

ĆWICZENIE NR 6

BADANIE PRZEKŁADNIKA PRĄDOWEGO

(opracował Eligiusz Pawłowski)

1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową, zasadą działania oraz sposobem badania przekładnika prądowego według normy PN-EN 60044 [1, 2, 3]. Zakres ćwiczenia obejmuje: badanie wpływu obciążenia przekładnika na jego pracę, wyznaczenie charakterystyki magnesowania, sprawdzanie poprawności oznaczeń oraz wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa przyrządu (FS).

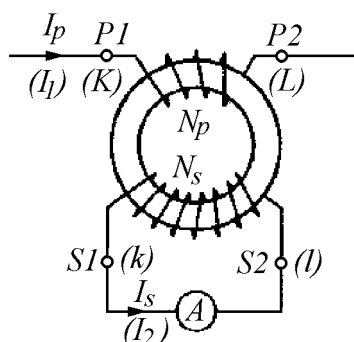
2. Wprowadzenie teoretyczne

2.1. Budowa i zasada działania przekładnika prądowego

Przekładnik jest to przetwornik pomiarowy przeznaczony do zasilania przyrządów pomiarowych, mierników, przekaźników i innych podobnych aparatów [1]. W praktyce wykorzystywane są przekładniki prądowe i napięciowe. Przekładnik prądowy jest odpowiednio zaprojektowanym i skonstruowanym transformatorem pomiarowym, w którym prąd wtórny, w normalnych warunkach pracy, jest praktycznie proporcjonalny do prądu pierwotnego, a jego faza różni się od fazy prądu pierwotnego o kąt, który jest bliski zeru w przypadku odpowiedniego połączenia zacisków. W przekładniku napięciowym analogiczne zależności zachodzą dla napięcia pierwotnego i wtórnego.

Podstawowym zastosowaniem przekładników prądowych jest **pomiar prądów o dużych wartościach**, które nie mogą być zmierzone poprzez bezpośrednie włączenie mierników ze względu na przekroczenie ich zakresów pomiarowych. Drugą istotną zaletą stosowania przekładników prądowych jest **odizolowanie galwaniczne** przyrządów pomiarowych od obwodu mierzonego znajdującego się pod wysokim napięciem.

Budowę i zasadę działania przekładnika prądowego przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Budowa i zasada działania przekładnika prądowego

Należy zwrócić uwagę, że na rys.1. podano podwójne oznaczenia: wprowadzone przez normę [8] i zgodne z obowiązującymi obecnie normami [1, 2, 3] oraz (w nawiasach) według wycofanej już ze stosowania normy [7] oraz norm wcześniejszych [5, 6]. Znajomość oznaczeń według norm wcześniejszych jest wskazane, gdyż przekładniki prądowe są przyrządami prostymi w konstrukcji i bardzo trwałymi, w związku z tym w praktyce można się jeszcze spotkać z wieloma poprawnie działającymi egzemplarzami przekładników oznaczonymi zgodnie z wcześniejszymi normami.

Przedstawiony na rys.1. przekładnik prądowy posiada dwa uzwojenia: pierwotne posiadające N_p zwojów oraz wtórne posiadające N_s zwojów (w praktyce spotyka się również

specjalne konstrukcje przekładników prądowych z większą liczbą uzwojeń). Uzwojenia nawinięte są na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym, najczęściej toroidalnym, zwiniętym z jednego paska blachy transformatorowej. Zaciski uzwojenia pierwotnego oznaczane są $P1 (K)$ i $P2 (L)$, a uzwojenia wtórne odpowiednio $S1 (k)$ i $S2 (l)$. Przez uzwojenie pierwotne $PIP2$ przepływa prąd $I_p (I_1)$, który jest transformowany na stronę wtórna przekładnika. W uzwojeniu wtórnym $SIS2$ płynie prąd $I_s (I_2)$, który zasila obwody prądowe przyrządów pomiarowych, mierników, przekaźników lub podobnych aparatów dołączonych do tego uzwojenia. Zewnętrzny obwód zasilany przez uzwojenie wtórne przekładnika nazywamy **obwodem wtórnym**. Uzwojenia przekładnika są od siebie starannie odizolowane, co zabezpiecza przed przebiciem wysokiego napięcia ze strony pierwotnej do obwodu wtórnego. Dzięki temu przekładniki prądowe umożliwiają bezpieczny pomiar prądów w przewodach znajdujących się pod wysokim napięciem, nawet rzędu setek kilowoltów, a także chronią przed skutkami pojawienia się jeszcze wyższych napięć udarowych w wyniku występowania wyładowań atmosferycznych.

Przekładnik prądowy jest transformatorem o wymuszonym prądzie pierwotnym i pracującym w reżimie zbliżonym do zwarcia strony wtórnej. Zasada działania przekładnika prądowego opiera się na fakcie, że suma wszystkich przepływów w obwodzie magnetycznym (przepływ jest to iloczyn prądu płynącego przez uzwojenie i liczby zwojów tego uzwojenia) jest równa zero. Ponieważ obwód wtórny przekładnika prądowego jest zwarty przez małą impedancję (np. przez amperomierz), płynie w nim prąd, który prawie całkowicie kompensuje przepływ pierwotny:

$$I_p N_p \approx I_s N_s, \quad (1)$$

przy czym I_p i I_s są wartościami skutecznymi prądów: pierwotnego i wtórnego. Z zależności tej można obliczyć wartość prądu pierwotnego I_p na podstawie pomiaru prądu wtórnego I_s oraz liczby zwojów N_p i N_s tych uzwojeń:

$$I_p \approx I_s \frac{N_s}{N_p}. \quad (2)$$

Stosunek liczby zwojów $N_s/N_p = K_{zw}$ nosi nazwę przekładni zwojowej lub nieskorygowanej. Przekładnia zwojowa K_{zw} ma wartość zbliżoną do przekładni prądowej rzeczywistej K_i , równej stosunkowi wartości skutecznej prądów, płynących rzeczywiście przez przekładnik:

$$K_i = \frac{I_p}{I_s}. \quad (3)$$

Przekładnia rzeczywista K_i jest zmienna, gdyż stosunek wartości prądów I_p/I_s zależy od różnych czynników, m.in. od obciążenia przekładnika i wartości prądu pierwotnego. W eksploatacji przekładnika korzysta się więc z przekładni znamionowej K_n , równej stosunkowi prądów znamionowych:

$$K_n = \frac{I_{pn}}{I_{sn}}. \quad (4)$$

Wartości znamionowe prądu pierwotnego I_{pn} i wtórnego I_{sn} są to takie wartości tych prądów, do których odniesiona jest praca przekładnika, w szczególności dla tych prądów określa się dopuszczalne wartości błędów przekładnika. W praktyce, po zmierzeniu wartości prądu wtórnego I_s , wartość natężenia prądu pierwotnego I_p oblicza się ze wzoru:

$$I_p = K_n I_s \quad (5)$$

2.2. Schemat zastępczy i wykres wskazowy przekładnika prądowego

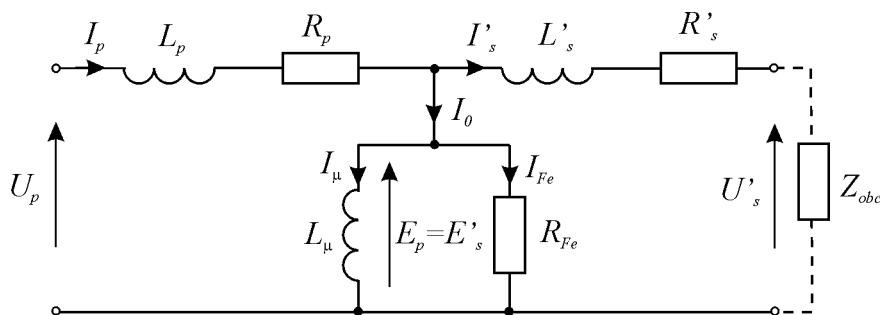
W niektórych przekładnikach przyjmuje się przekładnię znamionową równą zwojowej:

$$K_n = \frac{I_{pn}}{I_{sn}} = \frac{N_s}{N_p} = K_{zw} \quad (6)$$

co jest równoznaczne z założeniem, że przepływy znamionowe: pierwotny i wtórny są sobie dokładnie równe, tzn. że:

$$I_{pn} N_p = I_{sn} N_s \quad (7)$$

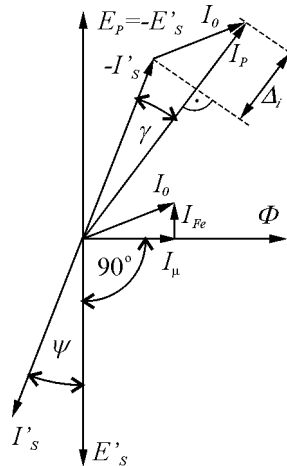
Przekładniki takie wykazują błędy prądowe ujemne, gdyż przepływ wtórny $I_s \cdot N_s$ jest w rzeczywistości zawsze mniejszy od przepływu pierwotnego $I_p \cdot N_p$ o wartość przepływu jałowego, koniecznego do wytworzenia strumienia magnetycznego w rdzeniu. Można to wygodnie przedstawić na schemacie zastępczym przekładnika (rys.2), na którym parametry strony wtórnej (z „primem”) sprowadzono do strony pierwotnej uwzględniając przekładnię zwojową. Jest to schemat zastępczy typu T. Prąd wtórny I'_s jest równy prądowi pierwotnemu I_p pomniejszonemu o prąd jałowy I_0 , który dzieli się na prąd magnesujący I_μ i prąd I_{Fe} reprezentujący straty w rdzeniu ferromagnetycznym przekładnika. Prąd magnesujący I_μ wytwarza w rdzeniu ferromagnetycznym przekładnika zmienny w czasie strumień magnetyczny Φ , który indukuje w uzwojeniach siłę elektromotoryczną E . Siła elektromotoryczna E_s indukowana w uzwojeniu wtórnym wymusza prąd wtórny I_s przepływający przez impedancję Z_{obc} obciążającą przekładnik. Należy zwrócić uwagę, że **przekładnik prądowy działa poprawnie tylko dla prądów przemiennych!** Prąd stały płynący w uzwojeniu pierwotnym przekładnika wytworzy w rdzeniu ferromagnetycznym stałe w czasie pole magnetyczne, które nie będzie indukowało w uzwojeniu wtórnym siły elektromotorycznej, a więc w takim przypadku prąd w obwodzie wtórnym przekładnika nie popłynie!



Rys.2. Schemat zastępczy (typu T) przekładnika prądowego

Na rys.3 przedstawiono wykres wskazowy przekładnika prądowego. Prąd magnesujący I_μ wytwarza zmienny strumień magnetyczny Φ indukujący w uzwojeniu wtórnym siłę elektromotoryczną E_s wymuszającą przepływ prądu wtórnego I_s . Kąt fazowy Ψ wynika z parametrów uzwojenia wtórnego przekładnika (rezystancji R_s i indukcyjności L_s) oraz z jego obciążenia Z_{obc} . Prąd jałowy I_0 jest sumą geometryczną prądu magnesującego I_μ i prądu I_{Fe} reprezentującego straty w rdzeniu przekładnika (tzw. straty w żelazie). Prądy I_μ i I_{Fe} są względem siebie prostopadłe. **W idealnym przekładniku prąd jałowy I_0 byłby równy zeru**, a prądy pierwotny I_p i wtórny I'_s byłyby sobie równe co do modułu i dokładnie w przeciwfazie. W takim przekładniku przekładnia zwojowa i prądowa byłyby sobie równe, a

błędy byłyby równe zero. W przekładniku rzeczywistym prąd pierwotny I_p jest sumą odwróconego prądu wtórnego I'_s (sprowadzonego do strony pierwotnej) i prądu jałowego I_0 . Dlatego w przekładniku rzeczywistym **przekładnia zwojowa i prądowa nie są sobie równe**. Skutkiem tego jest występowanie błędów.

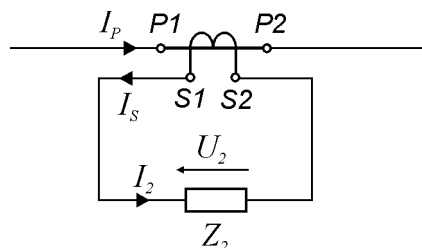


Rys.3. Wykres wskazowy przekładnika prądowego

2.3. Błędy przekładnika prądowego

Dla przekładnika prądowego definiuje się **błąd prądowy Δ_i** , **błąd kątowy γ** oraz **błąd całkowity Δ_c** . Błędy te przedstawiono na wykresie wskazowym (rys.3), przy czym błąd całkowity Δ_c w praktyce można przyjąć jako równy prądowi jałowemu I_0 . Błędy przekładnika określone w odniesieniu do przekładni zwojowej (nieskorygowanej) są nazwane błędami nieskorygowanymi. Błąd nieskorygowany jest, jak widać z wykresu rys.3, jednoznacznie określony przez stosunek prądu jałowego I_0 do prądu pierwotnego I_p .

