

$\pm 3,4\text{К}$. Згідно з [1,2] така похибка вимірювання температури ЗР є цілком прийнятною.

1. Мильвидский М.Г., Картавых А.В., Раков В.В. Выращивание монокристаллов из расплавов в условиях космического полёта // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.*—2001.—№ 9.—С.17-35. 2. Патон Б.Е., Аснис Е.А., Заболотин С.П. и др. Получение совершенных материалов в космосе // *Тези доповіді Другої Української конференції з перспективних космічних досліджень.*—Каївель: НКАУ, 2002.—С.11. 3. Порев В.А. Аналіз параметрів зонної очистки за допомогою приладів з електронним розгортанням зображення // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”.*—2000.—№1.—С.89–95. 4. Порев Г.В. Підвищення точності телевізійних засобів вимірювання температури поверхні зони

плавки // *Методи та прилади контролю якості.*—2002.—№9.—С.39-41. 5. Згуровський Г.М., Порев Г.В. Вимірювання температури зони розплаву в електронно-променевої технології безтигельної зонної плавки // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”.*—2003.—№ 3.—С.93-97. 6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники.—К.: Вища школа, 1983.—455 с. 7. Порев В.А. Компенсация влияния люминатора на результаты контролю температурного поля зони плавки кремнію // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”.*—2002.—№5—С.114-117. 8. Порев В.А. Контроль температурного поля зони плавки // *Дефектоскопия.*—2001.—№5.—С.7. 9. Кириленков И.И. Метрологические основы оптической пирометрии.—М.: Издательство стандартов, 1976.—140 с.

УДК 621.313

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ У ЕЛЕМЕНТАХ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ КІЛЕЦЬ КЛІТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ЗМІНУ ЇЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

© Яцун М. А., 2004

Національний університет „Львівська політехніка”

© Яцун А. М., Селепина Р. О., Ігнатюк В. М., 2004

Луцький державний технічний університет

Визначені комплексні величини додаткових струмів у короткозамкненій клітці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів у декількох елементах короткозамкнених кілець

Під час виробництва й експлуатації асинхронних двигунів у короткозамкненій клітці ротора можуть виникати дефекти (недоливи, тріщини, обриви тощо). Вони призводять до збільшення електричного опору елементів клітки ротора з дефектами та погіршення техніко-економічних характеристик двигунів, які залежать від розмірів і взаємного розташування дефектів у клітці ротора [1-3]. За таких умов розподіл струмів у клітці стає несиметричним внаслідок несиметрії самої клітки ротора.

Розподіл додаткових струмів у клітці ротора за наявності дефектів у декількох її стрижнях досліджений у літературі [4]. Результати відповідних розрахунків модуля і фази відносних значень додаткових струмів у стрижнях клітки ротора при різних значеннях кількості пар полюсів і ковзання двигуна для випадку трьох рядом обірваних стрижнів показують, що в міру віддалення в обидва боки від обірваних стрижнів струми в інших стрижнях швидко зменшуються за величиною і випереджують за фазою. При цьому зі збільшенням кількості пар полю-

сів і ковзання модулі і фази струмів зменшуються. Разом з цим при зміні ковзання інтенсивність зміни модулів струмів падає, а їх фаз – зростає.

Метою дослідження є отримання аналітичної залежності додаткових струмів у короткозамкненій клітці ротора асинхронного двигуна від дефектів у декількох елементах короткозамкнених кілець клітки ротора та їх взаємного розташування при різних навантаженнях (ковзаннях) двигуна, параметрах обмотки статора і клітки ротора і різній кількості пар полюсів. Приймемо припущення, що напруга живлення і струм неробочого ходу при незначному порушенні симетрії короткозамкненої клітки ротора залишаються незмінними. Стан магнітної системи будемо враховувати коефіцієнтом насичення. Аналіз будемо проводити за основними (першими) гармоніками магнітної індукції, електрорушійних сил і струмів.

