

ĆWICZENIE 5

BADANIE PRZEKŁADNIKA FERRANTIEGO

5.1. Wprowadzenie

Jedną z licznych grup urządzeń stosowanych w elektroenergetyce są przekładniki inaczej nazywane transformatorami pomiarowymi. Rola przekładników polega na:

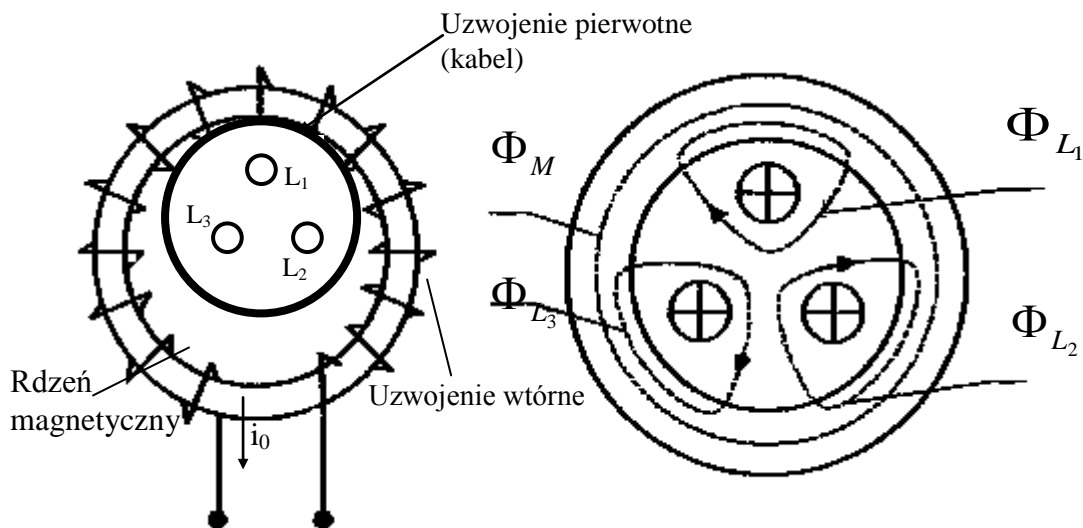
- galwanicznym odizolowaniu urządzeń pomiarowych przyłączonych do strony wtórnej od napięcia i prądu pierwotnego,
- przetworzeniu wielkości pierwotnych na ujednolicone wielkości wtórne.

Dla personelu nadzorującego i urządzeń sterujących przekładniki stanowią podstawowe źródło informacji o stanie pracy systemu elektroenergetycznego i jego elementów.

5.2. Przekładniki z sumowaniem magnetycznym

5.2.1. Budowa przekładnika Ferrantiego

Bardzo istotne znaczenie wśród przekładników prądowych ma przekładnik Ferrantiego, wykorzystywany do zasilania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Przekładniki wykonuje się jako przepustowe nakładane na kabel rys. 5.1 (grupę kabli) lub wyprowadzenia szynowe [1].



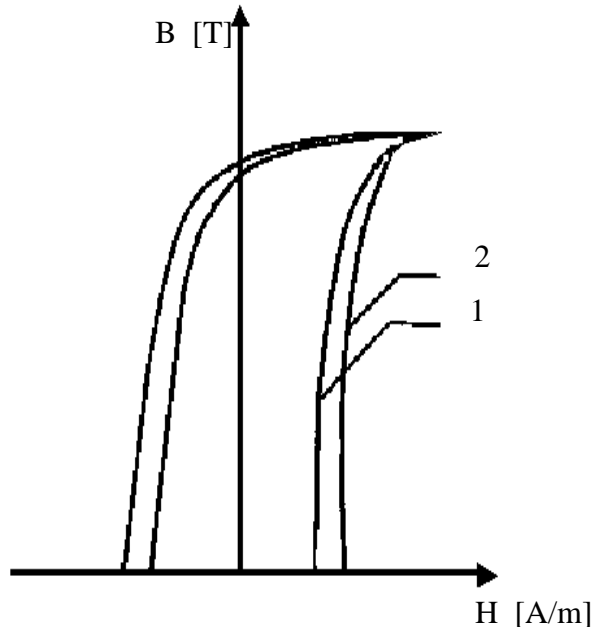
Rys. 5.1. Przepustowa wersja przekładnika Ferrantiego

Przekładnik Ferrantiego składa się z uzwojenia wtórnego (kilkadziesiąt zwojów) nawiniętego na toroidalnym rdzeniu magnetycznym. Natomiast uzwojenie pierwotne stanowi kabel lub grupa kabli, a w wykonaniach specjalnych są to szyny prądowe. W przekładnikach Ferrantiego uzwojenie pierwotne jest odizolowane poprzez powietrze od reszty konstrukcji i nie ma bezpośredniej styczności z pozostałymi elementami przekładnika.

