prof. dr inż. Tadeusz MISSALA
Przemysłowy Instytut Automatyki
i Pomiarów MERA–PIAP
Warszawa

BŁĘDY ZŁOŻONE W PRACY TRANSFORMATORA POŁOŻENIA KĄTOWEGO – PRZESUWNIKA FAZOWEGO

Rozważono przypadki złożone powstawania błędów transformatora położenia kątowego – przesuwnika fazowego, to jest przypadki, gdy występuje więcej niż jedna przyczyna je wywołująca.

1. Wstęp

W pracy [1] rozważono błędy dodatkowe, jakimi może być obarczony sygnał wyjściowy transformatora położenia kątowego pracującego jako przesuwnik fazowy (TPK-PF) i stosowanego do pomiaru przemieszczenia kątowego osi robota lub obrabiarki sterowanej numerycznie. Rozpatrzono tam oddzielnie oddziaływanie każdej z wielkości wpływających na powstawanie błędów dodatkowych.
W warunkach pracy rzeczywistej zjawiska mają jednak bardziej złożony charakter: TPK–PF jest stosowany zawsze w warunkach pracy kinematycznej lub dynamicznej i w nich podlega działaniu dodatkowych źródeł błędów, jakimi mogą być nieprostopadłość napięć zasilania i nierówność ich amplitud. Biorąc pod uwagę te warunki pracy rzeczywistej, rozważono błędy dodatkowe występujące wówczas, a mianowicie:

- błąd złożony wnoszony w przypadku pracy dynamicznej i nieprostopadłości napięć zasilania,
- błąd złożony wnoszony w przypadku pracy dynamicznej i nierówności napięć zasilania,
- błąd złożony wnoszony w przypadku jednoczesnego występowania nieprostopadłości i nierówności amplitud napięć zasilania i pracy dynamicznej.

2. Błąd złożony wnoszony w przypadku pracy dynamicznej i nieprostopadłości napięć zasilania

Na podstawie teorii wyłożonej w [1] przypadek ten jest opisany równaniami:

$$\underline{U}_d^s = U_m e^{j\omega_n t} \qquad \underline{I}_d^s = I_m e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /1/$$

$$\underline{U}_q^s = jU_m e^{j(\omega_n t + \delta)} \qquad \underline{I}_q^s = jI_m e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)} \qquad /2/$$

$$\alpha^r = f(t) \qquad /3/$$

$$\varphi^s = \operatorname{arctg} \frac{\omega_n L^s}{R^s} \qquad /4/$$

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k \frac{d}{dt}(\sin\alpha^r \underline{I}_d^s - \cos\alpha^r \underline{I}_q^s) \qquad /5/$$

(zastosowano te same oznaczenia co w [1].)

Z podstawienia /1/ ÷ /3/ do /5/ wynika:

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k I_m [f'(t)\cos\alpha^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} + \sin\alpha^r j\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} +$$

$$+ f'(t)\sin\alpha^r j e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)} - \cos\alpha^r j \cdot j\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)}]$$

Po wykonaniu przekształceń otrzymuje się:

$$U^r_{bm} = -M^{sr} k\omega_h I_m \qquad /6/$$

$$\underline{U}^r_b = U^r_{bm}\left\{\cos\alpha_r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n} + e^{j\delta}\right] + j\sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}e^{j\delta} + 1\right]\right\} e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /7/$$

Zgodnie z rozwinięciem funkcji $e^{j\delta}$ na postać trygonometryczną jest:

$$\cos\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n} + e^{j\delta}\right] = \cos\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n} + \cos\delta + j\sin\delta\right] = \cos\alpha^r\left(\frac{f'(t)}{\omega_n} + \cos\delta\right) + j\cos\alpha^r\sin\delta \qquad /8/$$

$$j\sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}e^{j\delta} + 1\right] = j\sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}\cos\delta + j\frac{f'(t)}{\omega_n}\sin\delta + 1\right] =$$

$$= \sin\alpha^r\frac{f'(t)}{\omega_n}\sin\delta + j\sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}\cos\delta + 1\right] \qquad /9/$$