Ujemny błąd prądowy może być łatwo skorygowany przez niewielką zmianę przekładni zwojowej. W tym celu zmniejsza się nieznacznie liczbę zwojów wtórnych N_s , czyli wprowadza się tzw. **poprawkę zwojową**. Przepływ wtórny $I_s \cdot N_s$ pozostaje wtedy bez zmiany, lecz wobec zmniejszenia N_s musi odpowiednio wzrosnąć I_s , co zmniejsza błąd prądowy Δ_i . Jeżeli w takim przekładniku przepływ jałowy zmaleje znacznie, np. wskutek zmniejszenia obciążenia przekładnika, to błąd prądowy Δ_i przechodzi na stronę dodatnią. Błąd kątowy γ oczywiście od poprawki zwojowej nie zależy. W praktyce użytkownik stosuje do obliczeń przekładnię znamionową K_n i nie wie, czy wykorzystywany przez niego przekładnik prądowy posiada poprawkę zwojową, ale może się o tym przekonać wykonując odpowiednie pomiary, obciążając przekładnik po stronie wtórnej impedancją Z_2 o różnych wartościach, tak jak pokazano to na rys.4.

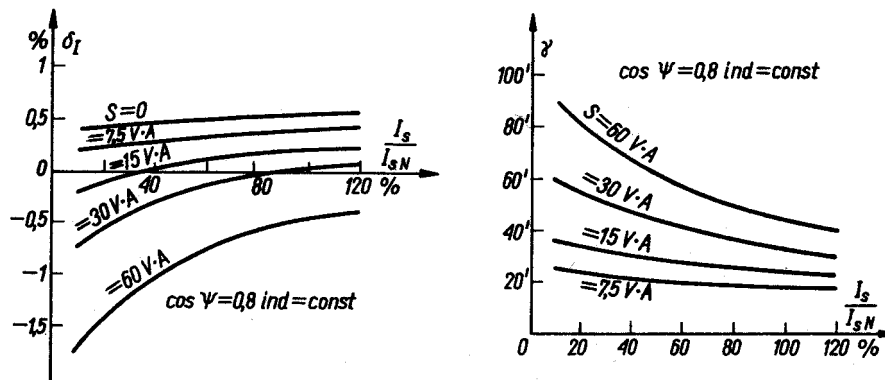


Rys.4. Przekładnik prądowy obciążony po stronie wtórnej impedancją Z_2

Obciążenie przekładnika jest to impedancja obwodu wtórnego wyrażona w omach przy określonym współczynniku mocy $\cos \varphi$. Obciążenie zwykle jest wyrażane jako moc pozorna S_2 w woltoamperach VA, pobierana przez obwód wtórny:

$$S_2 = U_2 I_2. \quad (8)$$

Ponieważ błąd prądowy Δ_i jest zależny od prądu jałowego I_0 , a jego wartość jest zależna od prądu pierwotnego I_p i obciążenia przekładnika Z_2 , to odpowiednio dobrana poprawka zwojowa umożliwi uzyskanie błędu prądowego bliskiego zeru dla przekładnika pracującego w warunkach znamionowych. Dla innych obciążeń błąd będzie większy i może być zarówno dodatni jak i ujemny. Przykładowe charakterystyki błędów przekładnika prądowego przedstawiono na rys.5. Obciążenie wyrażono poprzez moc pozorną strony wtórnej S_2 (w woltoamperach VA), a prąd wtórny I_s w procentach odniesiony do prądu znamionowego I_{sn} .



Rys.5. Przykładowe charakterystyki błędu prądowego i kąтового przekładnika prądowego

Błąd prądowy Δ_i (błąd przekładni) według normy [1] jest to błąd wynikający z tego, że rzeczywista przekładnia nie jest równa przekładni znamionowej:

$$\Delta_i = K_n I_s - I_p. \quad (9)$$

Oznacza to, że w rzeczywistym przekładniku równanie (5) jest spełnione tylko w przybliżeniu. Błąd prądowy Δ_i określony zależnością (9) jest błędem **bezwzględny** i jego jednostką jest amper, dzięki czemu można go przedstawić na wykresie wskazowym (rys.3). W praktyce bardziej przydatny jest **błąd prądowy względny δ_i** wyrażany w procentach:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{I_p} \cdot 100\% = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Zależność (10) należy traktować tylko jako wzór definicyjny, w praktyce nie jest on wykorzystywany do bezpośredniego wyznaczania błędu przekładnika, gdyż prądy I_p oraz I_s trudno jest zmierzyć dostatecznie dokładnie. Pomiary błędów przekładnika wykonuje się więc specjalnymi metodami [10].

Błąd kątowy γ przekładnika jest to kąt fazowy między wektorami prądów pierwotnego I_p i wtórnego I_s odwróconego o 180° [1], tak jak przedstawiono to na wykresie wskazowym (rys.3). Zwykle jest on wyrażany w minutach lub centygradach i zazwyczaj w typowych warunkach pracy przekładnika nie przekracza on wartości kilkudziesięciu minut kątowych. Warto więc zauważyć, że wykres wskazowy na rys.3 przedstawiono ze znacznie większą wartością błędu kątowego γ , dla rzeczywistego przekładnika praktycznie na takim wykresie byłby on niewidoczny! Błąd kątowy odgrywa rolę wszędzie tam, gdzie wynik pomiaru wykonanego przy wykorzystaniu przekładnika zależy od fazy prądu (np. pomiar mocy, energii, $\cos\phi$). Z tego względu błąd kątowy jest również ważnym czynnikiem charakteryzującym dokładność przekładnika. W zwykłych warunkach błąd kątowy jest dodatni, gdyż jak widać na rys.3, prąd wtórny I_s jest przyspieszony względem prądu

pierwotnego I_p . Przy pomiarach prądu amperomierzem dołączonym do strony wtórnej przekładnika błąd prądowy nie odgrywa żadnej roli.