Konstruując przekładnik Ferrantiego i dostosowując go do współpracy z zabezpieczeniem, zwraca się szczególną uwagę na dwa zasadnicze punkty:

- aby minimalny prąd zwarciový (czasami mniejszy od 1A) był w stanie zaindukować w uzwojeniu wtórnym sygnał o mocy wystarczającej do spowodowania zadziałania zabezpieczenia,
- aby napięcie uchybowe przy maksymalnym obciążeniu obwodu pierwotnego w stanie normalnym było mniejsze od napięcia wywołującego zadziałanie zabezpieczenia.

Rdzenie magnetyczne przekładników Ferrantiego wykonuje się z materiałów ferromagnetycznych miękkich (łatwo, ale nietrwale magnesujących się) charakteryzujących się wąską pętlą histerezy, której kształt ulega zmianie pod wpływem działania zmiennego pola magnetycznego (rys. 5.2). Ważne jest, aby przenikalność magnetyczna rdzenia przy bardzo małych indukcjach była możliwie jak największa, co powoduje wzrost dokładności przekładnika.



Rys. 5.2. Charakterystyka magnesowania otrzymana w różnych warunkach magnesowania: 1 - przy $f = 20$ Hz, 2 - przy $f = 50$ Hz

5.2.2. Zasada działania przekładnika Ferrantiego

Prąd i_0 na wyjściu przekładnika Ferrantiego jest równy:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_{L_1} + i_{L_2} + i_{L_3}) \quad (5.1)$$

Sumowanie prądów składowych zerowych płynących w uzwojeniu pierwotnym $i_{L_1}, i_{L_2}, i_{L_3}$ odbywa się na drodze magnetycznej poprzez sumowanie strumieni magnetycznych ($\Phi_{L_1}, \Phi_{L_2}, \Phi_{L_3}$) pochodzących od poszczególnych prądów fazowych.

Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym można wyrazić równaniem:

$$e_2 = M_{L_1} \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} + M_{L_2} \cdot \frac{di_{L_2}}{dt} + M_{L_3} \cdot \frac{di_{L_3}}{dt} \quad (5.2)$$

w którym: $M_{L_1}, M_{L_2}, M_{L_3}$ - indukcyjności wzajemne między przewodami L_1, L_2 i L_3 tworzącymi uzwojenie pierwotne a uzwojeniem wtórnym.

Jeśli przyjmując przykładowo, że $M_{L_1} = M_{L_2} = M < M_{L_3}$, to powyższe równanie można zapisać w postaci:

$$e_2 = M \cdot \frac{d(i_{L_1} + i_{L_2} + i_{L_3})}{dt} + (M_{L_3} - M) \cdot \frac{di_{L_3}}{dt} \quad (5.3)$$

albo też:

$$e_2 = 3M \cdot \frac{di_0}{dt} + (M_{L_1} - M) \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (5.4)$$

Z równania (5.4) wynika, że jeśli wszystkie indukcyjności wzajemne między przewodami pierwotnymi a uzwojeniem wtórnym są sobie równe, to napięcie e_2 jest wytwarzane tylko przez składową zerową prądów pierwotnych i_0 . Dlatego przekładniki Ferrantiego mogą służyć jako filtry składowej zerowej, a urządzenia pomiarowe włączone w ich obwody wtórne mogą mierzyć wartość prądu, przy jakim zadziałają zabezpieczenia ziemnozwarciowe.

5.2.3. Zastosowanie przekładników Ferrantiego

Przekładniki Ferrantiego stosuje się głównie przy zabezpieczeniach ziemnozwarciowych w sieciach pracujących z izolowanym lub kompensowanym punktem neutralnym. Zakres prądów ziemnozwarciowych, które powinny powodować działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych przyłączonych do zacisków uzwojenia wtórnego waha się od paru dziesiątych ampera do kilkudziesięciu amperów.

Przekładnik Ferrantiego jest również głównym elementem budowy wyłączników różnicowoprądowych stosowanych do ochrony przeciwporażeniowej i przeciwpożarowej w instalacjach niskiego napięcia.