Z podstawienia /8/ i /9/ do /7/ wynika:

$$\underline{U}^r_b = U^r_{bm}\left\{\left\{\cos\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n} + \cos\delta\right] - \sin\alpha^r\frac{f'(t)}{\omega_n}\sin\delta\right\} + \right.$$

$$\left. + j\left\{\cos\alpha^r\sin\delta + \sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}\cos\delta + 1\right]\right\}\right\} e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /10/$$

Napięcie $\underline{U}^r_b$ jest przesunięte w fazie względem napięcia odniesienia o kąt różny od α^r, co oznaczamy:

$$\measuredangle(\underline{U}^r_b, \underline{U}_{REF}) = \alpha^r + \varphi_{\Delta d} \qquad /11/$$

gdzie:

$\varphi_{\Delta d}$ – jest błędem złożonym wnoszonym do wskazań TPK–PF wskutek jednoczesnego działania nieprostopadłości napięć zasilania i pracy dynamicznej, przy czym:

$$\alpha^r + \varphi_{\Delta d} = \arg\underline{U}^r_b \qquad /12/$$

stąd:

$$\operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{\Delta d}) = \frac{\cos\alpha^r\sin\delta + \sin\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n}\cos\delta + 1\right]}{\cos\alpha^r\left[\frac{f'(t)}{\omega_n} + \cos\delta\right] - \sin\alpha^r\frac{f'(t)}{\omega_n}\sin\delta}$$

dla uproszczenia zapisów oznacza się:

$$\nu = \frac{f'(t)}{\omega_n} = \nu(t) \qquad /13/$$

Po wprowadzeniu tego oznaczenia oraz przyjęciu dla małych δ uproszczeń $\sin\delta = \delta$; $\cos\delta = 1$ otrzymuje się:

$$\operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{\Delta d}) = \frac{\delta\cos\alpha^r + (1+\nu)\sin\alpha^r}{(1+\nu)\cos\alpha^r - \nu\delta\sin\alpha^r} \qquad /14/$$

Ze względu na jednolitość zapisu wzór /14/ przekształca się do postaci:

$$\operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{\Delta d}) = \frac{\delta + (1+\nu)\operatorname{tg}\alpha^r}{(1+\nu) - \nu\delta\operatorname{tg}\alpha^r} \qquad /14a/$$

Kat stanowiący dodatkowy błąd TPK–PF określa się ze wzoru:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta d} = \operatorname{tg}|(\alpha^r + \varphi_{\Delta d}) - \alpha^r| \qquad /15/$$

co prowadzi do zależności:

Tablica 1.

α^r \ δ	20′		1°	
	x	x/δ	x	x/δ
0	−14,8	−0,0123	−44,4	−0,0123
30	−14,5	−0,0121	−42,7	−0,0118
45	0,084	0,00007	0,75	0,00021
60	14,6	0,0122	44,0	0,0122
90	29,3	0,0244	88,2	0,0244
120	14,6	0,0122	44,0	0,0122
135	−0,084	−0,00007	−0,75	−0,00021
150	−14,8	−0,0123	−45,4	−0,0126
180	−14,8	−0,0123	−44,6	−0,0123

(wartości x podano w sekundach kąta).

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta d} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{\Delta d}) - \operatorname{tg}\alpha^r}{1 + \operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{\Delta d})\operatorname{tg}\alpha^r} \qquad /16/$$

Po podstawieniu /14/ lub /14a/ do /16/ i przekształceniach dochodzi się do zależności:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta d} = \delta \frac{\cos^2\alpha^r + \nu\sin^2\alpha^r}{(1+\nu) + \delta(1-\nu)\sin\alpha^r\cos\alpha^r} \qquad /17/$$

lub:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta d} = \delta \frac{1 + \nu\operatorname{tg}^2\alpha^r}{(1+\nu)(1+\operatorname{tg}^2\alpha^r) + \delta(1-\nu)\operatorname{tg}\alpha^r} \qquad /17a/$$

dla $\nu = 0$ (praca statyczna) otrzymuje się:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta} = \frac{\delta\cos^2\alpha^r}{1 + \delta\sin\alpha^r\cos\alpha^r} \qquad /18/$$

lub:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Delta} = \frac{\delta}{1 + \operatorname{tg}\alpha^r(\delta + \operatorname{tg}\alpha^r)} \qquad /18a/$$

to jest wyrażenie podane w [1] wzór /15/.