Błąd całkowity Δ_c jest to wartość skuteczna prądu w stanie ustalonym, będąca różnicą pomiędzy chwilowymi wartościami prądu pierwotnego i_p i chwilowymi wartościami prądu wtórnego i_s pomnożonego przez przekładnię znamionową K_n przekładnika, obliczona za czas trwania jednego okresu T [1]:

$$\Delta_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} \quad (11)$$

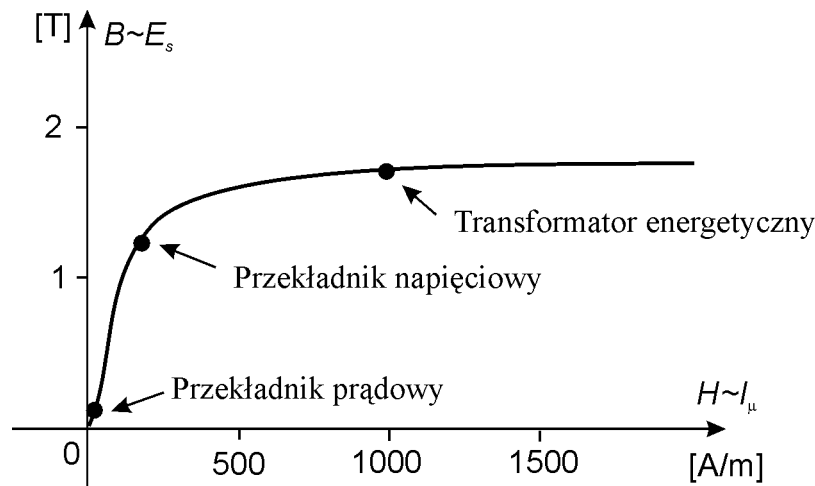
Błąd całkowity względny δ_c wyrażony w procentach można wyznaczyć z zależności:

$$\delta_c = \frac{\Delta_c}{I_p} \cdot 100\% \quad (12)$$

Gdy prądy występujące w zależności (11) są sinusoidalne można przyjąć, że podana definicja błędu całkowitego jest zgodna z **błędem wskazowym**, definiowanym normach wcześniejszych [7]. Stosowanie pojęcia błędu całkowitego ma szczególne uzasadnienie w przypadkach, gdy posługiwanie się wykresem wskazowym nie jest możliwe, ponieważ elementy nieliniowe powodują występowanie wyższych harmonicznych prądów jałowego i wtórnego. Tak więc błąd całkowity jest pojęciem szerszym od błędu wskazowego i świadczy o odchyleniu od idealnego przekładnika prądowego powodowanym również przez wyższe harmoniczne występujące w uzwojeniu wtórnym, a które nie występują w uzwojeniu pierwotnym.

2.3. Charakterystyka magnesowania i rozwarcie przekładnika prądowego

Rdzeń przekładnika prądowego jest wykonany, podobnie jak innych rodzajów transformatorów, z ferromagnetyka posiadającego nieliniową charakterystykę magnesowania $B=f(H)$. Powszechnie stosuje się do tego celu specjalnie zaprojektowane blachy elektrotechniczne transformatorowe, charakteryzujące się małymi stratami histerezowymi i wiropądowymi oraz posiadającymi dużą wartość przenikalności magnetycznej μ i indukcji nasycenia. Więcej informacji na ten temat zawarto w instrukcji do ćwiczenia o pomiarach stratności magnetycznej aparatem Epsteina. Przykładową charakterystykę magnesowania typowej blachy elektrotechnicznej przedstawiono na rys.6. Zaznaczono na niej orientacyjnie znamionowe punkty pracy kilku rodzajów transformatorów.



Rys.6. Charakterystyka magnesowania z zaznaczonym punktem pracy przekładnika prądowego

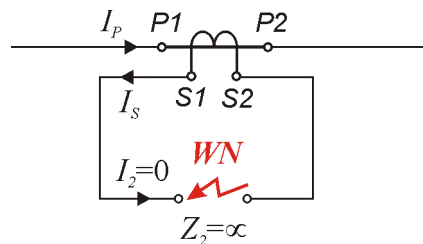
Analizując rys.6. należy pamiętać, że natężenie pola magnetycznego H jest proporcjonalne do prądu magnesującego I_μ przepływającego przez uzwojenie pierwotne przekładnika, a siła elektromotoryczna E_s indukowana w uzwojeniu wtórnym przekładnika jest proporcjonalna do indukcji magnetycznej B . Należy zwrócić uwagę na zasadniczą różnicę pomiędzy przekładnikiem prądowym, a innymi rodzajami transformatorów: przekładnik prądowy pracuje na początku charakterystyki magnesowania przy stosunkowo małej indukcji magnetycznej B w rdzeniu. Dlatego wymagane jest również małe natężenie pola magnetycznego H oraz mały prąd magnesujący I_μ . Dzięki temu błąd prądowy Δ_i przekładnika jest odpowiednio mały, tak jak to pokazano na wykresie wskazowym (rys.3).

Warto przy okazji zauważyć, że transformatory energetyczne pracują przy stosunkowo dużej wartości indukcji, dzięki czemu uzyskuje się duże tzw. napięcie zwojowe, umożliwiające konstruowanie transformatorów z możliwie małą liczbą zwojów i niedużym rdzeniem, a więc oszczędnych materiałowo i tanich. Przekładniki napięciowe pracują natomiast przy trochę niższej indukcji, aby uzyskać mniejsze straty w rdzeniu i zmniejszyć błędy napięciowe przekładnika.

Zwróćmy uwagę, że w przekładniku prądowym impedancja obciążenia nie ma wpływu na wartość prądu wtórnego, lecz wpływa na spadek napięcia U_2 , zgodnie ze wzorem:

$$U_2 = I_2 Z_2. \quad (13)$$

Przy wzroście napięcia wtórnego U_2 rośnie również pierwotny spadek napięcia na przekładniku, ponieważ równocześnie musi wzrastać siła elektromotoryczna wtórna E_s , strumień w rdzeniu i siła elektromotoryczna pierwotna E_p . Wzrost strumienia wymaga zwiększenia indukcji B , a więc również prądu magnesującego I_μ i prądu jałowego I_0 , co jest równoznaczne ze wzrostem błędu prądowego Δ_i . Jeżeli założyć duże zwiększenie impedancji wtórnej Z_2 , to prąd jałowy I_0 wzrośnie o tyle, że nie można już mówić o równości przepływów pierwotnego i wtórnego (1); prąd wtórny staje się znacznie mniejszy, niż to wynika z przekładni znamionowej. Wreszcie, gdy impedancja wtórna Z_2 dąży do nieskończoności tzn. następuje przerwa w obwodzie wtórnym (rys.7), przepływ wtórny zanika i przepływ pierwotny staje się w całości przepływem magnesującym, wywołującym strumień wielokrotnie większy od znamionowego.

