

### Висновки

Отже, на основі теорії термодинаміки нерівноважних процесів отримані загальні вирази у відносних одиницях основних параметрів електропривода за системою ДС-ДПС, що відповідають низці критеріїв ефективності роботи. Аналогічно можна сформулювати також інші, в тому числі й комбіновані критерії ефективності функціонування такого електропривода. Дані результати є внеском у розробку термодинамічної теорії нерівноважних електромеханічних перетворювачів і завершують термодинамічний аналіз статичних режимів силових схем на базі ДПС.

1. Ильинский Н.Ф. *Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом.* – М., 1981. – 144 с. 2. Милях А.Н., Волков И.В. *Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей.* – К., 1974. – 216 с. 3. Эткин В.А. *Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии.* – Саратов, 1991. – 156 с. 4. Щур І.З. Застосування підходів нерівноважної термодинаміки для аналізу енергетичної ефективності електроприводів постійного струму // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 2002. – № 452. – С. 95–100. 5. Щур І.З. Електропривод з двигуном постійного струму послідовного збудження як термодинамічний перетворювач енергії // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 2002. – № 449. – С. 204–212. 6. Вестерхоф Х., ван Дам К. *Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ.* – М., 1992. – 686 с.

УДК 621.314

М.А. Яцун, А.М. Яцун, В.М. Ігнатюк, М.М. Євсюк  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 кафедра електричних машин і апаратів,  
 Луцький державний технічний університет,  
 кафедра теоретичної та загальної електротехніки

### МОДУЛЯЦІЯ СТРУМІВ В ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТУ В ОДНОМУ СТРИЖНІ КЛІТКИ РОТОРА

© Яцун М.А., Яцун А.М., Ігнатюк В.М., Євсюк М.М., 2003

**Визначені обертові просторові гармоніки магніторушійної сили, додаткові і повні струми в обмотці статора асинхронного двигуна за наявності дефекту у стрижні короткозамкненої клітки ротора.**

**Are defined the rotate space harmonics of the magnetic driving force, additional and full currents in the stator windings of induction motor when the defect is presented in the squirrel-cage rotor winding bar.**

#### Постановка проблеми

У асинхронних короткозамкнених двигунах при пошкодженні стрижнів клітки ротора під час його обертання виникає модуляція струмів, які споживає із мережі обмотка статора. Для оцінки можливості діагностування технічного стану клітки ротора під час експлуатації

потрібно отримати і дослідити аналітичні залежності характеристик модуляції від величини і розміщення дефектів у стрижнях. У відомій літературі [1] така модуляція струмів у обмотці статора від дефектів у стрижнях клітки ротора пояснюється періодичною зміною магнітного опору фаз статора під час обертання ротора, але кількісні співвідношення відсутні.

Аналіз останніх досліджень. Відомо [2–4], що додаткові струми у короткозамкненій клітці ротора асинхронного двигуна при збільшенні опору у першому стрижні на величину  $\underline{Z}_{д1}$  від дефекту у ньому визначаються виразами: у першому стрижні ( $k = 1$ )

$$\dot{I}_{c1} = -\frac{2\dot{I}_{c1c}\underline{Z}_{д1}\text{sh}[(n-1)\gamma_1]}{\underline{Z}_0\{\text{ch}[(n-1)\gamma_1]+1\}+(2\underline{Z}_c+2\underline{Z}_{д1}+\underline{Z}_k)\text{sh}[(n-1)\gamma_1]}; \quad (1)$$

в інших стрижнях ( $k = 2, 3, \dots, m, \dots, n$ )

$$\dot{I}_{ck} = \frac{4\underline{Z}_{д1}\text{sh}(\gamma_1/2)\text{ch}[(n-1)\gamma_1/2]\text{ch}[(n/2-k+1)\gamma_1]}{\underline{Z}_0\{\text{ch}[(n-1)\gamma_1]+1\}+(2\underline{Z}_c+2\underline{Z}_{д1}+\underline{Z}_k)\text{sh}[(n-1)\gamma_1]}\dot{I}_{c1c}, \quad (2)$$

де

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\underline{Z}_k(\underline{Z}_k+2\underline{Z}_c)}; \quad \text{th}\gamma_1 = \sqrt{\underline{Z}_k(\underline{Z}_k+2\underline{Z}_c)}/(\underline{Z}_k+\underline{Z}_c).$$

$\dot{I}_{c1c}$  – комплексний струм у першому стрижні при відсутності дефекту;  $\underline{Z}_c$  і  $\underline{Z}_k$  – комплексний опір відповідно стрижня та елемента короткозамкненого кільця між двома сусідніми стрижнями;  $n$  – кількість стрижнів у клітці ротора.