5.3. Błędy przekładników Ferrantiego

5.3.1. Rodzaje błędów

Główne błędy występujące w przekładnikach Ferrantiego to [2]:

- błąd kątowy - jest to kąt δ_i (rys 5.3) między wektorem prądu wtórnego i prądu pierwotnego o zwrotach tak dobranych, że w przekładniku bez błędu kątowego $\delta_i = 0$. Dodatni znak tego błędu oznacza, że prąd uzwojenia wtórnego wyprzedza prąd uzwojenia pierwotnego. Można to zapisać jako zależność:

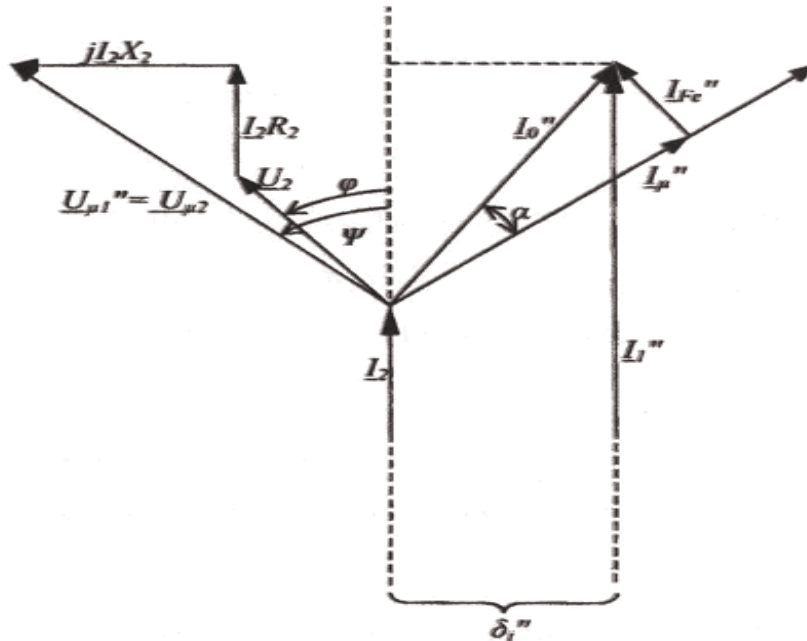
$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{I_0'' \cdot \cos(\varphi + \alpha)}{I_1''} \quad (5.5)$$

- błąd prądowy - jest to różnica między wartością skuteczną prądu wtórnego I_2 pomnożoną przez przekładnię znamionową \mathcal{G}_n a wartością skuteczną prądu pierwotnego I_1 , wyrażona w procentach prądu pierwotnego:

$$\Delta I = \frac{I_2 \cdot \mathcal{G}_n - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (5.6)$$

- błąd całkowity - jest to różnica między wartością chwilową prądu wtórnego \underline{I}_2 pomnożonego przez przekładnię znamionową \mathcal{G}_n i wartością chwilową prądu pierwotnego \underline{I}_1 , wyrażoną w procentach wartości skutecznej prądu pierwotnego I_1 :

$$\Delta I_W = \frac{|\underline{I}_2 \cdot \mathcal{G}_n - \underline{I}_1|}{I_1} \cdot 100 \quad (5.7)$$



Rys. 5.3. Wykres wskazowy ilustrujący istotę błędu kątowego: I_{μ}'' - prąd magnesowania I_{Fe}'' - prąd spowodowany stratami w żelazie, I_0'' - wypadkowy prąd strat, I_1'' - prąd pierwotny przeniesiony na stronę wtórną, I_2 - prąd wtórny, U_2 - napięcie strony wtórnej, $I_2 R_2$ - spadek napięcia na rezystancji uzwojenia wtórnego R_2 , $jI_2 X_2$ - spadek napięcia na reaktancji uzwojenia wtórnego X_2 , $U_{\mu 1}''$ - napięcie strony pierwotnej gałęzi poprzecznej przeniesione na stronę wtórną, $U_{\mu 2}$ - napięcie gałęzi poprzecznej strony wtórnej, δ_i'' - błąd kątowy przeniesiony na stronę wtórną