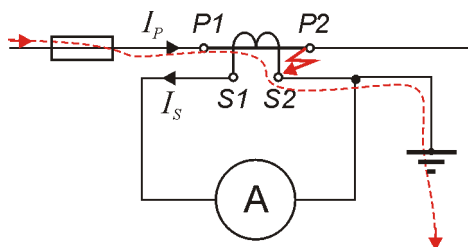


Rys.7. Praca przekładnika prądowego z rozwartą stroną wtórną

Punkt pracy przekładnika przesuwają się na jego charakterystyce magnesowania (rys.6) do góry w prawo (zbliża się do punktu pracy transformatorów energetycznych). Jest to sytuacja bardzo niebezpieczna, gdyż duży strumień magnetyczny powoduje wydzielanie się dużych ilości ciepła w rdzeniu (tzw. straty histerezy i wiropądowe), co może spowodować uszkodzenie izolacji. Jednocześnie silny strumień magnetyczny indukuje w uzwojeniu wtórnym niebezpiecznie wysokie napięcie, co może doprowadzić do uszkodzenia izolacji, powstania łuku elektrycznego i porażenia osoby obsługującej lub uszkodzenia innych przyłączonych urządzeń. Z tych względów należy pamiętać, że **przekładnik prądowy nigdy nie powinien pracować z rozwartą stroną wtórną!** Dlatego w obwodzie wtórnym przekładnika prądowego nie wolno stosować bezpieczników, a ewentualne układy regulacji obciążenia powinny zawsze gwarantować ciągłość przepływu prądu, np. ruchome

styki rezystorów regulacyjnych powinny być zawsze połączone z jednym końcem rezystora, co zapobiega chwilowym przerwom w obwodzie elektrycznym podczas regulacji.

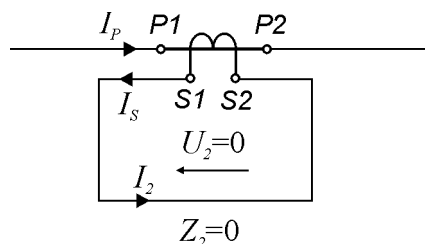
W celu zabezpieczenia przekładnika prądowego przed skutkami zwarcia w sieci energetycznej **można włączyć bezpiecznik tylko w szereg z uzwojeniem pierwotnym**, zgodnie z rys.8. Dodatkowo, uziemienie obwodu wtórnego zabezpiecza przed skutkami ewentualnego uszkodzenia izolacji przekładnika i przebiciu wysokiego napięcia ze strony pierwotnej na wtórną.



Rys.8. Zabezpieczanie przekładnika prądowego przed skutkami zwarcia i uszkodzenia izolacji

2.4. Zwarcie strony wtórnej przekładnika prądowego

Ponieważ obciążenie przekładnika prądowego jest wyrażane jako moc pozorna S_2 pobierana przez obwód wtórny (8), a spadek napięcia U_2 w obwodzie wtórnym jest zależny od impedancji obciążenia Z_2 (13), to należy zauważyć, że przy zwartych zaciskach uzwojenia wtórnego moc S_2 pobierana z przekładnika jest równa zero (rys.9).



Rys.9. Praca przekładnika prądowego ze zwartą stroną wtórną, stan jałowy przekładnika

Jak widać na rys.9, przekładnik jest zasilany od strony pierwotnej, w jego uzwojeniach płyną prądy, ale nie jest pobierana z niego moc po stronie wtórnej ($S_2=0$). Prawdziwe jest więc stwierdzenie, że **zwarcie strony wtórnej przekładnika prądowego wprowadza go w stan jałowy**. Jest to stan dla przekładnika prądowego całkowicie bezpieczny, odwrotnie jak dla innych rodzajów transformatorów, których zwarcie strony wtórnej prowadzi do awarii.

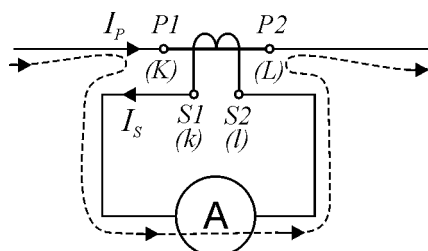
Należy pamiętać, że dla przekładnika prądowego sformułowanie „zwarcie strony wtórnej” **nie jest równoznaczne** ze sformulowaniem „stan zwarcia” (co jest prawdziwe dla innych rodzajów transformatorów). Dla przekładnika prądowego **stan zwarcia powstaje z chwilą rozwarcia strony wtórnej** ($S_2=\infty$), co może go uszkodzić.

3. Wymagania stawiane przekładnikom prądowym

3.1. Oznaczanie zacisków przekładnika prądowego

Przekładnik prądowy powinien mieć poprawnie oznaczone zaciski zgodnie z obowiązującymi normami [1, 2, 3]. Na rys.5 przedstawiono symbol graficzny [1] przekładnika prądowego z dołączonym amperomierzem. Norma [8] wprowadziła nowe obowiązujące obecnie oznaczenia w stosunku do wcześniej stosowanych [6, 7]. Zaciski uzwojenia pierwotnego oznaczane są $P1$ i $P2$ (ang. *Primary*), a uzwojenia wtórnego odpowiednio $S1$ i $S2$ (ang. *Secondary*). Dawniej stosowane oznaczenia, odpowiednio: K , L oraz k , l podano w na rys.5 w nawiasach. Zasada oznaczania zacisków przekładnika jest taka, że w **danej chwili zaciski początkowe $P1$ i $S1$ uzwojeń zawsze powinny mieć tę samą**

biegunowość [1]. Oznacza to jednocześnie, że gdy prąd I_p w uzwojeniu pierwotnym skierowany jest od $P1$ (K) do $P2$ (L) to prąd I_s w obwodzie wtórnym (np. w amperomierzu dołączonym do przekładnika) skierowany jest od $S1$ (k) do $S2$ (l). W obciążeniu przekładnika prąd płynie więc w tym samym kierunku, w którym płynąłby przy bezpośrednim jego włączeniu w obwód pierwotny, co schematycznie zaznaczono na rys.9. linią przerywaną. Jednocześnie warto zauważyć, że prądy płynące wewnątrz uzwojenia pierwotnego i wtórnego są skierowane w przeciwne strony, co jest oczywiście zgodne z ich przedstawieniem na wykresie wskazowym (rys.3).