Приймемо, що внаслідок дефектів несиметрія клітки ротора зумовлена збільшенням комплексних опорів Z_k трьох елементів короткозамкнених кілець

(першого, i -го, m -го) на величину відповідно Z_{k1} , Z_{ki} і Z_{km} і комплексні опори дефектних елементів стають рівними $Z_k + Z_{k1}$, $Z_k + Z_{ki}$, $Z_k + Z_{km}$. Звичайно зростають переважно лише активні опори цих елементів, тобто $Z_{k1} = R_{k1}$, $Z_{ki} = R_{ki}$ і $Z_{km} = R_{km}$. Відповідно зменшаться комплексні струми в дефектних елементах у

порівнянні зі струмами I_{k1c} , I_{kic} і I_{kmc} у цих елементах при відсутності дефектів, а також зміняться струми в усіх інших елементах короткозамкнутої клітки ротора. Електрична схема такої клітки ротора подана на рис. 1.

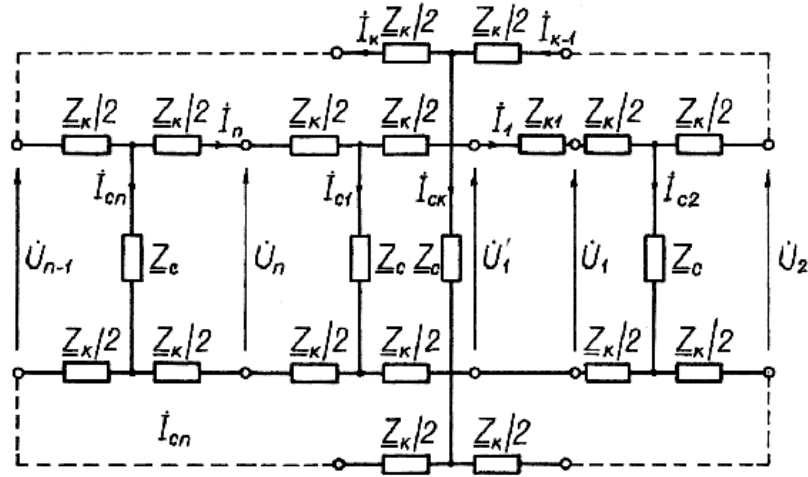


Рис. 1. Електрична схема короткозамкнутої клітки ротора з дефектами у вигляді додаткових опорів Z_{k1} , Z_{ki} і Z_{km}

У випадку колового обертового магнітного поля комплексні струми у відповідних елементах короткозамкнених кілець при відсутності дефектів визначаються виразами:

$$\begin{aligned} I_{1c} &= \frac{I_{c1c} \exp(-j2\pi p/n)}{1 - \exp(-j2\pi p/n)} = b_1 I_{c1c}; \\ I_{ic} &= \frac{I_{c1c} \exp(-j2\pi p i/n)}{1 - \exp(-j2\pi p/n)} = b_i I_{c1c}; \\ I_{mc} &= \frac{I_{c1c} \exp(-j2\pi p m/n)}{1 - \exp(-j2\pi p/n)} = b_m I_{c1c}, \end{aligned} \quad (1)$$

де I_{c1c} – комплексний струм у першому стрижні, p – кількість пар полюсів обертового магнітного поля, n – кількість стрижнів у клітці ротора.

За теоремою компенсації додаткові опори Z_{k1} , Z_{ki} і Z_{km} замінимо додатковими комплексними електрорушійними силами (ЕРС) \dot{E}_{k1} , \dot{E}_{ki} і \dot{E}_{km} , які дорівнюють напругам на цих опорах і напрямлені проти струму в них, тобто

$$\begin{aligned} \dot{E}_{k1} &= (I_{1c} + I_1) Z_{k1}; \\ \dot{E}_{ki} &= (I_{ic} + I_i) Z_{ki}; \\ \dot{E}_{km} &= (I_{mc} + I_m) Z_{km}. \end{aligned} \quad (2)$$

Далі всі величини (додаткові струми) визначаються при дії тільки цих додаткових електрорушійних сил.