5.3.2. Sposoby zmniejszania błędów przekładnika Ferrantiego

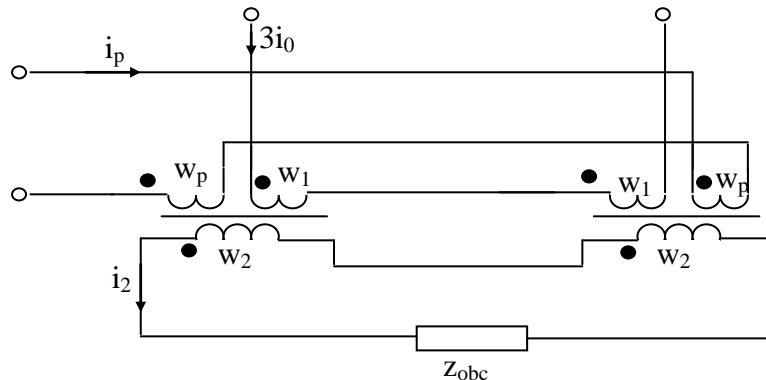
W celu zapewnienia poprawnej pracy zabezpieczeń już przy bardzo małych prądach ziemnozwarciowych stosuje się trzy podstawowe rozwiązania [1]:

1. Stosowanie przekaźników nadprądowych charakteryzujących się bardzo małą mocą rozruchową, rzędu 1 mW lub mniejszą.
2. Podczas konstruowania przekładników dąży się do uzyskania możliwie największych wartości impedancji gałęzi magnesowania określanych przez indukcyjność L_{μ} oraz rezystancję R_{Fe} .
3. Dopasowanie impedancji obciążenia wtórnego Z_{obc} do impedancji gałęzi magnesowania przekładnika Z_{μ} .

Ad. 1. Przekładniki nadprądowe o małej mocy rozruchowej przyłączone do zacisków uzwojenia wtórnego przekładnika Ferrantiego reagują na bardzo małe wartości prądu ziemnozwarciowego.

Ad.2. W celu uzyskania znacznych indukcyjności magnesowania L_{μ} przy określonej liczbie zwojów uzwojenia wtórnego, należy stosować rdzenie o dużej przenikalności początkowej materiału magnetycznego. W celu zwiększenia rezystancji R_{Fe} powinno się stosować materiały magnetyczne o możliwie najmniejszej stratności. Oznacza to, że rdzenie przekładników Ferrantiego powinny być wykonywane ze szlachetnych stopów żelazo-

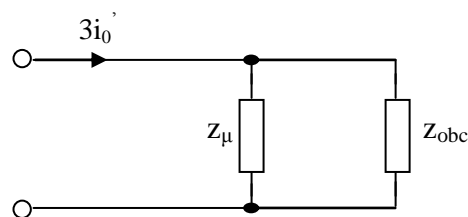
niklowych. Innym sposobem zwiększania impedancji gałęzi magnesowania stosowanym niekiedy w praktyce jest dzielenie rdzeni na dwie części i podmagnesowywanie ich z zewnętrznego źródła, rys. 5.4.



Rys. 5.4. Dwurdzeniowy przekładnik Ferrantiego z uzwojeniem podmagnesowującym, zasilanym z zewnętrznego źródła, w_1 - uzwojenie pierwotne, w_2 - uzwojenie wtórne, w_p - uzwojenie podmagnesowujące

Na rys. 5.4 dla uproszczenia jest tylko jedno uzwojenie pierwotne, ale pozostałe uzwojenia są identyczne i efekt podmagnesowania niczym się nie różni. Kierunki nawinięcia uzwojeń są takie (kropki oznaczają początki), że jeśli brak jest prądu pierwotnego, a istnieje tylko przemienny prąd podmagnesowujący i_p , napięcia indukowane przez ten prąd w obydwu uzwojeniach wtórnych są równe i mają przeciwne znaki, a więc się kompensują. Powoduje to, przesunięcie punktu pracy przekładnika w obszar gdzie charakterystyka magnesowania jest bardziej stroma, co jest korzystne. Dzięki czemu możemy uzyskać maksymalne wartości impedancji gałęzi magnesowania. Opisany sposób wiąże się jednak z dość dużym skomplikowaniem konstrukcji przekładnika oraz koniecznością stosowania zewnętrznego źródła napięcia podmagnesowującego rdzeń. Ogranicza to praktyczne zastosowanie niemal wyłącznie do niektórych typów przekładników szynowych.

Ad.3. Kolejnym ze sposobów zapewnienia poprawnej pracy zabezpieczeń zasilanych z przekładników Ferrantiego jest dopasowanie impedancji obciążenia do impedancji gałęzi poprzecznej w celu uzyskania maksymalnej mocy obciążenia, rys. 5.5.