Rys.9. Symbol graficzny przekładnika prądowego z poprawnie oznaczonymi zaciskami

Uwaga! W sprawozdaniu należy podawać obecnie obowiązujące oznaczenia, dodając w nawiasach oznaczenia stosowane wcześniej.

3.2. Dopuszczalne wartości błędów

Ze względu na zastosowanie przekładniki dzielą się na **przekładniki prądowe do pomiarów** (pomiarowe) i **przekładniki prądowe do zabezpieczeń** (zabezpieczeniowe) [1]. Przekładniki pomiarowe służą do zasilania przyrządów pomiarowych i są dokładniejsze od przekładników zabezpieczeniowych, które służą do zasilania przełączników zabezpieczających. Przekładniki zabezpieczeniowe są mniej dokładne, ale spełniają wymagania w zakresie błędu całkowitego w znacznie szerszym zakresie prądów, przekraczających nawet kilkadziesiąt razy wartości znamionowe, dzięki czemu zapewniają poprawną pracę zabezpieczeń w stanach przeciążeń i zwarć w sieci energetycznej. Natomiast przekładniki pomiarowe są co prawda dokładniejsze, ale tylko w wąskim zakresie prądów i już przy prądach niewiele większych od znamionowych wykazują duże ujemne wartości błędu prądowego, co skutecznie zabezpiecza dołączone do nich przyrządy pomiarowe przed uszkodzeniem podczas przeciążenia lub zwarcia w sieci energetycznej. Jest więc oczywiste, że **przekładniki pomiarowe i zabezpieczeniowe nie mogą być stosowane zamiennie**, nawet jeśli mają taką samą przekładnię znamionową i zbliżone wartości błędów granicznych.

Dla przekładników pomiarowych zdefiniowano 6 znormalizowanych [1] klas dokładności: 0,1-0,2-0,5-1-3-5. O zaliczeniu przekładnika do klasy dokładności 0,1...1 decydują zarówno błędy prądowe, jak i kątowe. Graniczne wartości tych błędów są zestawione w tab.1. Są one określone dla pracy przekładnika przy prądzie pierwotnym w przedziale 5...120% wartości znamionowej i dla obciążenia strony wtórnej o dowolnej wartości w przedziale od 25% do 100% obciążenia znamionowego.

Dla przekładników do specjalnych zastosowań, wymagających małych błędów już od wartości 1% prądu znamionowego, definiuje się klasy specjalne 0,2S i 0,5S. W tab.2 zestawiono wartości graniczne błędów dla tych klas.

Dla przekładników pomiarowych klas 3 i 5 nie określa się granicznych błędów kątowych, natomiast błędy prądowe przy obciążeniu od 50% do 100% obciążenia znamionowego nie powinny przekraczać wartości granicznych podanych w tab.3.

Pracę przekładnika pomiarowego przy prądach o wartościach większych niż 120% wartości prądu znamionowego określa znamionowy prąd bezpieczny przyrządu (I_{PL}) oraz współczynnik bezpieczeństwa przyrządu (FS).

Tab.1. Wartości graniczne błędów przekładników prądowych do pomiarów klasy od 0,1 do 1

Klasa dokładności	Procentowy błąd prądowy (przekładni) przy podanych poniżej w % wartościach prądu znamionowego, + lub -				Błąd kątowy przy podanych poniżej w % wartościach prądu znamionowego, + lub -							
					minuty				centyradiany			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tab.2. Wartości graniczne błędów przekładników prądowych do pomiarów klasy 0,2S i 0,5S

Klasa dokładności	Procentowy błąd prądowy (przekładni) przy podanych poniżej w % wartościach prądu znamionowego, + lub -					Błąd kątowy przy podanych poniżej w % wartościach prądu znamionowego, + lub -									
						minuty					centyradiany				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tab.3. Wartości graniczne błędów przekładników prądowych do pomiarów klasy 3 i 5

Klasa dokładności	Procentowy błąd prądowy (przekładni) przy podanych poniżej w % wartościach prądu znamionowego, + lub -	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Znamionowy prąd bezpieczny przyrządu (IPL) jest to taka wartość prądu pierwotnego, przy którym błąd całkowity przekładnika prądowego do pomiarów jest równy lub większy niż 10% przy obciążeniu znamionowym.

Współczynnik bezpieczeństwa przyrządu (FS) jest to stosunek znamionowego prądu bezpiecznego przyrządu do znamionowego prądu pierwotnego:

$$FS = \frac{IPL}{I_{pn}} \quad (14)$$

Starsze normy [5, 6, 7] definiowały w zbliżony sposób **liczbę przetężeń**. Odpowiednio skonstruowany przekładnik do pomiarów powinien mieć jak najmniejszy współczynnik bezpieczeństwa przyrządu, dzięki czemu dołączone do strony wtórnej przekładnika przyrządy pomiarowe są zabezpieczone przed uszkodzeniem w przypadku przepływu prądu zwarciovego sieci. Współczynnik bezpieczeństwa przyrządu nie powinien być większy niż 10, zaleca się aby był mniejszy od 5.

Dla przekładników do zabezpieczeń zdefiniowano dwie znormalizowane klasy dokładności: 5P i 10P [1]. Dodatkowo dla tych przekładników określa się **znamionowy prąd graniczny** I_{pgr} jako taką wartość skuteczną prądu pierwotnego, przy którym przekładnik spełnia wymagania w zakresie błędów całkowitych. Wprowadza się również **współczynnik graniczny dokładności** jako stosunek znamionowego granicznego prądu pierwotnego I_{pgr} do

znamionowego prądu pierwotnego I_{pn} . Współczynniki graniczne dokładności posiadają znormalizowane wartości: 5-10-15-20-30 [1]. Oznacza to, że odpowiednie typy przekładników do zabezpieczeń mogą spełniać wymagania klasy dokładności nawet przy 30-krotnym przekroczeniu prądu znamionowego, a więc znacznie więcej niż dla przekładników do pomiarów. Dla przekładników do zabezpieczeń przy obciążeniu znamionowym i znamionowej częstotliwości błędy prądowy, kątowy i całkowity nie powinny przekraczać wartości granicznych podanych w tab.4. Warto zauważyć, że graniczne wartości błędów dla przekładników zabezpieczeniowych są większe, ale muszą być spełnione w znacznie szerszym przedziale wartości prądu pierwotnego, niż dla przekładników pomiarowych.

