

Przekładniki są budowane dla następujących mocy znamionowych: 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 i 500 VA przy współczynniku mocy 0,8 ind. Należy podkreślić, że z mocą znamionową obciążenia przekładnika związana jest ściśle klasa dokładności. Wytwórca określa wartość mocy w danej klasie dokładności, przy czym ten sam przekładnik może mieć różne wartości mocy znamionowych w różnych klasach dokładności.

Moc graniczna przekładnika napięciowego jest to największe długotrwałe obciążenie przekładnika przy napięciu znamionowym, przy którym w żadnej części przekładnika nie zostanie przekroczona temperatura dopuszczalna.

3.2. Praca normalna przekładników

Głównym wymaganiem stawianym przekładnikom napięciowym jest możliwie dokładna transformacja w określonych warunkach napięciowych i obciążeniowych.

Z analizy schematu zastępczego przekładnika indukcyjnego (rys.3.1b) wynika, że bezbłędna transformacja jest niemożliwa i że źródłem błędu jest spadek napięcia na szeregowej impedancji przekładnika.

Dla scharakteryzowania błędu transformacji wprowadza się pojęcie błędu napięciowego i kąтового.

Błąd napięciowy ΔU jest określony wzorem:

$$\Delta U = \frac{\vartheta_n U_2 - U_1}{U_1} 100\% , \quad (3.1)$$

przy czym U_1 jest napięciem pierwotnym U_2 napięciem wtórnym, a $\vartheta_n^{x)}$ przekładnią znamionową przekładnika.

x) $\vartheta_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$; w przybliżeniu można przyjąć, że $\vartheta_n \approx \frac{z_1}{z_2}$,
gdzie z_1, z_2 - liczby zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

przy czym:

$$\Delta U_1 = - \frac{I_{\mu}'' Z_1'' \sin(\varphi_0 + \varphi_1)}{U_2} 100\% \quad (3.3)$$

- błąd napięciowy stanu jałowego;

$$\Delta U_2 = - \frac{I_2 Z_w \cos(\psi - \varphi_w)}{U_2} 100\% \quad (3.4)$$

- błąd napięciowy obciążeniowy.

Postępując analogicznie otrzymuje się wyrażenie na błąd kątowy:

$$\delta_u = \delta_{u1} + \delta_{u2} , \quad (3.5)$$

przy czym:

$$\delta_{u1} = 3440 \frac{I_{\mu}'' Z_1'' \cos(\varphi_0 + \varphi_1)}{U_2} \quad (3.6)$$

- błąd kątowy stanu jałowego;

$$\delta_{u2} = 3440 \frac{I_2 Z_w \sin(\psi - \varphi_w)}{U_2} \quad (3.7)$$

- błąd kątowy obciążeniowy.

Z wzorów powyższych wynika, że dla obciążenia o charakterze indukcyjnym, błędy napięciowe stanu jałowego i obciążenia (3.3 i 3.4) mają zawsze znak ujemny. Błąd ten może być skompensowany dodatnią poprawką zwojową, która wyraża się wzorem:

$$\Delta U_z = \frac{j_n z_2 - z_1}{\theta_n z_2} \quad (3.8)$$

gdzie:

$$j_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad - \text{znamionowa przekładnia przekładnika,}$$

z_1, z_2 - rzeczywista wartość zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

Aby otrzymać dodatnią wartość poprawki zwojowej należy zmniejszyć nieco rzeczywistą przekładnię przekładnika ($j = \frac{z_1}{z_2}$) w stosunku do znamionowej. Można to osiągnąć przez zmniejsze-

nie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego, bądź też przez zwiększenie liczby zwojów uzwojenia wtórnego. Trzeba jednocześnie pamiętać, że poprawka zwojowa nie wpływa na wartość błędu kąowego.

Jak wynika ze wzorów (3.2 ÷ 3.7), błędy transformacji są zależne zarówno od wartości mierzonego napięcia jak również od obciążenia przekładnika. Analiza błędów będzie przeprowadzona w dwu etapach, prowadzących do ustalenia:

$$a) \Delta U = f(U_2) \quad i \quad \delta_u = f(U_2) \quad \text{przy} \quad S = \text{const},$$

$$b) \Delta U = f(S) \quad i \quad \delta_u = f(S) \quad \text{przy} \quad U_2 = \text{const}.$$

Jednocześnie zakłada się, że wszystkie parametry schematu zastępczego przekładnika są stałe z wyjątkiem x_μ'' i R_μ'' zależnych od indukcji magnetycznej w rdzeniu.