При обриві першого стрижня

$$\dot{I}_{cko} = \frac{\text{sh}(\gamma_1/2)\text{ch}[(n/2-k+1)\gamma_1]}{\text{sh}[(n-1)\gamma_1/2]}\dot{I}_{c1c}; \quad \dot{I}_{clo} = -\dot{I}_{c1c}. \quad (3)$$

Відносні значення додаткових струмів при обриві першого стрижня

$$\dot{I}_{cko}^* = \dot{I}_{cko}^* \exp(\varphi_{iko}) = \frac{\dot{I}_{cko}}{\dot{I}_{c1c}} = \frac{\text{sh}(\gamma_1/2)\text{ch}[(n/2-k+1)\gamma_1]}{\text{sh}[(n-1)\gamma_1/2]}; \quad \dot{I}_{clo}^* = -1. \quad (4)$$

У табл. 1 наведені результати розрахунків за виразом (4) додаткових струмів у короткозамкненій клітці ротора при обриві одного (першого) стрижня. і різних значеннях ковзання ( $s = 0,02; 0,2; 1,0$ ) для випадку, коли  $\underline{Z} = \underline{Z}_c/\underline{Z}_k = (50+j250s)/(1+j2s)$  і  $n = 30$ . Вони показують, що при віддаленні по колу в обидва боки від обірваного стрижня відносні модулі додаткових струмів ( $\dot{I}_{cko}^*$ ) у здорових стрижнях значно зменшуються й повертаються за фазою ( $\varphi_{iko}$ ) у напрямі випередження. Разом із тим при збільшенні навантаження відносні модулі додаткових струмів дещо зменшуються й переходять за фазою через максимум.

Магнітне поле, зумовлене додатковими струмами у клітці ротора, є нерухомим відносно нього, пульсує з частотою ковзання  $sf$ , де  $f$  – основна частота змінного струму, і незалежно від кількості пар полюсів на статорі має тільки один період. Пульсуюче поле у повітряному проміжку машини від додаткових струмів можна розкласти в ряд Фур'є на просторові гармоніки [6], які пульсують із частотою додаткових струмів і мають кількість пар полюсів, що дорівнює порядковому номеру відповідних гармонік.

Комплексна амплітуда  $i$ -ї просторової гармоніки пульсуючої магніторухійної сили (МРС) від додаткових струмів у короткозамкненій клітці ротора асинхронного двигуна за наявності дефекту в одному (першому) стрижні (див. рисунок) визначається виразом [6]:

$$\begin{aligned} \dot{F}_{\text{dim}} &= F_{\text{dim}} \exp \varphi_i = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{\alpha_1} \dot{I}_{c1} \sin(i\alpha) d\alpha + \int_{\alpha_1}^{2\alpha_1} (\dot{I}_{c1}/2 + \dot{I}_{c2}) \sin(i\alpha) d\alpha + \dots + \right. \\ &\quad \left. + \int_{(m-1)\alpha_1}^{m\alpha_1} \left( \dot{I}_{c1}/2 + \sum_{k=2}^m \dot{I}_{ck} \right) \sin(i\alpha) d\alpha + \dots + \int_{(n-1)\alpha_1}^{n\alpha_1} \left( \dot{I}_{c1}/2 + \sum_{k=2}^n \dot{I}_{ck} \right) \sin(i\alpha) d\alpha \right\} = \\ &= - \frac{C_n \dot{I}_{c1c} \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] \sin^2(i\alpha_1/2)}{\sqrt{2} \operatorname{ish}(\gamma_1/2)} \left\{ 2 + \frac{2 \cos^2(i\alpha_1/2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] + \operatorname{sh}\gamma_1 \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1/2]}{\operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] [\sin^2(i\alpha_1/2) + \operatorname{sh}^2(\gamma_1/2)]} \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