Dla $\nu \neq 0$; $\delta = 0$ (praca dynamiczna bez błędu prostopadłości napięć) jest zaś $\varphi_{\Delta d} = 0$, zgodnie z [1]. Wzór /17/ umożliwia obliczenie błędu łącznego pochodzącego od nieprostopadłości napięć zasilania i pracy dynamicznej. Natomiast składową wywołaną pracą dynamiczną przy istnieniu nieprostopadłości napięć zasilania δ można wyliczyć na podstawie wzorów /17/ i /18/ analogicznie jak to zrobiono przy wyprowadzeniu wzoru /17/.

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\Delta d} - \varphi_{\Delta}) = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{\Delta d} - \operatorname{tg}\varphi_{\Delta}}{1 + \operatorname{tg}\varphi_{\Delta d}\operatorname{tg}\varphi_{\Delta}} \qquad /19/$$

Z podstawienia /17/ i /18/ i przekształceń wynika:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\Delta d} - \varphi_{\Delta}) = \nu\delta \frac{\delta\sin 2\alpha^r - 2\cos 2\alpha^r}{2(1+\nu) + 2\delta\sin 2\alpha^r + \delta^2(1 + \cos 2\alpha^r)} \qquad /20/$$

lub:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\Delta d} - \varphi_{\Delta}) = \nu\delta \frac{\operatorname{tg}^2\alpha^r + \delta\operatorname{tg}\alpha^r - 1}{(1+\nu)(1+\operatorname{tg}^2\alpha^r) + 2\delta\operatorname{tg}\alpha^r + \delta^2} \qquad /20a/$$

W tablicy 1 zestawiono wartości błędu dodatkowego

$$x = \varphi_{\Delta d} - \varphi_{\Delta} \qquad /21/$$

i jego wartości względnych obliczonych dla prędkości kątowej $\omega = 314\ \frac{1}{s}$ tj. dla $\nu = 0{,}025$

Można przyjąć, że maksymalna wartość błędu dodatkowego wynosi:

$$\max x = \max|\varphi_{\Delta d} - \varphi_{\Delta}| = 0{,}025\ \delta \qquad /22/$$

3. Błąd złożony wnoszony w przypadku pracy dynamicznej i nierównych amplitud napięć zasilania

Na podstawie teorii wyłożonej w [1] dla rozważanego przypadku otrzymuje się następujące równania:

$$\underline{U}_d^s = U_m e^{j\omega_n t}; \qquad \underline{I}_d^s = I_m e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /23/$$

$$\underline{U}_q^s = jU_m\,\theta e^{j\omega_n t}; \qquad \underline{I}_q^s = jI_m\,\theta e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /24/$$

$$\alpha^r = f(t) \qquad /25/$$

$$\varphi^s = \operatorname{arc\,tg}\frac{\omega_n L^s}{R^s} \qquad /26/$$

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k\left[\frac{d}{dt}(\sin\alpha^r \underline{I}_d^s - \cos\alpha^r \underline{I}_q^s)\right] \qquad /27/$$

(Przyjęto te same oznaczenia co w [1]).

Z podstawienia /23/ ÷ /25/ do /27/ wynika:

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k I_m [f'(t)\cos\alpha^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} + \sin\alpha^r j\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} +$$

$$+ jf'(t)\sin\alpha^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)}\theta - \cos\alpha^r j\,\theta j\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s)}]$$

Po wykonaniu przekształceń otrzymuje się:

$$U_{bm}^r = -M^{sr} k I_m \omega_n \qquad /28/$$

$$\underline{U}_b^r = U_{bm}^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)}[(\nu + \theta)\cos\alpha^r + j(1 + \nu\theta)\sin\alpha^r] \qquad /29/$$

gdzie: ν wg [13].