За другим законом Кірхгофа для замкнутого

контура з напругами \dot{U}'_1 і \dot{U}_1 і ЕРС \dot{E}_{k1} (рис. 1) одержимо:

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 + \dot{E}_{k1}. \quad (3)$$

Аналогічно для областей i -го і m -го елементів короткозамкнених кілець клітки ротора одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_i &= \dot{U}_i + \dot{E}_{ki}; \\ \dot{U}'_m &= \dot{U}_m + \dot{E}_{km}. \end{aligned} \quad (4)$$

Після підстановки виразів (2) для ЕРС \dot{E}_{k1} , \dot{E}_{ki} і \dot{E}_{km} рівняння (3) і (4) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_1 &= \dot{U}_1 + (I_{1c} + I_1) Z_{k1}; \\ \dot{U}'_i &= \dot{U}_i + (I_{ic} + I_i) Z_{ki}; \\ \dot{U}'_m &= \dot{U}_m + (I_{mc} + I_m) Z_{km}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для ділянок між дефектними елементами справедливі рівняння для однорідних симетричних ланцюгових схем:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_i &= \dot{U}_i \operatorname{ch}[(i-1)\gamma_1] - I_1 Z_0 \operatorname{sh}[(i-1)\gamma_1]; \\ \dot{I}_i &= I_1 \operatorname{ch}[(i-1)\gamma_1] - (\dot{U}_1 / Z_0) \operatorname{sh}[(i-1)\gamma_1]; \\ \dot{U}'_m &= \dot{U}_m \operatorname{ch}[(m-i)\gamma_1] - I_m Z_0 \operatorname{sh}[(m-i)\gamma_1]; \\ \dot{I}_m &= I_m \operatorname{ch}[(m-i)\gamma_1] - (\dot{U}_m / Z_0) \operatorname{sh}[(m-i)\gamma_1]; \\ \dot{U}'_1 &= \dot{U}_m \operatorname{ch}[(n-m+1)\gamma_1] - I_m Z_0 \operatorname{sh}[(n-m+1)\gamma_1]; \\ \dot{I}_1 &= I_m \operatorname{ch}[(n-m+1)\gamma_1] - (\dot{U}_m / Z_0) \operatorname{sh}[(n-m+1)\gamma_1], \end{aligned} \quad (6)$$

де $n > m > i > 1$; $Z_0 = \sqrt{Z_k(Z_k + 2Z_c)}$;
 $\gamma_1 = \text{ath}[\sqrt{Z_k(Z_k + 2Z_c)} / (Z_k + Z_c)]$.

Системи рівнянь (5) і (6) визначають невідомі комплексні напруги і струми на входах і виходах ланцюгових схем між дефектними елементами короткозамкнених кілець. Ці системи рівнянь зводяться до наступних рівнянь для вхідних величин:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i + (\dot{I}_{ic} + \dot{I}_i)Z_{ki} &= \dot{U}_i \text{ch}[(i-1)\gamma_1] - \\ &- \dot{I}_i Z_0 \text{sh}[(i-1)\gamma_1]; \\ \dot{I}_i &= \dot{I}_i \text{ch}[(i-1)\gamma_1] - (\dot{U}_i / Z_0) \text{sh}[(i-1)\gamma_1]; \\ \dot{U}_m + (\dot{I}_{mc} + \dot{I}_m)Z_{km} &= \dot{U}_i \text{ch}[(m-i)\gamma_1] - \\ &- \dot{I}_i Z_0 \text{sh}[(m-i)\gamma_1]; \\ \dot{I}_m &= \dot{I}_i \text{ch}[(m-i)\gamma_1] - (\dot{U}_i / Z_0) \text{sh}[(m-i)\gamma_1]; \\ \dot{U}_1 + (\dot{I}_{1c} + \dot{I}_1)Z_{k1} &= \dot{U}_m \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] - \\ &- \dot{I}_m Z_0 \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1]; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_m \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] - \\ &- (\dot{U}_m / Z_0) \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1]; \end{aligned} \quad (7)$$