Rys. 5.5. Uproszczony schemat zastępczy przekładnika Ferrantiego wykazujący wpływ dopasowania obciążenia

Moc S wydzielona na impedancji Z_{obc} jest określana wzorem:

$$S = (3I_0')^2 \frac{Z_\mu^2 \cdot Z_{obc}}{Z_\mu^2 + Z_{obc}^2 + 2Z_\mu \cdot Z_{obc} \cdot \cos \beta} \quad (5.8)$$

przy czym β jest kątem stanowiącym różnicę argumentów impedancji Z_μ i Z_{obc} .

Wartość impedancji Z_{obc} , przy której wydzielona na niej największa moc dla danego prądu I_0'' oblicza się przyrównując do zera pochodną mocy S względem impedancji Z_{obc} , czyli:

$$\frac{dS}{dZ_{obc}} = 0 \quad (5.9)$$

Z warunku wynika następująca zależność:

$$Z_{obc} = Z_{\mu} \quad (5.10)$$

Jeśli warunek ten jest spełniony, to moc maksymalna wyraża się wzorem:

$$S_m = (3I_0')^2 \cdot \frac{Z_{\mu}}{2 \cdot (1 + \cos \beta)} \quad (5.11)$$

Maksymalna moc wydzielana na impedancji obciążenia jest wprost proporcjonalna do wartości impedancji gałęzi magnesowania Z_{μ} . Dlatego zwiększenie impedancji ma istotny wpływ na działanie zabezpieczeń zasilanych z uzwojenia wtórnego.

Iloraz mocy pochodzącej od sygnału roboczego S i sygnału zakłócającego S_u :

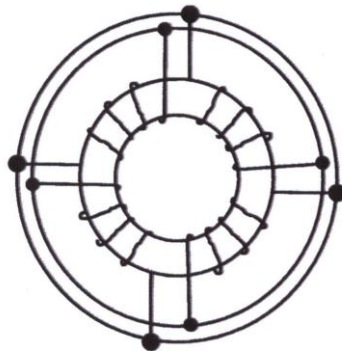
$$\frac{S}{S_u} = \frac{(3I_0')^2}{E_u^2} \cdot Z_{\mu}^2 = \left(\frac{3I_0'}{\omega(M_{L_1} - M) \cdot I_R} \right)^2 \cdot Z_{\mu}^2 \quad (5.12)$$

pokazuje możliwości ograniczenia wpływu zakłóceń.

Wzrost stosunku S/S_u można osiągnąć poprzez:

- zwiększenie impedancji magnesowania Z_{μ} ,
- zmniejszenie różnicy indukcyjności wzajemnej między przewodami strony pierwotnej i uzwojeniem wtórnym, dzięki czemu różnica $M_{L_1} - M$ ma małą wartość.

Różne wartości indukcyjności wzajemnych mogą być spowodowane przez nierównomierne nawinięcie uzwojenia wtórnego oraz przez niesymetryczne rozmieszczenie przewodów pierwotnych w oknie przekładnika. Równomierność nawinięcia można zapewnić przez staranne wykonanie przekładników. Zapewnienie symetrii umieszczenia przewodów pierwotnych jest w praktyce nierealne. Niesymetria sprawia, że w poszczególnych odcinkach rdzenia pojawiają się strumienie magnetyczne o różnych wartościach, co w połączeniu z nieliniowością charakterystyki magnesowania wpływa na zwiększenie napięcia uchybowego. Jednym ze sposobów ograniczenia tego zjawiska jest konstrukcyjne zapewnienie wyrównania strumienia w rdzeniu. Można to uzyskać np. przez nawinięcie dodatkowego uzwojenia złożonego z połączonych równolegle czterech sekcji, co pokazano na rys. 5.6.



Rys. 5.6. Sposób wyrównania strumienia w rdzeniu

Jeśli w jakimś odcinku rdzenia występuje większy strumień niż w pozostałych jego częściach, to indukuje on w odpowiedniej sekcji większe napięcie, które wymusza wzrost prąd w

pozostałych równolegle połączonych sekcjach, przez co wyrównuje strumień w całym rdzeniu. Dzięki temu przekładniki z uzwojeniami wyrównującymi można traktować tak, jak gdyby ich przewody uzwojenia pierwotnego były zawsze umieszczone symetrycznie.

Przekładniki Ferrantiego są masowo stosowane, zatem powinny być tanie. Dlatego spotykane w praktyce konstrukcje są najczęściej kompromisem między dążeniem do zapewnienia przekładnikom optymalnych parametrów technicznych, a uzyskaniem przekładnika możliwie taniego.

