01} = E_{01} \exp[j(\pi x_0 / \tau)]; E_{01} = 2\mu_0 m f s \tau I_0 w_1 K_{o\sigma 1} / (\pi r K_n K_\delta \delta).$$

Тоді величина і фаза досліджуваної

$$F_\varepsilon = \sqrt{F_{\varepsilon\delta}^2 + F_{\varepsilon p}^2}; \varphi_\varepsilon = \arctg(F_{\varepsilon p} / F_{\varepsilon\delta}). \quad (11)$$

Відносні значення величин цієї сили та її складових

$$F_\varepsilon^* = F_\varepsilon / (2 M_c / D) = \sqrt{(F_{\varepsilon\delta}^*)^2 + (F_{\varepsilon p}^*)^2}; \quad (12)$$

$$F_{\varepsilon\delta}^* = F_{\varepsilon\delta} / (2 M_c / D) = \frac{1}{n \cos \varphi_E} \sum_{k=1}^n D_k \cos[2\pi(k-1)/n] \times \\ \times \{ \cos[\varphi_{Dk} - \varphi_E + 2\pi p(k-1)/n] - \\ - \cos[2s\omega\tau + 2\pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk} - 2\pi p(k-1)/n] \};$$

$$F_{\varepsilon p}^* = F_{\varepsilon p} / (2 M_c / D) = -\frac{1}{n \cos \varphi_E} \sum_{k=1}^n D_k \sin[2\pi(k-1)/n] \times \\ \times \{ \cos[\varphi_{Dk} - \varphi_E + 2\pi p(k-1)/n] - \\ - \cos[2s\omega\tau + 2\pi x_0 / \tau - \varphi_E + \varphi_{Dk} - 2\pi p(k-1)/n] \},$$

де $M_c = \frac{f s n \cos \varphi_E}{2\pi p^3 (K_n K_\delta \delta)^2 Z_E} (\mu_0 m I_0 w_1 K_{o\sigma 1} D l)^2$ – середнє значення електромагнітного моменту двигуна без дефекту [3].

На рис. 1 і 2 показано результати розрахунків у програмному середовищі MathCAD за виразами (11) і (12) залежностей відносного миттєвого значення електромагнітної сили (F_B^*) та її фази (φ_B , град.) від відносного часу $[\tau = s\omega\tau / (2\pi)]$ за період ковзання в разі обриву трьох стрижнів клітки ротора для різної кількості пар полюсів ($p = 1, 2, 3$) і різного розташування дефектних стрижнів (симетрично по колу ротора і підряд) і для випадку, коли $\underline{Z} = \underline{Z}_k / \underline{Z}_c = (1+j2s)/(50+j250s)$, $\varphi_E = \arctg(5s) + \arg\{1 + \underline{Z}/[2\sin^2(\pi p/n)]\}$, $s = 0,02$ і $n = 30$. Вони відображають, що за наявності у клітці ротора обірваних стрижнів на вал (підшипники) діє значна незрівноважена електромагнітна сила, значення і напрям якої змінюються в часі з періодом, удвічі меншим, ніж період ковзання. Ця сила призводить до відповідних вібрацій машини, шумів і додаткового зношування підшипників. Зі збільшенням кількості пар полюсів (p) від одного до трьох у разі симетричного розташування по колу ротора обірваних стрижнів електромагнітна сила дії на вал зменшується і стала з часом за величиною, зокрема при $p = 3$ практично відсутня, а при рядом обірваних стрижнях – зростає.

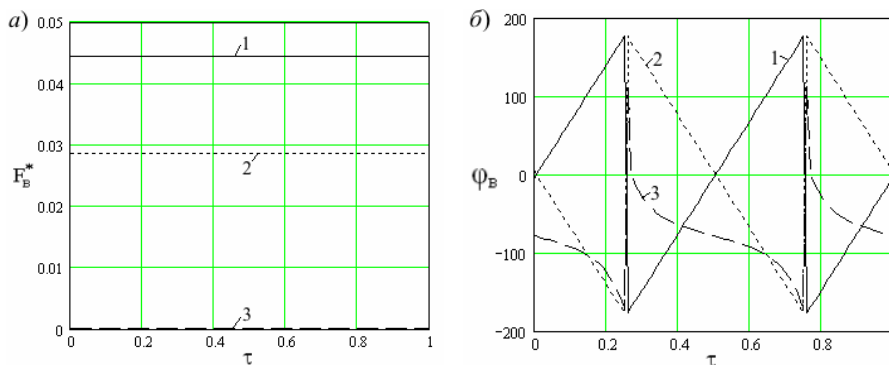


Рис. 1. Часові залежності відносного значення модуля електромагнітної сили (а), що діє на вал ротора, і її просторової координати (б) в разі обриву трьох стрижнів клітки ротора, розташованих симетрично по колу ротора, ковзанні $s = 0,02$ і різній кількості пар полюсів: $p = 1$ (1); 2 (2); 3 (3).