Після вилучення із системи рівнянь (7) напруг \dot{U}_1 , \dot{U}_i і \dot{U}_m з урахуванням (1) для невідомих вхідних струмів \dot{I}_1 , \dot{I}_i і \dot{I}_m одержимо рівняння [4]:

$$\begin{aligned} a_{11}\dot{I}_1 + a_{1i}\dot{I}_i + a_{1m}\dot{I}_m &= h_1 \dot{I}_{c1c}; \\ a_{i1}\dot{I}_1 + a_{ii}\dot{I}_i + a_{im}\dot{I}_m &= h_i \dot{I}_{c1c}; \\ a_{m1}\dot{I}_1 + a_{mi}\dot{I}_i + a_{mm}\dot{I}_m &= h_m \dot{I}_{c1c}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $a_{11} = Z_{k1} \text{ch}[(i-1)\gamma_1] + Z_0 \text{sh}[(i-1)\gamma_1]$;

$$a_{1i} = Z_0 \left\{ \begin{aligned} &\text{ch}[(m-i)\gamma_1] - \\ &- \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \times \\ &\times \text{ch}[(i-1)\gamma_1] \end{aligned} \right\} \div \text{sh}[(m-i)\gamma_1] + Z_{ki};$$

$$a_{1m} = Z_0 \{ \text{ch}[(i-1)\gamma_1] \text{ch}[(n-i+1)\gamma_1] - 1 \} \div \text{sh}[(m-i)\gamma_1] + Z_{km} \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \text{ch}[(i-1)\gamma_1];$$

$$h_1 = -b_i Z_{ki} - b_m Z_{km} \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \times \text{ch}[(i-1)\gamma_1] - b_1 Z_{k1} \text{ch}[(i-1)\gamma_1];$$

$$a_{i1} = -\text{ch}[(i-1)\gamma_1] - Z_{k1} \text{sh}[(i-1)\gamma_1] / Z_0;$$

$$a_{ii} = 1 + \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \times \text{sh}[(i-1)\gamma_1] / \text{sh}[(m-i)\gamma_1];$$

$$a_{im} = -\text{sh}[(i-1)\gamma_1] \text{ch}[(n-i+1)\gamma_1] \div \text{sh}[(m-i)\gamma_1] - Z_{km} \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \times \text{sh}[(i-1)\gamma_1] / Z_0;$$

$$h_i = b_m Z_{km} \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] \times \text{sh}[(i-1)\gamma_1] / Z_0 + b_1 Z_{k1} \text{sh}[(i-1)\gamma_1] / Z_0;$$

$$a_{m1} = 1;$$

$$a_{mi} = \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1] / \text{sh}[(m-i)\gamma_1];$$

$$a_{mm} = -\text{sh}[(n-i+1)\gamma_1] / \text{sh}[(m-i)\gamma_1] - Z_{km} \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1] / Z_0;$$

$$h_m = b_m Z_{km} \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1] / Z_0.$$

Тоді із (7) вхідні напруги ланцюгових схем між дефектними елементами визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_0 \{ \dot{I}_1 \text{ch}[(i-1)\gamma_1] - \dot{I}_i \} / \text{sh}[(i-1)\gamma_1]; \\ \dot{U}_i &= Z_0 \{ \dot{I}_i \text{ch}[(m-i)\gamma_1] - \dot{I}_m \} / \text{sh}[(m-i)\gamma_1]; \\ \dot{U}_m &= Z_0 \{ \dot{I}_m \text{ch}[(n-m+1)\gamma_1] - \dot{I}_1 \} \div \\ &\div \text{sh}[(n-m+1)\gamma_1]. \end{aligned} \quad (9)$$