5.4. Dobór przekładników prądowych

5.4.1. Zasady doboru

Przekładnik prądowy należy dobierać odpowiednio do warunków pracy w miejscu zainstalowania. Dane znamionowe dobieranych przekładników powinny spełniać następujące warunki:

1. $U_{gn} \geq U_{rm}$; U_{gn} - najwyższe napięcie robocze przekładnika, które musi być równe lub większe od najwyższej wartości napięcia ciągłego U_{rm} , która może wystąpić w miejscach zainstalowania przekładnika.
2. $I_{rmax} = I_{obc} \leq 1,2I_{1n}$; prąd ciągły przekładnika I_{rmax} musi być mniejszy lub równy od $1,2I_{1n}$ - znamionowego prądu pierwotnego przekładnika.
3. Znamionowy prąd wtórny przekładnika I_{2n} , należy dobrać w zależności od odległości przekładnika od rozdzielni, w której zainstalowano przyrządy pomiarowe, I_{2n} może przyjmować wartości 5 A, 2 A lub 1 A. Przy zwarciach odległych przyjmuje się $I_{2n} = 2$ A lub 1 A
4. Znamionowy prąd jednosekundowy I_{tl} powinien spełniać nierówność $I_{tl}^2 \geq I_{cn}^2 \cdot n$, przy czym I_{cn} jest najwyższą wartością krótkotrwałego prądu zwarciego n-sekundowego.
5. $Z_n \geq \sum Z$; znamionowe obciążenie przekładnika Z_n powinno być większe od sumarycznej impedancji Z wszystkich cewek prądowych przyrządów pomiarowych lub przekładników i impedancji przewodów doprowadzających.
6. Klasę dokładności przekładnika prądowego dobiera się w zależności od klasy przyrządu zasilanego z uzwojenia wtórnego. Przekładników klasy 0,1 używa się do pomiarów laboratoryjnych, przekładników klasy 0,2 i 0,5 do zasilania liczników rozliczeniowych energii, klasy 1 do zasilania przyrządów rozruchowych, klasy 3 i 5 do zasilania przyrządów wskaźnikowych.
7. Wartość znamionową liczby przetężeniowej przekładnika dobiera się w zależności od przeznaczenia przekładnika. Dla przekładników zasilających przyrządy pomiarowe przyjmuje się $N_{10} < 10$, przekładniki zasilające przekładniki powinny mieć klasy dokładności 5 P lub 10 P, dla których liczba przetężeniowa przyjmuje wartość 5, 10, 15, 20 lub 30 zależnie od wymaganej dla zastosowanych zabezpieczeń dokładności transformacji.

5.4.2. Wymagania norm

Przekładniki prądowe przeznaczone do współpracy z aparaturą pomiarową powinny spełniać wymagania norm przy podstawowym wymaganiu, jakim jest zachowanie dokładności przy znacznych wielokrotnościach prądu znamionowego.

Wymagania dotyczące przekładników prądowych, zabezpieczeniowych i pomiarowych są zawarte w normie PN-IEC 185+A1/94 Przekładniki prądowe. Ogólne wymagania i badania.

Norma dotyczy nowo wytworzonych przekładników przeznaczonych do współpracy z elektrycznymi przyrządami pomiarowymi i elementami zabezpieczającymi przy częstotliwościach od 15 Hz do 100 Hz.

Norma opisuje również badania przekładników, z których ogólnie można wyróżnić: próby typu, próby wyrobu i próby specjalne; zawiera są wymagania w zakresie dokładności metod sprawdzania i wartości granicznych błędów.

Przy znamionowej częstotliwości i znamionowym obciążeniu błędy: prądowy, kątowy i całkowity nie mogą przekraczać wartości podanych w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Wartości graniczne błędów przekładników pomiarowych, wg [2]

Klasa dokładności	Błąd prądowy przy znamionowym prądzie pierwotnym [%]	Błąd kątowy przy znamionowym prądzie pierwotnym [±]		Błąd całkowity przy znamionowym prądzie granicznym pierwotnym [%]
		minuty	centyradiany	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	-	-	10

W próbie, w której jest określany błąd prądowy i kątowy, obciążenie powinno mieć charakter indukcyjny i współczynnik mocy $\cos\varphi = 0,8$, z wyjątkiem przypadków, gdy obciążenie jest mniejsze niż 5 VA, dla którego dopuszcza się stosowanie obciążenia o charakterze rezystancyjnym.

Literatura:

1. Wiszniewski A.: Przekładniki w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1992 r.
2. Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z.: Przekładniki prądowe. WNT, Warszawa 1985 r.