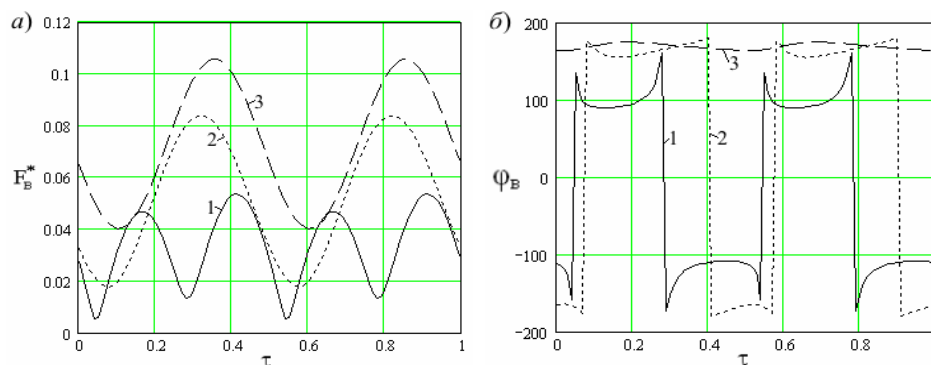


Рис. 2. Часові залежності відносного значення модуля електромагнітної сили (а), що діє на вал ротора, і її просторової координати (б) в разі обриву трьох стрижнів клітки ротора, розташованих поряд, ковзанні $s = 0,02$ і різній кількості пар полюсів: $p = 1$ (1); 2 (2); 3 (3).

Отже, отримані аналітичні вирази дають змогу дослідити вплив розташування і розмірів дефектів, представлених додатковими опорами у декількох (трьох) стрижнях клітки ротора, на електромагнітну силу, що діє на вал асинхронного двигуна, за різних навантажень (ковзань) двигуна, параметрах обмотки статора і клітки ротора та різної кількості пар полюсів. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямі аналізу додаткових втрат у клітці ротора, його температурного режиму роботи, можливих вібрацій машини, а також допустимого навантаження асинхронного двигуна за наявності дефектів у клітці ротора.

1. Яцун М., Яцун А., Хліпальський Ю. Розподіл струму в короткозамкненій обмотці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів у ній // Електромеханіка. Теорія і практика: Праці наук.-техн. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження видатного українського вченого—електромеханіка Тихона Губенка. Львів, 1996. С. 203–206.
2. Яцун М., Яцун А. Розподіл і симетричні складові додаткових струмів у короткозамкненій обмотці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів в одному стрижні // Теор. електротехніка. 2000. Вип. 55. С. 124–128.
3. Яцун Михайло, Яцун Андрій. Додатковий електромагнетний момент асинхронного мотора від дефекту у стрижні короткозамкненої обмотки ротора // 4-th INTERNATIONAL MODELLING SCHOOL of AMSE-UAPL. Crimea, Alushta, Ukraine. 1999.
4. Яцун М.А. від Електромагнітна сила дії на вал асинхронного двигуна дефекту у стрижні короткозамкненої клітки ротора // Вісник НУ „Львівська політехніка”. 2001. № 418. С. 185–189.
5. Яцун М.А., Яцун А.М., Ігнатюк В.М., Євсюк М.М. Додаткові струми у клітці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів у декількох стрижнях // Методи та прилади контролю якості. 2002. № 9. С. 11–14.

**TAKING EFFECT ELECTROMAGNETIC FORCE ON THE SHAFT
OF INDUCTION MOTOR FROM THE DEFECTS IN THE FEW BARS
AT THE SQUIRREL-CAGE OF ROTOR WINDING**

M. Yatsun, A. Yatsun, V. Ignatyuk, M. Jevsyuk

*Lviv Polytechnic National University
Bandera Str., 12, L'viv, 79013, Ukraine*

Instantaneous value of electromagnetic force, which is taking effect on the shaft of induction motor from the defects in the few bars at the squirrel-cage of rotor winding, has been determined.

Key words: induction motor, squirrel-cage of rotor, defects in the bars, electromagnetic force on the shaft.

Стаття надійшла до редколегії 03.01.2004

Прийнята до друку 01.06.2004