Відповідно струми у стрижнях (k) визначаються як різниці струмів у сусідніх елементах короткозамкненого кільця: $\dot{I}_{ck} = \dot{I}_{k-1} - \dot{I}_k$. На основі рівняння ланцюгової схеми і після підстановки для цих струмів одержимо:

При $1 < k < i$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{k1} &= \dot{I}_1 \text{ch}[(k-1)\gamma_1] - (\dot{U}_1 / Z_0) \text{sh}[(k-1)\gamma_1]; \\ \dot{I}_{ck1} &= 2 \text{sh}(\gamma_1 / 2) \left\{ \begin{aligned} &(\dot{U}_1 / Z_0) \text{ch}[(k-3/2)\gamma_1] - \\ &- \dot{I}_1 \text{sh}[(k-3/2)\gamma_1] \end{aligned} \right\}; \end{aligned} \quad (10)$$

при $i < k < m$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ki} &= \dot{I}_i \text{ch}[(k-i)\gamma_1] - (\dot{U}_i / Z_0) \text{sh}[(k-i)\gamma_1]; \\ \dot{I}_{cki} &= 2 \text{sh}(\gamma_1 / 2) \left\{ \begin{aligned} &(\dot{U}_i / Z_0) \text{ch}[(k-i-1/2)\gamma_1] - \\ &- \dot{I}_i \text{sh}[(k-i-1/2)\gamma_1] \end{aligned} \right\}; \end{aligned} \quad (11)$$

при $m < k \leq n$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{km} &= \dot{I}_m \text{ch}[(k-m)\gamma_1] - (\dot{U}_m / Z_0) \text{sh}[(k-m)\gamma_1]; \\ \dot{I}_{ckm} &= 2 \text{sh}(\gamma_1 / 2) \left\{ \begin{aligned} &(\dot{U}_m / Z_0) \text{ch}[(k-m-1/2)\gamma_1] - \\ &[\dot{I}_m \text{sh}[(k-m-1/2)\gamma_1]] \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Струми у стрижнях біля дефектних елементів визначаються за виразами:

$$\dot{I}_{c1} = \dot{I}_m \text{ch}[(n-m)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_m}{Z_0} \text{sh}[(n-m)\gamma_1] - \dot{I}_1; \quad (13)$$

$$\dot{I}_{ci} = \dot{I}_1 ch[(i-2)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_1}{Z_0} sh[(i-2)\gamma_1] - \dot{I}_i; \quad (14)$$

$$\dot{I}_{cm} = \dot{I}_i ch[(m-i-1)\gamma_1] - \frac{\dot{U}_i}{Z_0} \times sh[(m-i-1)\gamma_1] - \dot{I}_m. \quad (15)$$

У випадку дефекту тільки в одному (першому) елементі короткозамкненого кільця викладки і вирази значно спрощуються. Тоді остаточно одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{I}_{1c} Z_{k1} sh(n\gamma_1)}{2Z_0 [1 - ch(n\gamma_1)] - Z_{k1} sh(n\gamma_1)}; \\ \dot{U}_1 &= \frac{\dot{I}_{1c} Z_{k1} Z_0 [ch(n\gamma_1) - 1]}{2Z_0 [1 - ch(n\gamma_1)] - Z_{k1} sh(n\gamma_1)}; \\ \dot{I}_k &= \frac{2\dot{I}_{1c} Z_{k1} sh(n\gamma_1/2) ch[(n/2 - k + 1)\gamma_1]}{2Z_0 [1 - ch(n\gamma_1)] - Z_{k1} sh(n\gamma_1)}; \quad (16) \\ \dot{I}_{ck} &= \frac{4\dot{I}_{1c} Z_{k1} sh(\gamma_1/2) sh(n\gamma_1/2) sh[(n/2 - k + 3/2)\gamma_1]}{2Z_0 [1 - ch(n\gamma_1)] - Z_{k1} sh(n\gamma_1)}, \end{aligned}$$