Ad.a) Dla ustalenia zależności błędów transformacji od napięcia mierzonego, niezbędne jest określenie związków pomiędzy prądem $I_{\mu b}''$ i $I_{\mu c}''$ a napięciem mierzonym U_2 .

Przyjmując, że przebiegi indukcji magnetycznej i prądu są sinusoidalne oraz, że $U_1'' = U_2 = U_\mu''$, wartość indukcji jako funkcja U_2 wyraża się zależnością:

$$B = \frac{U_2}{4,44 f z_2 S_{Fe}}, \quad (3.9)$$

gdzie:

S_{Fe} - przekrój rdzenia magnetycznego.

Wartość $I_{\mu b}''$ jest związana z indukcją magnetyczną w rdzeniu B prawem przepływu^{x)}:

$$I_{\mu b}'' z_2 = \frac{B}{\mu} l_{Fe}. \quad (3.10)$$

Po podstawieniu (3.9) do (3.10) otrzymuje się:

$$I_{\mu b}'' = k_1 \frac{U_2}{\mu}. \quad (3.11)$$

Zależność $I_{\mu c}'' = f(U_2)$ można ustalić pamiętając, że:

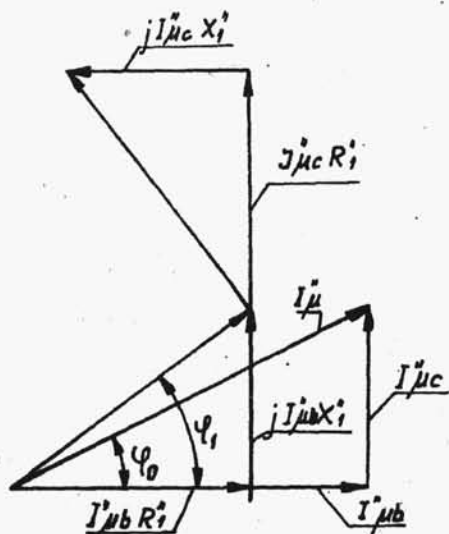
^{x)} Przy pominięciu szczelin powietrznych w rdzeniu przekładnika.

$$I_{\mu c}'' = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_{\mu}''} \quad (3.12)$$

Przypominając znaną zależność, że $\Delta P_{Fe} = C E^2$ i mając na uwadze wzór (3.9), otrzymuje się:

$$I_{\mu c}'' = k_2 U_2 \quad (3.13)$$

Modyfikując nieco wykres wektorowy na rys.3.4 otrzymuje się wykres jak na rys.3.5, z którego wynika, że:



Rys.3.5. Zmodyfikowany wykres wektorowy przekładnika napięciowego indukcyjnego

$$\begin{aligned} I_{\mu}'' z_1'' \sin(\varphi_1 + \varphi_0) &= \\ &= I_{\mu b}'' x_1'' + I_{\mu c}'' R_1'' \quad (3.14) \end{aligned}$$

Po podstawieniu (3.12) i (3.13) do (3.14) pamiętając o (3.3) otrzymuje się:

$$\Delta U_1 = -\frac{C_1}{\mu} - C_2$$

$$\begin{aligned} \text{Pamiętając, że } Z &= \frac{U_2}{I_2} = \\ &= \text{const, otrzymuje się z (3.4),} \\ \text{że } \Delta U_2 &= -\frac{Z_w}{Z} \cos(\psi - \varphi_w) 100\% = \\ &= -C_3 \end{aligned}$$

Tak więc ostatecznie błąd napięciowy będzie:

$$\Delta U = -\frac{C_1}{\mu} - (C_2 + C_3), \quad (3.15)$$

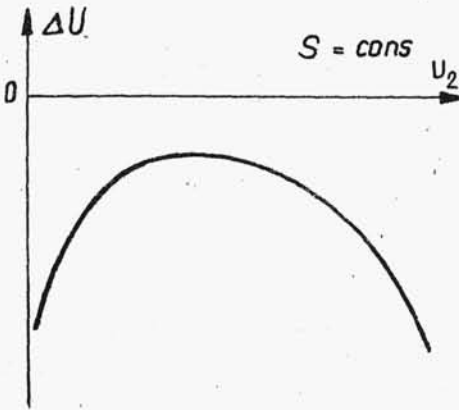
gdzie:

C_1, C_2, C_3 - stałe.