Tab.4. Wartości graniczne błędów przekładników prądowych do zabezpieczeń klasy 5P i 10P

Klasa dokładności	Błąd prądowy; przy znamionowym prądzie pierwotnym, % + lub -	Błąd kątowy przy znamionowym prądzie pierwotnym, + lub -		Błąd całkowity przy znamionowym prądzie granicznym pierwotnym %
		minuty	centyradiany	
5 P	1	60	1,8	5
10 P	3	—	—	10

3.3. Dopuszczalne przyrosty temperatury i odporność na przeciążenia

Podczas normalnej pracy występujące w uzwojeniach i rdzeniu przekładnika straty mocy podwyższają jego temperaturę, co niekorzystnie wpływa na stan izolacji i po pewnym czasie może spowodować awarię. Z tego względu definiuje się dopuszczalne przyrosty temperatury uzwojeń przekładnika dla określonych wartości prądu. **Znamionowy długotrwały prąd cieplny** jest to taka wartość prądu pierwotnego, który płynąc dowolnie długo nie spowoduje większych przyrostów temperatury od podanych w tab.5. Jeśli nie określono inaczej, znamionowym długotrwałym prądem cieplnym jest znamionowy prąd pierwotny.

Podczas przeciążeń i zwarć w sieci pojawiają się krótkotrwałe prądy o znacznych wartościach. Dlatego producent powinien również określić **znamionowy krótkotrwały prąd cieplny I_{th}** , jako taką wartość skuteczną prądu pierwotnego, którą przekładnik ze zwartymi uzwojeniami wtórnymi powinien wytrzymać bez uszkodzenia w ciągu jednej sekundy. Odporność na prądy zwarciovowe opisuje **znamionowy prąd dynamiczny I_{dyn}** , który jest wartością szczytową prądu pierwotnego, którą przekładnik ze zwartymi uzwojeniami wtórnymi powinien wytrzymać bez uszkodzenia elektrycznego lub mechanicznego w wyniku działania sił elektromagnetycznych. Znamionowy prąd dynamiczny I_{dyn} , powinien być co najmniej 2,5 raza większy od znamionowego krótkotrwałego prądu cieplnego I_{th} .

Tab.5. Dopuszczalne przyrosty temperatur uzwojeń przekładnika prądowego

Klasa izolacji (wg IEC 85)	Dopuszczalne przyrosty temperatury (K)
Izolacja wszystkich klas nasycona olejem	60
Izolacja wszystkich klas nasycona olejem i zamknięta hermetycznie	65
Izolacja wszystkich klas nasycona masą bitumiczną	50
Nie nasycona olejem lub masą bitumiczną izolacja klasy:	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135

3.4. Oznaczenia na tabliczce znamionowej przekładnika

Wszystkie przekładniki prądowe powinny mieć co najmniej następujące oznaczenia:

- nazwę wytwórcy lub inny znak, za pomocą którego przekładnik może być łatwo zidentyfikowany;
- numer seryjny lub oznaczenie typu, (najlepiej obydwie oznakowania);
- znamionowe prądy pierwotny i wtórny w postaci:

$$K_n = I_{pn}/I_{sn} \text{ A (np. } K_n = 100/5\text{A)}$$

- częstotliwość znamionową (np. 50 Hz);
- moc znamionową i odpowiadającą jej klasę dokładności łącznie z informacjami podanymi w dalszych częściach;
 UWAGA - Gdy jest to potrzebne, zaleca się oznaczać rodzaj uzwojenia wtórnego (np. 1S, 15 VA, klasa.0,5; 2S, 30 VA, klasa. 1).
- najwyższe napięcie urządzenia (np. 1,2 kV lub 145 kV);
- znamionowy poziom izolacji (np. 6/- kV lub 275/650 kV).
 UWAGA – Oznaczenia podane w f) i g) mogą być połączone w jedno (np. 1,2/6/- kV lub 145/275/650 kV).

Wszystkie oznaczenia powinny być wykonane w trwały sposób na przekładniku lub na tabliczce znamionowej, trwale przymocowanej do przekładnika.

Dodatkowo (jeśli jest miejsce) powinny być podane następujące informacje:

- znamionowy krótkotrwały prąd cieplny (I_{th}) i znamionowy prąd dynamiczny I_{dyn} , jeżeli jest inny niż 2,5-krotny prąd I_{th} (np. 13 kA lub 13/40 kA);
- klasa izolacji, jeżeli jest inna niż klasa A;
 UWAGA - Gdy zastosowano materiały izolacyjne różnych klas, zaleca się podać tę, która ogranicza dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń.
- w przekładnikach o więcej niż jednym uzwojeniu wtórnym, przeznaczenie każdego uzwojenia i odpowiadające mu zaciski.

Należy zwrócić uwagę, że przekładnię podaje w postaci ułamka zwykłego, jako stosunku znamionowego prądu pierwotnego do znamionowego prądu wtórnego. Nie wolno tego ułamka matematycznie upraszczać, np.: $25/5 = 5$, gdyż dwa przekładniki, dla przykładu: 25/5 oraz 5/1 zmniejszają tyle samo, tzn. pięciokrotnie prąd pierwotny, ale mają inne prądy znamionowe, a więc nie mogą być stosowane zamiennie!

4. Metody badań przekładników prądowych

4.1. Klasyfikacja badań

Badania przekładników prądowych dzielą się na próby typu, wyrobu i próby specjalne [1]. **Próby typu** są wykonywane na przekładniku każdego typu w celu stwierdzenia, że wszystkie przekładniki wyprodukowane wg tej samej dokumentacji technicznej spełniają wymagania nie objęte próbami wyrobu. **Próby wyrobu** wykonywane są na każdym wyprodukowanym przekładniku. **Próby specjalne** są to próby inne niż próby typu lub próby wyrobu, uzgodnione między wytwórcą a zamawiającym.

Do prób typu zalicza się:

- próby prądem krótkotrwałym,
- próbę nagrzewania,
- próbę napięciem udarowym piorunowym,
- próbę napięciem udarowym łączeniowym,
- próby napięciowe na mokro przekładników napowietrznych,
- sprawdzanie dokładności.