а при наявності обриву в першому елементі ($Z_{k1} = \infty$)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{10} &= -\dot{I}_{1c}; \\ \dot{U}_{10} &= \dot{I}_{1c} Z_0 [1 - ch(n\gamma_1)] / sh(n\gamma_1); \quad (17) \\ \dot{I}_{k0} &= -\dot{I}_{1c} ch[(n/2 - k + 1)\gamma_1] / ch(n\gamma_1/2); \\ \dot{I}_{ck0} &= -2\dot{I}_{1c} sh(\gamma_1/2) sh[(n/2 - k + 3/2)\gamma_1] / ch(n\gamma_1/2), \end{aligned}$$

або у відносних одиницях

$$\begin{aligned} \dot{I}_{k0}^* &= I_{k0}^* exp(j\varphi_{k0}) = \\ &= \dot{I}_{k0} / \dot{I}_{c1c} = -\frac{exp(-j2\pi p/n) ch[(n/2 - k + 1)\gamma_1]}{[1 - exp(-j2\pi p/n)] ch(n\gamma_1/2)}; \\ \dot{I}_{ck0}^* &= I_{ck0}^* exp(j\varphi_{ck0}) = \dot{I}_{ck0} / \dot{I}_{c1c} = \\ &= -2 exp(-j2\pi p/n) sh(\gamma_1/2) \times \\ &\times sh[(n/2 - k + 3/2)\gamma_1] \div \\ &\div [1 - exp(-j2\pi p/n)] ch(n\gamma_1/2); \quad (18) \end{aligned}$$

У табл. 1 і 2 наведені результати розрахунків за виразами (10) ÷ (15) модулів I_{ck0}^* і I_{k0}^* та фаз φ_{ck0} і φ_{k0} відносних значень додаткових струмів у стрижнях клітки ротора $I_{ck0}^* = \dot{I}_{ck} / \dot{I}_{c1c} = I_{ck0}^* exp \varphi_{ck0}$ і елементах короткозамкнених кілець $I_{k0}^* = \dot{I}_k / \dot{I}_{c1c} = I_{k0}^* exp \varphi_{k0}$ при кількості стрижнів $n = 30$, пар полюсів $p = 3$ і різних значеннях ковзання двигуна ($s = 0,02; 0,2; 1$) для випадку трьох симетрично обірваних елементів короткозамкнених кілець клітки ротора, коли $Z = Z_k / Z_c = (1 + j2s) / (50 + j250s)$.

Результати наведених розрахунків показують, що в міру віддалення в обидва боки від обірваних елементів короткозамкнених кілець до середини між ними струми в стрижнях клітки ротора швидко зменшуються за величиною і слабо змінюються за фазою в межах кожної половини, а в сусідніх половиних знаходяться у протифазі. При цьому зі збільшенням ковзання модулі струмів зменшуються, а їх фази спочатку зменшуються, а потім зростають (табл. 1).

Таблиця 1 – Відносні значення модуля і фази додаткових струмів у стрижнях клітки ротора у випадку трьох симетрично обірваних елементів короткозамкнених кілець

k	s=0,02		s=0,2		s=1	
	I_{ck0}^*	$\varphi_{ck0}, ^\circ$	I_{ck0}^*	$\varphi_{ck0}, ^\circ$	I_{ck0}^*	$\varphi_{ck0}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7
1, 11, 21	0,21449	-110,55796	0,17663	-126,41651	0,11071	-121,21663
2, 12, 22	0,21449	69,4420	0,17663	53,58349	0,11071	58,78337
3, 13, 23	0,15858	69,6082	0,13248	54,44397	0,08422	59,12258
4, 14, 24	0,10897	69,7372	0,09205	55,10556	0,05916	59,3809
5, 15, 25	0,0637	69,8254	0,05422	55,55469	0,0351	59,55503
6, 16, 26	0,02095	69,870	0,01791	55,78175	0,01163	59,64269
7, 17, 27	0,2095	-110,129	0,01791	-124,21825	0,01163	-120,35371
8, 18, 28	0,0637	-110,1745	0,05422	-124,44531	0,0351	-120,44497
9, 19, 29	0,10897	-110,2627	0,09205	-124,89444	0,05916	-120,6191
10, 20, 30	0,15858	-110,3917	0,13248	-125,55603	0,08422	-120,87742