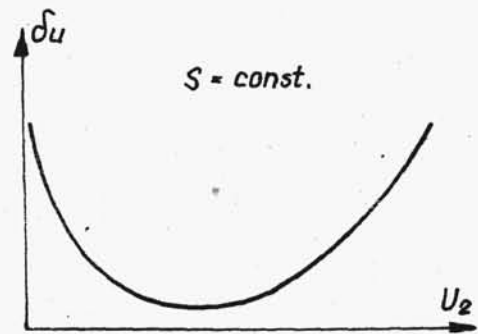
Przeprowadzając analogiczne rozważanie jak powyżej, otrzymuje się dla błędu kąтового:

$$\delta_u = \frac{C_4}{\mu} + C_5 \quad (3.16)$$

Aby określić zależność ΔU i δ_u od napięcia mierzonego, niezbędna jest znajomość $\mu = f(U_2)$. Wyobrażając sobie przebieg krzywej magnesowania i odpowiadający jej przebieg $\mu = f(H)$ - patrz rys.1.4 - nie trudno będzie stwierdzić, że przy zwiększaniu napięcia od wartości bardzo małych będzie



Rys.3.6. Zależność $\Delta U = f(U_2)$ przy $S = \text{const}$



Rys.3.7. Zależność $\delta_u = f(U_2)$ przy $S = \text{const}$

wzrastała wartość indukcji B jak również wartość μ . Oznacza to zmniejszanie się błędu napięciowego (i kątownego). Przy dalszym wzroście U_2 i B następuje przejście przez maksimum μ (co odpowiada minimum błędu), a następnie malenie μ i odpowiadający temu wzrost błędu. Przebiegi te ilustrują rys.3.6 i 3.7.

Ad.b) Dla ustalenia zależności błędu transformacji od obciążenia przekładnika sposób postępowania jest podobny z tym, że obecnie $U_2 = \text{const}$. W tych warunkach $\Delta U_1 = -C_1 = \text{const.}$, a:

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= - \frac{I_2 Z_w \cos(\psi - \varphi_w)}{U_2} 100\% = \\ &= - \frac{U_2 I_2 Z_w \cos(\psi - \varphi_w)}{U_2^2} 100\% = -C_2 S, \end{aligned}$$

gdzie:

$$S = U_2 I_2.$$

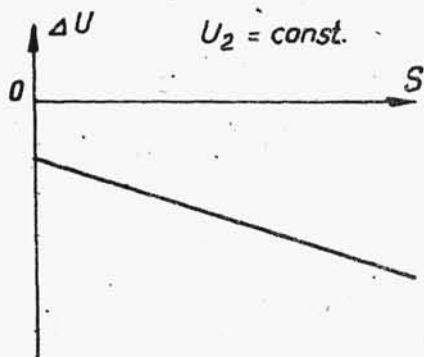
Tak więc błąd napięciowy zależy od obciążenia według funkcji:

$$\Delta U = -C_1 - C_2 S. \quad (3.17)$$

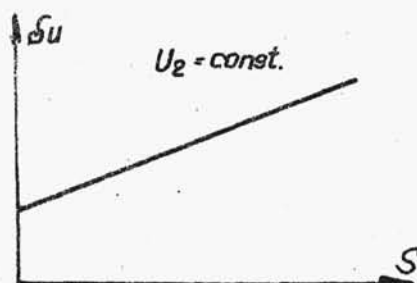
Analogicznie ustala się zależność:

$$\delta_u = C_3 + C_4 S. \quad (3.18)$$

Przykładowe przebiegi $\Delta U = f(S)$ oraz $\delta_u = f(S)$ przy $U_2 = \text{const}$, przedstawiono na rys.3.8 i 3.9. Warto zauważyć, że stałe C_1 i C_3 określają wartość błędu stanu jałowego przy danym napięciu U_2 .