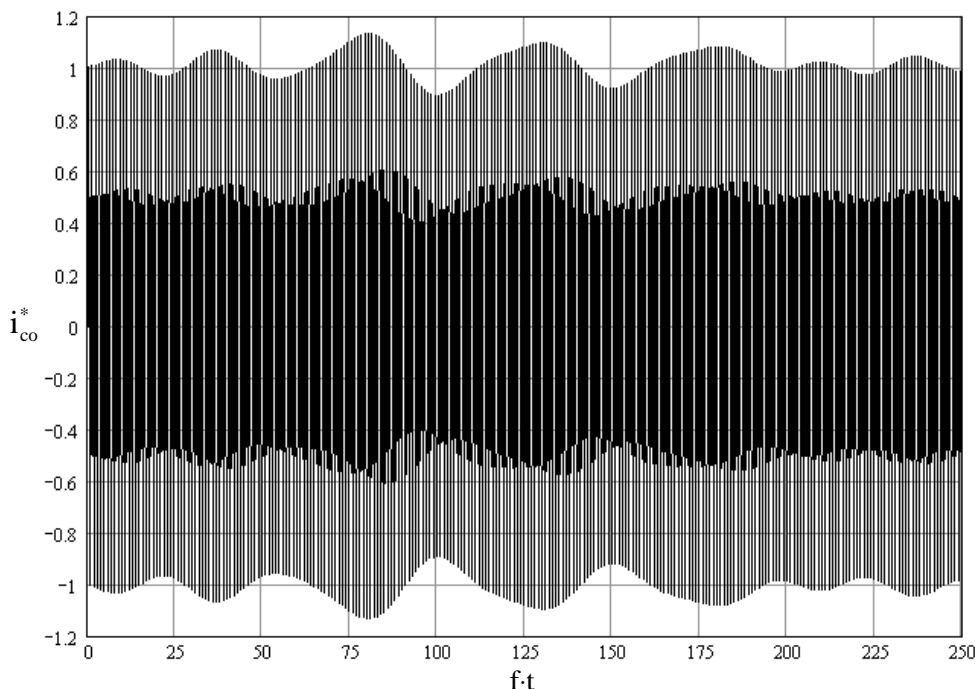
де  $\alpha$  – кут у геометричних градусах, відрахований від осі фази А на статорі, на якій у початковий момент часу розміщений перший стрижень клітки ротора;  $\alpha_1 = 2\pi/n$ ;

$$C_n = \frac{4Z_{\text{д1}} \operatorname{sh}(\gamma_1/2) \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1/2]}{Z_0 \{\operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1] + 1\} + (2Z_c + 2Z_{\text{д1}} + Z_{\text{к}}) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1]}.$$

Таблиця 1

**Відносні модулі й фази додаткових струмів у стрижнях клітки ротора при обриві першого стрижня**

k		s=0,02		s=0,2		s=1,0	
		$I_{\text{cko}}^*$	$\varphi_{\text{iko}}^{\circ}$	$I_{\text{cko}}^*$	$\varphi_{\text{iko}}^{\circ}$	$I_{\text{cko}}^*$	$\varphi_{\text{iko}}^{\circ}$
1		-1	0	-1	0	-1	0
2	30	0,091	-1,474	0,081	-9,856	0,065	-5,82
3	29	0,075	-1,121	0,068	-7,72	0,057	-4,677
4	28	0,061	-0,763	0,058	-5,546	0,051	-3,514
5	27	0,05	-0,399	0,049	-3,327	0,045	-2,332
6	26	0,042	-0,028	0,042	-1,057	0,04	-1,134
7	25	0,034	0,353	0,036	1,267	0,036	0,074
8	24	0,029	0,743	0,03	3,642	0,032	1,279
9	23	0,024	1,142	0,026	6,052	0,029	2,467
10	22	0,02	1,548	0,023	8,463	0,027	3,611
11	21	0,017	1,954	0,02	10,816	0,025	4,682
12	20	0,015	2,345	0,018	13,013	0,023	5,643
13	19	0,013	2,698	0,017	14,952	0,022	6,45
14	18	0,012	2,987	0,016	16,476	0,021	7,064
15	17	0,011	3,177	0,015	17,457	0,02	7,449
16		0,011	3,244	0,015	17,796	0,02	7,58



Модуляція струму у фазі статора при обриві одного стрижня клітки ротора

### Задачі досліджень

Метою дослідження є отримання аналітичних залежностей між додатковим опором у стрижні клітки ротора й амплітудами і початковими фазами додаткових струмів в обмотці статора при різних навантаженнях (ковзаннях) двигуна, параметрах обмотки статора і клітки ротора і різній кількості пар полюсів.