Napięcie $\underline{U}_b^r$ jest przesunięte w fazie względem napięcia odniesienia o kąt różny od α^r, co oznacza się:

$$\measuredangle(\underline{U}_b^r, \underline{U}_{REF}) = \alpha^r + \varphi_{ad} \qquad /30/$$

gdzie:

φ_{ad} – jest błędem złożonym wnoszonym do wskazań TPK–PF wskutek jednoczesnego działania nierówności amplitud napięć zasilania i pracy dynamicznej, przy czym:

$$\alpha^r + \varphi_{ad} = \arg \underline{U}_b^r \qquad /31/$$

stąd:

$$\operatorname{tg}(\alpha^r + \varphi_{ad}) = \frac{1 + \nu\theta}{\nu + \theta}\operatorname{tg}\alpha^r \qquad /32/$$

Kąt stanowiący błąd dodatkowy oblicza się z zależności:

$$\varphi_{ad} = (\alpha^r + \varphi_{ad}) - \alpha^r \qquad \text{tj. } \operatorname{tg}\varphi_{ad} = \operatorname{tg}[(\alpha^r - \varphi_{ad}) - \alpha^r] \qquad /33/$$

co prowadzi do wzoru:

$$\operatorname{tg}\varphi_{ad} = \frac{\left(\frac{1 + \nu\theta}{\nu + \theta} - 1\right)\operatorname{tg}\alpha^r}{1 + \frac{1 + \nu\theta}{\nu + \theta}\operatorname{tg}^2\alpha^r}$$

z którego po elementarnych przekształceniach wynika:

$$\operatorname{tg}\varphi_{ad} = \frac{(1 - \nu - \theta + \nu\theta)\operatorname{tg}\alpha^r}{\nu + \vartheta + (1 + \nu\theta)\operatorname{tg}^2\alpha^r} \qquad /34/$$

dla $\nu = 0$ (praca statyczna) otrzymuje się wzór podany w /1/ przy $\theta = 1$ (równe amplitudy napięć) jest zaś $\operatorname{tg}\varphi_{ad} = 0$, co jest zgodne z [1].

Wzór /34/ umożliwia obliczenie błędu łącznego pochodzącego od nierównych amplitud napięcia zasilania i pracy dynamicznej. Natomiast samą składową pochodzącą od pracy dynamicznej w warunkach nierówności amplitud napięć zasilających można obliczyć jako:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{ad} - \varphi_a)$$

Z podstawienia /34/ i /20/ z [1] wynika:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{ad} - \varphi_a) = \frac{\dfrac{(1 - \nu - \theta + \nu\theta)\operatorname{tg}\alpha^r}{\nu + \theta + (1 + \nu\theta)\operatorname{tg}^2\alpha^r} - \dfrac{(1 - \theta)\operatorname{tg}\alpha^r}{\theta + \operatorname{tg}^2\alpha^r}}{1 + \dfrac{1 - \nu - \theta + \nu\theta)\operatorname{tg}\alpha^r}{\nu + \theta + (1 + \nu\theta)\operatorname{tg}^2\alpha^r} \cdot \dfrac{(1 - \theta)\operatorname{tg}\alpha^r}{\theta + \operatorname{tg}^2\alpha^r}}; \qquad /35/$$

Wykonanie rachunków prowadzi do zależności:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{ad} - \varphi_a) = \frac{\nu(\theta^2 - 1)\operatorname{tg}\alpha^r}{(\nu + \theta)\theta + (1 - \nu\theta)\operatorname{tg}^2\alpha^r}; \qquad /36/$$

Wzory /34/ i /36/ umożliwiają obliczenie poszukiwanych błędów dodatkowych. W tablicy 2 zestawiono wartości błędu dodatkowego

$$\gamma = \varphi_{ad} - \varphi_a \qquad /37/$$

i jego wartości względnych obliczonych dla prędkości kątowej $\omega = 314\frac{1}{s}$ tj. $\nu = 0{,}025$.

Tablica 2.

α^r \ θ	1,05		0,95	
	γ'	$\gamma/\lvert\varphi_a\rvert$	γ'	$\gamma/\lvert\varphi_a\rvert$
0	0	0	0	0
30	3,55	0,050	−3,61	−0,047
45	4,17	0,050	−4,30	−0,049
60	3,66	0,050	−3,63	−0,048
90	0	0	0	0
120	−3,66	0,050	3,63	0,048
135	−4,17	0,050	4,30	0,049
150	−3,55	0,050	3,61	0,047
180	0	0	0	0

Błąd dodatkowy γ wynosi więc około 0,05 błędu dodatkowego statycznego wynikającego z nierówności amplitud napięć zasilających.