Rys.3.8. Zależność $\Delta_u = f(S)$ przy $U_2 = \text{const}$



Rys.3.9. Zależność $\delta_u = f(S)$ przy $U_2 = \text{const}$

Na rys.3.10 przedstawiono wykres wektorowy, ilustrujący zależność błędów napięciowego i kąowego od obciążenia. Wektor OO' przedstawia stratę napięcia od prądu magnesującego na impedancji uzwojenia pierwotnego przekładnika, odcinek OA jest miarą bezwzględnego błędu napięciowego stanu jałowego, a odcinek OB jest miarą błędu kąowego ($\text{tg } \delta_u = \frac{OB}{U_1}$). Wektor OM jest stratą napięcia od prądu obciążenia I_2 na impedancji wewnętrznej przekładnika Z_w . Rzut tego wektora na oś y jest miarą błędu napięciowego obciążenia (bezwzględnego), a rzut na oś x jest miarą błędu kąowego. W miarę wzrostu obciążenia (przy stałym kącie ψ) prąd I_2 wzrasta a wraz z nim wzrasta strata napięcia $I_2 Z_w$ (kolejne punkty M' , M'' , M''').

Przy stałej wartości obciążenia i zmianie kąta ψ (pomiędzy U_2 i I_2) położenie punktu M będzie się zmieniało między punktami Z' i Z'' na okręgu zatoczonym z punktu O' . Pro-

sta przechodząca przez $O''Z'$ jest miejscem geometrycznym wszystkich możliwych położenia końca wektora $I_2 Z_w$ przy $\cos \psi = 1$, a prosta $O'Z''$ odpowiednio końca wektora przy $\cos \psi = 0$. Z wykresu wynika, że przy stałym I_2 największy błąd kątowy wystąpi, gdy $\cos \psi = 0$, a najmniejszy wówczas, gdy $\cos \psi = 1$. Maksymalna wartość błędu napięciowego przy $I_2 = \text{const}$ będzie wówczas, gdy $\psi = \varphi_w$.

W przypadku potrzeby, możliwa jest kompensacja błędów przekładnika przy zastosowaniu następujących środków:

- wprowadzenie poprawki zwojowej;
- włączenie pojemności równoległe do obciążenia uzwojenia wtórnego,
- włączenie pojemności szeregowo do obciążenia uzwojenia wtórnego,
- włączenie rezystancji równoległe do obciążenia uzwojenia wtórnego,
- powiększenie reaktancji rozproszenia przekładnika.

Poprawka zwojowa, polegająca na zmniejszeniu przekładni (przez zmniejszenie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego bądź zwiększenie liczby zwojów uzwojenia wtórnego), umożliwia kompensację błędu napięciowego.

Włączenie pojemności równoległej kompensuje prąd magnesyjący, a więc błąd stanu jałowego.

Pojemność szeregową kompensuje błąd napięciowy, ale powiększa kątowy. Odwrotnie działa rezystancja równoległa, która powoduje zmniejszenie błędu kąтового kosztem zwiększenia błędu napięciowego. Podobnie działa zwiększenie reaktancji rozproszenia uzwojeń przekładnika.

W przypadku przekładnika pojemnościowego, należy się liczyć z błędami pomiaru, wywołanymi zarówno członem indukcyjnym jak i pojemnościowym. Wychodząc ze schematu jak na rys. 3.2b, można schemat zastępczy przekładnika sprowadzić do postaci jak na rys. 3.11. Schemat ten otrzymuje się przy zastosowaniu zasady Thevenin'a, zgodnie z którą prąd I_2 , płynący w uzwojeniu wtórnym, wyraża się wzorem:

$$I_2 = \frac{U_{20}}{Z + Z_w}, \quad (3.19)$$

przy czym:

$$\Delta U_1 = - \frac{I_{\mu}'' z_1'' \sin(\varphi_0 + \varphi_1)}{U_2} 100\%, \quad (3.22)$$

$$\Delta U_2 = - \frac{I_2 z_w \cos(\psi - \varphi_w)}{U_2} 100\% = - \frac{z_w \cos(\psi - \varphi_w)}{Z} 100\%, \quad (3.23)$$