### Виклад основного матеріалу

Кожну ( $i$ -ту) просторову гармоніку додаткової пульсуючої MPC розкладемо на дві однакові за величиною обертові гармоніки MPC (пряму і зворотну), які обертаються відносно ротора з кутовою частотою  $s\omega/i$  у протилежних напрямках,  $\omega=2\pi f$  – колова частота. Тоді комплексні амплітуди обертових гармонік MPC  $\dot{F}_{im}$  вдвічі менші від пульсуючих гармонік MPC, тобто

$$\begin{aligned} \dot{F}_{im} &= \dot{F}_{dim}/2 = F_{im} \exp \varphi_i = \\ &= -\frac{\dot{i}_{clc} Z_{d1} \sin^2(i\alpha_1/2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1]}{\sqrt{2\pi i} \{Z_0 \{ \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1] + 1 \} + (2Z_c + 2Z_{d1} + Z_k) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1] \}} \times \\ &\times \left\{ 2 + \frac{2 \cos^2(i\alpha_1/2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] + \operatorname{sh}\gamma_1 \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1/2]}{\operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] [\sin^2(i\alpha_1/2) + \operatorname{sh}^2(\gamma_1/2)]} \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Відносно статора обертові гармоніки MPC обертаються у напрямі основного магнітного поля з кутовою частотою відповідно  $\omega(1-s)/p + s\omega/i = [1 - (1-p/i)s]\omega/p$  (пряма обертова гармоніка) і  $\omega(1-s)/p - s\omega/i = [1 - (1+p/i)s]\omega/p$  (зворотна обертова гармоніка). При несучій частоті  $\omega$  останні частоти є боковими. Внаслідок накладання додаткових гармонік струму у фазних струмах статора виникає модуляція коливань.

Тоді у миттєвій формі  $i$ -та обертова відносно ротора гармоніка MPC

$$F_{di} = F_{dim} \sin(s\omega t + \varphi_i) \sin(i\alpha) = F_{im} [\cos(s\omega t - i\alpha + \varphi_i) - \cos(s\omega t + i\alpha + \varphi_i)] \quad (7)$$

Сумарна (загальна) додаткова МРС відносно ротора

$$F_d = \sum_{i=1}^{\infty} F_{im} [\cos(s\omega t - i\alpha + \varphi_i) - \cos(s\omega t + i\alpha + \varphi_i)] \quad (8)$$

і відносно статора

$$F_{дп} = \sum_{i=1}^{\infty} F_{im} \{ \cos\{[1 - (1 - p/i)s]\omega t + p\alpha + \varphi_i\} - \cos\{[1 - (1 + p/i)s]\omega t + p\alpha + \varphi_i\} \} \quad (9)$$

МРС  $F_{дп}$  урівноважується МРС  $F_{дс}$  від додаткових струмів в обмотці статора. Тому

$$F_{дс} = -F_{дп} = \sum_{i=1}^{\infty} F_{im} \{ \cos\{[1 - (1 + p/i)s]\omega t + p\alpha + \varphi_i\} - \cos\{[1 - (1 - p/i)s]\omega t + p\alpha + \varphi_i\} \} \quad (10)$$

Відомо також [5], що трифазна симетрична система струмів створює обертову МРС, величина якої на один полюс за першою гармонікою у точці повітряного проміжку з координатою  $\alpha$  у момент часу  $t$

$$F = [\sqrt{2}/(\pi p)] m I w_1 K_{об1} \sin(\omega t + p\alpha), \quad (11)$$

де відлік координати  $\alpha$  (геометричного кута) береться від осі фази А із струмом  $i = I\sqrt{2} \sin \omega t$ ;  $p, m, w_1$  – кількість відповідно пар полюсів, фаз і витків у фазі статора;  $K_{об1}$  – обмотковий коефіцієнт.