4. Błąd złożony wnoszony w przypadku pracy dynamicznej oraz nieprostopadłości i nierówności napięć zasilania

Na podstawie teorii wyłożonej w [1] przypadek ten jest opisany równaniami:

$$\underline{U}_d^s = U_m e^{j\omega_n t}; \qquad \underline{I}_d^s = I_m e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} \qquad /38/$$

$$\underline{U}_q^s = j\,U_m\theta e^{j(\omega_n t + \delta)}; \qquad \underline{I}_q^s = jI_m\theta e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)} \qquad /39/$$

$$\alpha^r = f(t) \qquad /40/$$

$$\varphi^s = \text{arc tg}\frac{\omega_n L^s}{R^s} \qquad /41/$$

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k \frac{d}{dt}[\sin\alpha^r \underline{I}_d^s - \cos\alpha^r \underline{I}_q^s] \qquad /42/$$

(Przyjęto te same oznaczenia co w [1])

Z podstawienia /38/ ÷ /40/ do /42/ wynika:

$$\underline{U}_b^r = -M^{sr} k I_m [f'(t)\cos\alpha^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} + \sin\alpha^r j\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} +$$
$$+ jf'(t)\sin\alpha^r \cdot \theta e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)} - \cos\alpha^r \cdot j \cdot j\theta\omega_n e^{j(\omega_n t + \varphi^s + \delta)}]$$

Wykonanie obliczeń i wprowadzenie /13/ prowadzi do:

$$U_{bm}^r = -M^{sr} k I_m \omega_n \qquad /43/$$

$$\underline{U}_b^r = U_{bm}^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)}[(\nu + \theta e^{j\delta})\cos\alpha^r + j(1 + \nu\theta e^{j\delta})\sin\alpha^r] \qquad /44/$$

Dalsze przekształcenia doprowadzają do wyrażenia:

$$\underline{U}_b^r = U_{bm}^r e^{j(\omega_n t + \varphi^s)} [(\nu + \theta\cos\delta)\cos\alpha^r - \nu\theta\sin\delta\sin\alpha^r] +$$
$$+ j[\theta\sin\delta\cos\alpha^r + (1 + \nu\theta\cos\delta)\sin\alpha^r] \qquad /45/$$

Napięcie $\underline{U}_b^r$ jest przesunięte w fazie względem napięcia odniesienia o kąt różny od α^r, a mianowicie o kąt

$$\sphericalangle(\underline{U}_b^r, \underline{U}_{REF}) = \alpha^r + \varphi_{zd} \qquad /46/$$

gdzie:

φ_{zd} – jest błędem złożonym wnoszonym do wskazań TPK–PF wskutek jednoczesnego działania nierówności amplitud i nieprostopadłości napięć zasilania oraz pracy dynamicznej (przypadek ogólny). Kąt ten oblicza się ze wzoru:

$$\alpha^r + \varphi_{zd} = \arg\underline{U}_b^r \qquad /47/$$

stąd zaś:

$$\text{tg}(\alpha^r + \varphi_{zd}) = \frac{\theta\sin\delta\cos\alpha^r + (1 + \nu\theta\cos\delta)\sin\alpha^r}{(\nu + \theta\cos\delta)\cos\alpha^r - \nu\theta\sin\delta\sin\alpha^r} \qquad /48/$$

Wprowadzenie uproszczeń $\sin\delta = \delta$ i $\cos\delta = 1$ oraz wykonanie obliczeń doprowadza do wzoru:

$$\text{tg}(\alpha^r + \varphi_{zd}) = \frac{\delta\theta\cos\alpha^r + (1 + \nu\theta)\sin\alpha^r}{(\nu + \theta)\cos\alpha^r - \nu\delta\sin\alpha^r} \qquad /49/$$

który w innej postaci będzie:

$$\text{tg}(\alpha^r + \varphi_{zd}) = \frac{\delta\theta + (1 + \nu\theta)\text{tg}\alpha^r}{(\nu + \theta) - \nu\theta\delta\,\text{tg}\alpha^r} \qquad /49a/$$