Модулі струмів у елементах короткозамкнених кілець також зменшуються при віддаленні в обидва боки від обірваних елементів до середини між ними, але значно повільніше ніж у стрижнях, а зміна їх фази ще менша і має протилежний характер ніж у

модулів. Зі збільшенням ковзання модулі цих струмів зростають, а їх фази спочатку зростають, а потім зменшуються, тобто зміна модулів і фаз від ковзання також має протилежний характер ніж у стрижнях (табл. 2).

Таблиця 2 – Відносні значення модуля і фази додаткових струмів у елементах короткозамкнених кілець клітки ротора у випадку трьох симетрично обірваних елементів

k	s=0,02		s=0,2		s=1	
	I_{k0}^*	$\varphi_{k0}, ^\circ$	I_{k0}^*	$\varphi_{k0}, ^\circ$	I_{k0}^*	$\varphi_{k0}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7
1, 11, 21	1,61803	72,00001	1,61803	72,00005	1,61803	72,00002
2, 12, 22	1,40378	72,39073	1,45152	74,2033	1,51047	72,9602
3, 13, 23	1,24541	72,74489	1,32759	76,13653	1,42883	73,76795
4, 14, 24	1,13661	73,03312	1,24211	77,66057	1,37161	74,38199
5, 15, 25	1,07302	73,22343	1,19205	78,64132	1,33771	74,76669
6, 16, 26	1,0521	73,29018	1,17557	78,98034	1,32648	74,8978
7, 17, 27	1,07302	73,22343	1,19205	78,64132	1,33771	74,76669
8, 18, 28	1,13661	73,03312	1,24211	77,66057	1,37161	74,38199
9, 19, 29	1,24541	72,74489	1,32759	76,13653	1,42883	73,76795
10, 20, 30	1,40378	72,39073	1,45152	74,2033	1,51047	72,9602

Таким чином отримані аналітичні вирази дозволяють дослідити вплив розташування і величини (розмірів) дефектів, представлених додатковими опорами у декількох (трьох) елементах короткозамкнених кілець клітки ротора, на розподіл додаткових струмів у всіх елементах клітки ротора при різних навантаженнях (ковзаннях) двигуна, параметрах обмотки статора і клітки ротора і різній кількості пар полюсів. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку аналізу додаткового електромагнітного моменту і втрат у клітці ротора, його температурного режиму роботи, силової дії на вал і можливих вібрацій машини, а також допустимого навантаження асинхронного двигуна за наявності дефектів у елементах короткозамкнених кілець.

1. Яцун М.А., Яцун А.М., Хліпальський Ю.С.. Розподіл струму в короткозамкненій обмотці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів у ній // Електромеханіка. Теорія і практика: Пр. наук.-

техн. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження видатного українського вченого-електромеханіка Тихона Губенка. Львів, 1996. С.203-206. 2. Яцун М.А., Яцун А.М.. Розподіл і симетричні складові додаткових струмів у короткозамкненій обмотці ротора асинхронного двигуна за наявності дефектів в одному стрижні // Теоретична електротехніка. 2000. Вип. 55. С. 124-128. 3. Яцун М.А., Яцун А.М. Додатковий електромагнетний момент асинхронного мотора від дефекту у стрижні короткозамкненої обмотки ротора // 4-th INTERNATIONAL MODELLING SCHOOL of AMSE-UAPL. Crimea, Alushta, Ukraine, September 10-15, 1999. 4. 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.