Порівнюючи (10) і (11), для додаткових струмів у фазі А обмотки статора одержимо

$$i_d = [\pi p / (m w_1 K_{об1})] \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} F_{im} \{ \cos\{[1 - (1 + p/i)s]\omega t + \varphi_i\} - \cos\{[1 - (1 - p/i)s]\omega t + \varphi_i\} \} \right\}. \quad (12)$$

Комплексна амплітуда основної обертової гармоніки МРС симетричної клітки ротора на один полюс визначається виразом [5]:

$$\dot{F}_{ppm} = \dot{F}_{pm} e^{j(p\alpha - \pi/2)}, \quad \text{де } \dot{F}_{pm} = n \dot{i}_{clc} / (\sqrt{2} \pi p). \quad (13)$$

Вона урівноважується відповідною комплексною амплітудою основної обертової гармоніки МРС симетричної обмотки статора на один полюс

$$\dot{F}_c = -\dot{F}_{ppm} = \dot{F}_{pm} e^{j(p\alpha + \pi/2)} = n \dot{i}_{clc} / (\sqrt{2} \pi p) e^{j(p\alpha + \pi/2)}, \quad (14)$$

коли комплексна амплітуда основного струму у фазі А

$$\dot{I}_m = [n \dot{i}_{clc} / (\sqrt{2} m w_1 K_{об1})] e^{j\pi/2}. \quad (15)$$

Тоді відносна комплексна амплітуда  $i$ -ї гармоніки додаткових струмів у статорі за наявності дефекту в одному стрижні клітки ротора

$$\dot{i}_{дi}^* = \dot{I}_{дim} / \dot{I}_m = \mp \sqrt{2} \pi p F_{im} e^{j(\varphi_i - \pi/2)} / (n \dot{i}_{clc}), \quad (16)$$

де  $\dot{I}_{дim} = \mp [\pi p / (m w_1 K_{об1})] F_{im} e^{j\varphi_i}$ .

З урахуванням (6) остаточно одержимо

$$\begin{aligned} \dot{i}_{дi}^* &= \pm \dot{I}_d^* \exp(\varphi_d) = \mp \frac{j p \underline{Z}_{д1} \sin^2(i \alpha_1 / 2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1]}{\operatorname{in}\{\underline{Z}_0 \{ \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1] + 1 \} + (2\underline{Z}_c + 2\underline{Z}_{д1} + \underline{Z}_k) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1] \}} \times \\ &\times \left\{ 2 + \frac{2 \cos^2(i \alpha_1 / 2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1 / 2] + \operatorname{sh} \gamma_1 \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1 / 2]}{\operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1 / 2] [\sin^2(i \alpha_1 / 2) + \operatorname{sh}^2(\gamma_1 / 2)]} \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Відносне значення повного струму у фазі статора

$$i_c^* = \sin(\omega t) + \sum_{i=1}^{\infty} I_d^* \left\{ \sin \left[ \left[ 1 - (1-p/i)s \right] \omega t + \varphi_d \right] - \sin \left[ \left[ 1 - (1+p/i)s \right] \omega t + \varphi_d \right] \right\} \quad (18)$$

При обриві першого стрижня клітки ротора

$$i_{dio}^* = \pm I_{до}^* \exp(\varphi_{до}) = \mp \frac{jp \sin^2(i \alpha_1/2)}{2in} \left\{ 2 + \frac{2 \cos^2(i \alpha_1/2) \operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] + \operatorname{sh}\gamma_1 \operatorname{ch}[(n-1)\gamma_1/2]}{\operatorname{sh}[(n-1)\gamma_1/2] [\sin^2(i \alpha_1/2) + \operatorname{sh}^2(\gamma_1/2)]} \right\} \quad (19)$$

Тоді відносне значення повного струму у фазі статора при обриві стрижня

$$i_{co}^* = \sin(\omega t) + \sum_{i=1}^{\infty} I_{до}^* \left\{ \sin \left[ \left[ 1 - (1-p/i)s \right] \omega t + \varphi_{до} \right] - \sin \left[ \left[ 1 - (1+p/i)s \right] \omega t + \varphi_{до} \right] \right\} \quad (20)$$

У табл. 2 наведені результати розрахунків за виразом (19) відносних амплітуд  $I_{до}^*$  і фаз  $\varphi_{до}$  додаткових гармонік струму у фазі обмотки статора ( $i = 1 \dots 16$ ) при обриві одного (першого) стрижня клітки ротора і різних значеннях ковзання ( $s = 0,02; 0,2; 1,0$ ) для випадку, коли  $Z = Z_C/Z_K = (50+j250s)/(1+j2s)$ ,  $p = 1$  і  $n = 30$ . Вони показують, що зі збільшенням навантаження асинхронного двигуна відносні амплітуди додаткових гармонік струму дещо зростають і переходять за фазою через максимум. Зі збільшенням порядкового номера гармоніки струму монотонно зменшуються за амплітудою і повертаються за фазою у бік відставання.