Kąt φ_{zd} stanowiący błąd dodatkowy oblicza się z zależności:

$$\varphi_{zd} = (\alpha^r + \varphi_{zd}) - \alpha^r \qquad /50/$$

co prowadzi do wzoru:

$$\text{tg}\varphi_{zd} = \frac{\dfrac{\delta\theta + (1 + \nu\theta)\text{tg}\alpha^r}{(\nu + \theta) - \nu\theta\delta\,\text{tg}\alpha^r} - \text{tg}\alpha^r}{1 + \dfrac{\delta\theta + (1 + \nu\theta)\text{tg}\alpha^r}{(\nu + \theta) - \nu\delta\theta\,\text{tg}\alpha^r}\,\text{tg}\alpha^r}$$

z którego po elementarnych przekształceniach wynika:

$$\mathrm{tg}\varphi_{zd} = \frac{\delta\theta + (1 + \nu\theta - \nu - \theta)\mathrm{tg}\alpha^r + \nu\delta\theta\mathrm{tg}^2\alpha^r}{(\nu + \theta) + \delta\theta(1 - \nu)\mathrm{tg}\alpha^r + (1 + \theta)\mathrm{tg}^2\alpha^r} \qquad /51/$$

Z wzoru po przyjęciu $\delta = 0$ otrzymuje się wzór /34/ zaś po przyjęciu $\theta = 1$, wzór /17/. Jeżeli natomiast przyjąć:

$$\nu = 0 \quad \delta \neq 0 \quad \text{i} \quad \theta \neq 1$$

to dochodzi się do zależności dla określenia błędu statycznego złożonego φ_z wnoszonego w przypadku jednoczesnego istnienia nieprostopadłości napięć zasilających TPK–PF i nierówności ich amplitud, a mianowicie:

$$\mathrm{tg}\varphi_z = \frac{\delta\theta + (1 - \theta)\mathrm{tg}\alpha^r}{\theta + \mathrm{tg}^2\alpha^r + \delta\theta\mathrm{tg}\alpha^r} \qquad /52/$$

Z kolei jeżeli do wzoru /52/ podstawić $\delta = 0$ otrzymuje się wzór /20/ z [1], zaś jeżeli wprowadzić $\theta = 1$ dochodzi się do wzoru /15/ z [1].

Składowa błędu złożonego wynikająca z pracy dynamicznej przy istnieniu błędów prostopadłości i amplitudy napięć zasilania może być określona następująco:

$$\mathrm{tg}(\varphi_{zd} - \varphi_z) = \frac{\mathrm{tg}\varphi_{zd} - \mathrm{tg}\varphi_z}{1 + \mathrm{tg}\varphi_{zd}\mathrm{tg}\varphi_z} \qquad /53/$$

Na podstawie wzorów /51/ i /52/ i przeprowadzeniu przekształceń dochodzi się ostatecznie do wzoru:

$$\mathrm{tg}(\varphi_{zd} - \varphi_z) = \qquad /54/$$

$$= \nu \frac{-\delta\theta + (\theta^2 + \delta^2\theta^2 - 1)(1 + \mathrm{tg}^2\alpha^r)\mathrm{tg}\alpha^r + \delta\theta\mathrm{tg}^4\alpha^r}{\theta(\nu + \theta + \delta^2\theta) + 2\delta\theta(1 + \mathrm{tg}^2\alpha^r)\mathrm{tg}\alpha^r + (\delta^2\theta^2 + 2\nu\theta + \theta^2 + 1)\mathrm{tg}^2\alpha^r + (1 + \nu\theta)\mathrm{tg}^4\alpha^r}$$

5. Wnioski

5.1. Przeprowadzona analiza wykazuje, że nieprostopadłość napięć zasilających oraz nierówność amplitud napięć zasilających TPK–PF powoduje powstawanie nowej kategorii błędów dodatkowych – błędów dynamicznych.

5.2. Wartości powstających błędów dodatkowych dynamicznych są rzędu 2–5% błędów dodatkowych statycznych wywoływanych wyżej wymienionymi niedokładnościami napięć zasilania.

5.3. Zarówno błędy statyczne jak i dynamiczne wywołane nierównością amplitud napięć zasilających są znacznie większe niż błędy wywołane ich nieprostopadłością.

Literatura

[1] Missala T.: Błędy dodatkowe transformatora położenia kątowego – przesuwnika fazowego, wynikające z jego warunków pracy. Biuletyn Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów MERA –PIAP, 1987 nr 4/123