$$\delta_{u1} = 3440 \frac{I_{\mu}'' z_1'' \cos(\varphi_0 - \varphi_1)}{U_2}, \quad (3.24)$$

$$\delta_{u2} = 3440 \frac{z_w \sin(\psi - \varphi_w)}{Z}, \quad (3.25)$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{I_{\mu c}''}{I_{\mu b}''},$$

$$\varphi_w = \arctg \frac{L_1'' + L_2}{R_1'' + R_2},$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{L_1''}{R_1''}.$$

wszystkie powyższe wzory (3.21 ÷ 3.25) są słuszne w założeniu pełnej kompensacji pojemności dzielnika, tj. w założeniu spełnienia warunku:

$$\omega L = \frac{1}{\omega(C_1'' + C_2'')} \quad (3.26)$$

W warunkach pełnej kompensacji błędy napięciowe i kątowne będą zależne od U_2 i S w sposób analogiczny jak w przypadku przekładników napięciowych.

Ze wzoru (3.26) wynika, że pełna kompensacja jest możliwa tylko przy określonej częstotliwości. Oznacza to jednocześnie, że przy zmianie częstotliwości błędy przekładnika wzrastają. Tak więc prawidłowa praca przekładników pojemnościowych jest możliwa jedynie przy niewielkich wahaniach częstotliwości.

Z uwagi na błędy transformacji przekładnikom napięciowym przypisywane są różne klasy dokładności. W tablicy 3.1 zesta-

wiono, zgodnie z PN-71/E-06551, wymagania dotyczące dopuszczalnych błędów w zależności od klasy dokładności przekładników pomiarowych. Rozróżnia się 5 klas dokładności, przy czym przewiduje się, że przekładniki pojemnościowe są wykonywane tylko w klasach 0,5; 1 i 3. Podobnie jak w przypadku przekładników prądowych, przekładniki napięciowe klasy 0,1 są

Tablica 3.1

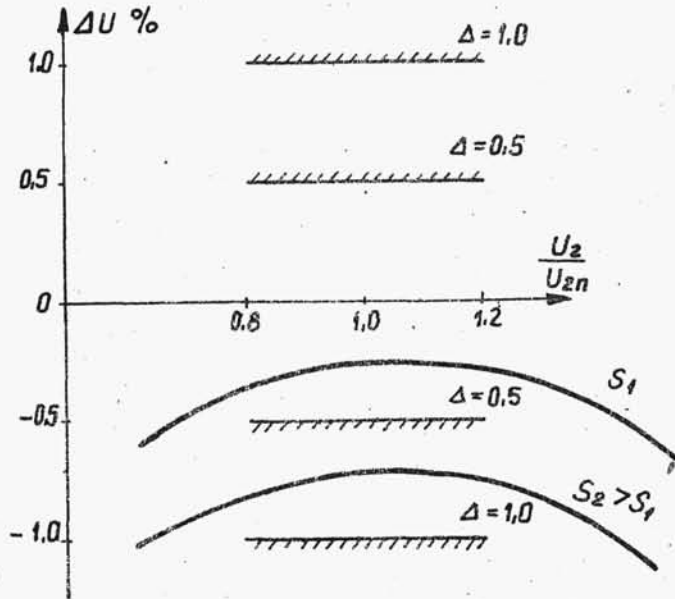
Klasy dokładności i dopuszczalne błędy przekładników
napięciowych pomiarowych

Klasa dokład- ności	Napięcie pierwotne w procentach na- pięcia znamiono- wego	Obciążenie wtór- ne w procentach mocy znamionowej	Dopuszczalne błędy przy czę- stotliwości znamionowej i przy współczynniku mocy in- dukcyjnego obciążenia wtórne- go równym 0,8		
			błąd napię- ciowy ΔU [%]	błąd kątowy δ_u	
				[min]	10^{-2} rad
0,1	80 - 120	25 - 100	$\pm 0,1$	± 5	$\pm 0,15$
0,2	80 - 120	25 - 100	$\pm 0,2$	± 10	$\pm 0,3$
0,5	80 - 120	25 - 100	$\pm 0,5$	± 20	$\pm 0,6$
1	80 - 120	25 - 100	± 1	± 40	$\pm 1,2$
3	80 - 120	25 - 100	± 3	nie okre- śla się	nie o- kreśla się

używane do dokładnych pomiarów laboratoryjnych, klasy 0,2 i 0,5 do zasilania watomierzy i liczników do rozliczeń finansowych za energię elektryczną, a klasy 1 i 3 do mniej dokładnych pomiarów napięcia.