Таблиця 2

**Відносні амплітуди й фази додаткових гармонік струму у фазі обмотки статора при обриві першого стрижня клітки ротора**

№ з/п	s=0,02		s=0,2		s=1,0	
	$I_{до}^*$	$\varphi_{до}^o$	$I_{до}^*$	$\varphi_{до}^o$	$I_{до}^*$	$\varphi_{до}^o$
1	0,019	-88,551	0,022	-81,538	0,026	-86,12
2	0,015	-89,542	0,016	-87,621	0,016	-89,08
3	0,011	-89,859	0,011	-89,362	0,011	-89,81
4	$8,732 \cdot 10^{-3}$	-89,988	$8,744 \cdot 10^{-3}$	89,958	$8,717 \cdot 10^{-3}$	89,916
5	$7,122 \cdot 10^{-3}$	89,949	$7,093 \cdot 10^{-3}$	89,63	$7,033 \cdot 10^{-3}$	89,786
6	$5,999 \cdot 10^{-3}$	89,914	$5,956 \cdot 10^{-3}$	89,449	$5,888 \cdot 10^{-3}$	89,715
7	$5,175 \cdot 10^{-3}$	89,892	$5,128 \cdot 10^{-3}$	89,339	$5,061 \cdot 10^{-3}$	89,673
8	$4,547 \cdot 10^{-3}$	89,878	$4,5 \cdot 10^{-3}$	89,268	$4,436 \cdot 10^{-3}$	89,645
9	$4,053 \cdot 10^{-3}$	89,869	$4,008 \cdot 10^{-3}$	89,221	$3,948 \cdot 10^{-3}$	89,627
10	$3,654 \cdot 10^{-3}$	89,863	$3,612 \cdot 10^{-3}$	89,188	$3,556 \cdot 10^{-3}$	89,614
11	$3,326 \cdot 10^{-3}$	89,858	$3,287 \cdot 10^{-3}$	89,165	$3,235 \cdot 10^{-3}$	89,605
12	$3,052 \cdot 10^{-3}$	89,855	$3,015 \cdot 10^{-3}$	89,149	$2,966 \cdot 10^{-3}$	89,599
13	$2,819 \cdot 10^{-3}$	89,853	$2,784 \cdot 10^{-3}$	89,139	$2,739 \cdot 10^{-3}$	89,595
14	$2,618 \cdot 10^{-3}$	89,852	$2,586 \cdot 10^{-3}$	89,133	$2,543 \cdot 10^{-3}$	89,593
15	$2,444 \cdot 10^{-3}$	89,852	$2,414 \cdot 10^{-3}$	89,132	$2,374 \cdot 10^{-3}$	89,592
16	$2,291 \cdot 10^{-3}$	89,852	$2,263 \cdot 10^{-3}$	89,133	$2,226 \cdot 10^{-3}$	89,593

На рисунку наведені результати розрахунку у програмному середовищі MathCAD за виразом (20) відносного значення повного струму у фазі статора при обриві одного стрижня клітки ротора для випадку, коли  $Z = Z_C/Z_K = (50+j250s)/(1+j2s)$ ,  $p = 1$  і  $n = 30$ . Вони показують, що внаслідок накладання додаткових гармонік струму у фазних струмах статора виникає модуляція коливань.

### Висновки

Отримані аналітичні вирази дозволяють дослідити вплив величини дефекту, представленого додатковим опором у стрижні клітки ротора, на гармонічний склад (амплітуду, частоту і початкову фазу) пульсацій струму у обмотці статора при різних навантаженнях (ковзаннях) двигуна, параметрах обмотки статора і клітки ротора і різній кількості пар полюсів. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку узагальнення результатів на випадок дефектів у декількох стрижнях клітки ротора і виявлення найінформативніших величин щодо їх діагностування.

1. Таран В.П. *Диагностирование электрооборудования*. – К., 1983. – 200 с. 2. Яцун М., Яцун А., Хліпальський Ю. *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. 3. Яцун М., Яцун А. *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. 4. Яцун М., Яцун А. *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*. 5. Яцун М.А. *Просторові гармоніки МРС симетричної клітки ротора асинхронного двигуна // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2001. – № 435. – С. 186–189. 6. Яцун М.А. *Просторові гармоніки МРС клітки ротора асинхронного двигуна за наявності дефекту в одному стрижні // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2002. – № 449. – С. 212–216.