W klasach dokładności 0,1 ÷ 1,0 określa się dopuszczalny przedział błędów: napięciowego i kąтового w zakresie zmian napięcia, jakie mogą występować w normalnej pracy $(0,8 \div 1,2)U_{1n}$ przy wahaniami obciążenia uzwojenia wtórnego $(0,25 \div 1,0)S_n$, przy czym S_n - znamionowa moc obciążenia. Z klasą dokładności jest więc związana ściśle znamionowa moc obciążenia $S_n \left(S_n = \frac{U_{zn}^2}{Z_n} \right)$. Mając na uwadze ustaloną poprzednio za-

leżność błędów od obciążenia można stwierdzić, że ten sam przekładnik będzie miał różne klasy dokładności przy różnych obciążeniach. Jest oczywiste przy tym, że przy większych obciążeniach klasa dokładności będzie niższa, gdyż w miarę wzrostu obciążenia błędy transformacji wzrastają. Ilustruje to rys.3.13.



Rys.3.13. Przebieg charakterystyki błędu napięciowego na tle wymagań dla różnych klas dokładności

Dla przekładników zabezpieczeniowych określa się tylko dwie klasy dokładności (3P i 6P), dla których dopuszczalne

Tablica 3.2

Klasy dokładności i dopuszczalne błędy przekładników napięciowych zabezpieczeniowych

Klasa dokładności	Błąd napięciowy $\Delta U[\%]$	Błąd kątowy δ_u	
		[min]	10^{-2} rad
3 P	$\pm 3,0$	± 120	$\pm 3,5$
6 P	$\pm 6,0$	± 240	$\pm 7,0$

błędy podano w tablicy 3.2. Należy przy tym podkreślić, że błędy przekładnika nie mogą przekroczyć wartości podanych w

tablicy 3.2 przy zmianach napięcia pierwotnego, wymaganych dla przekładników zabezpieczeniowych tj. w przedziale $(0,05 \div k_N)U_{1n}$.

3.3. Stany przejściowe w przekładnikach

Przekładniki napięciowe zabezpieczeniowe powinny transformować poprawnie przebiegi napięciowe również w przypadkach bardzo szybkich zmian napięcia mierzonego, jakie wystąpią np. przy powstaniu zwarcia w sieci. Wymaganie to staje się szczególnie aktualne w miarę wprowadzania coraz szybciej działających zabezpieczeń.

Celem sprawdzenia cech przekładnika napięciowego w tym zakresie, konieczne jest przeprowadzenie analizy stanu przejściowego, jaki wystąpi w nim przy skokowych zmianach napięcia mierzonego.

Analizując stan przejściowy w przekładniku indukcyjnym, rozpatrzmy schemat przedstawiony na rys.3.14. W uproszczonym schemacie zastępczym przekładnika pominięto zarówno indukcyjność rozproszenia jak również indukcyjność obciążenia. Wyłącznik W odtwarza zwarcie w obwodzie pierwotnym przekładnika. Z chwilą zamknięcia wyłącznika W napięcie na zaciskach wejściowych przekładnika spada do zera i od tej chwili napięcie układu elektroenergetycznego nie ma wpływu na zjawiska występujące w przekładniku.

Napięcie na zaciskach wtórnych przekładnika będzie miało przebieg:

$$u_2 = U_2(0_+)e^{-t/T_p} \quad (3.27)$$

przy czym:

$U_2(0_+)$ - napięcie na zaciskach wtórnych w chwili 0_+ po zamknięciu wyłącznika W,

$$T_p = \frac{L''_u(R''_1 + R_2 + R)}{R''_1(R_2 + R)} - \text{stała czasowa przekładnika.}$$

Wartość napięcia $U_2(0_+)$ zależy od chwili wystąpienia zwarcia tj. zamknięcia wyłącznika W.