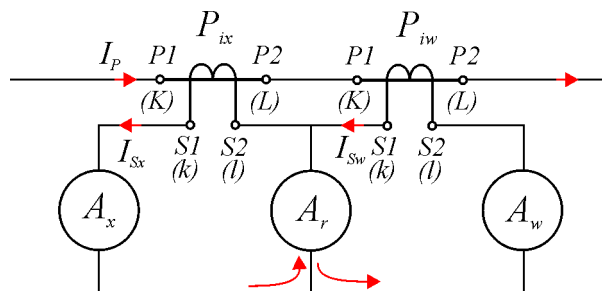
Do prób wyrobu zalicza się:

- sprawdzenie oznaczeń zacisków,

- b) próbę izolacji uzwojeń wtórnych napięciem o częstotliwości sieciowej,
- c) próbę izolacji między sekcjami uzwojeń napięciem o częstotliwości sieciowej,
- d) próbę izolacji międzyzwojowej,
- e) próbę izolacji uzwojenia pierwotnego napięciem o częstotliwości sieciowej,
- f) pomiar wyładowań niezupełnych,
- g) sprawdzenie dokładności.

4.2. Sprawdzenie oznaczeń zacisków

Kolejność oznaczeń zacisków uzwojenia pierwotnego ($P1, P2$) i uzwojenia wtórnego ($S1, S2$) można sprawdzać w różnych układach, przy prądzie stałym lub przemiennym. Najczęściej sprawdza się kolejność oznaczeń badanego przekładnika P_{ix} przez porównanie z przekładnikiem wzorcowym P_{iw} o sprawdzonej, prawidłowej kolejności. Jeden z układów opartych na tej zasadzie jest przedstawiony na rys.10.



Rys.10. Układ do sprawdzania prawidłowości oznaczeń zacisków przekładnika

Jeżeli zaciski są oznaczone prawidłowo, rozptyw prądów przebiega jak na rysunku i amperomierz środkowy (różnicowy) A_r wskazuje różnicę prądów, odczytywanych na amperomierzach A_x i A_w . Przy nieprawidłowym oznaczeniu zacisków amperomierz A_r wskaże sumę prądów. Zalecane jest, aby oba przekładniki miały tę samą przekładnię, ale nie jest to niezbędne.

4.3. Sprawdzenie wytrzymałości izolacji

Wytrzymałość izolacji jest bardzo ważnym parametrem przekładników prądowych, gdyż poza umożliwieniem pomiarów dużych prądów, drugą nie mniej ważną ich cechą jest możliwość pomiarów prądów w obwodach znajdujących się pod wysokim napięciem.

Sprawdzenie wytrzymałości izolacji uzwojenia pierwotnego przeprowadza się przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50Hz, oraz przy napięciu udarowym. Napięcie probiercze o wartości określonej przez normę zależne od napięcia znamionowego izolacji, przykładą się między zwarte zaciski uzwojenia pierwotnego a zwarte i połączone z obudową metalową zaciski uzwojenia wtórnego. Napięcie to powinien przekładnik wytrzymać bez przebicia i przeskoku. Izolacja uzwojenia wtórnego również podlega próbie, napięciem 2 kV przy prądzie znamionowym równym 5A i więcej, albo 4 kV przy prądzie wtórnym znamionowym 2 A i 1 A.

Sprawdzenie izolacji międzyzwojowej polega na wytworzeniu znacznego napięcia między sąsiednimi zwojami uzwojenia pierwotnego, jak i wtórnego, poprzez zaindukowanie w tych uzwojeniach dużych sił elektromotorycznych. Osiąga się to przez przepuszczenie przez jedno z uzwojeń prądu równego 1,5 prądu znamionowego tego uzwojenia, przy pozostałych uzwojeniach **otwartych**. Cały przepuszczany prąd staje się wtedy prądem jałowym, o dużej składowej magnesującej, stąd w rdzeniu przekładnika powstaje duży strumień, indukujący we wszystkich zwojach dużą siłę elektromotoryczną. Próba ta powinna trwać jedną minutę. Należy pamiętać, że jest to stan pracy bardzo niekorzystny dla przekładnika (patrz p.2.3), który może zostać w ten sposób trwale uszkodzony.

4.4. Sprawdzenie klasy dokładności

Sprawdzenie klasy dokładności polega na pomiarze błędów prądowych i kątowych przekładnika dla określonych przez normę [1] wartości prądów i obciążeń, przy częstotliwości znamionowej i współczynniku mocy indukcyjnym równym 0,8. Pomiar wykonuje się za pomocą układów kompensacyjnych prądu przemiennego, stosując wzorcowy przekładnik o jednakowej przekładni znamionowej z przekładnikiem badanym. Wzór definicyjny dla błędu prądowego przybierze wówczas postać:

$$\delta_i = \frac{K_n I_{sx} - K_n I_{sw}}{K_n I_{sw}} \cdot 100\% = \frac{I_{sx} - I_{sw}}{I_{sw}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

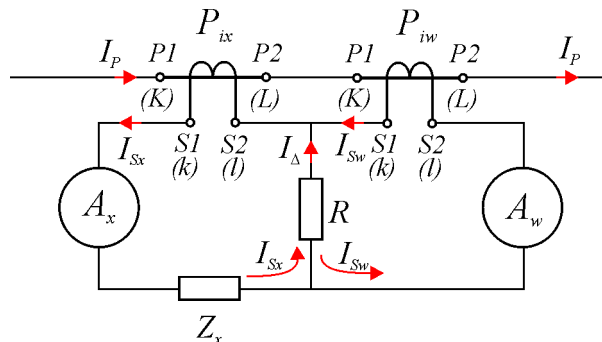
gdzie: I_{sx}, I_{sw} - prądy wtórne przekładników badanego i wzorcowego.

Pomiar błędów przekładnika badanego sprowadza się zatem do wyznaczenia różnicy wartości i fazy prądów wtórnych. Jeżeli błędy przekładnika wzorcowego nie są pomijalne, należy je dodawać do otrzymanych z pomiarów błędów przekładnika badanego.

Dużą dokładność pomiaru różnicy prądów wtórnych osiąga się w układzie różnicowym, którego zasadę wyjaśnia rys.11. Przez opornik R płynie różnica geometryczna prądów wtórnych, równa

$$\underline{I}_{\Delta} = \underline{I}_{sx} - \underline{I}_{sw}, \quad (16)$$

którą można uznać za równą wektorowi prądu jałowego I_0 na wykresie wskazowym z rys.3. Składowe ortogonalne tej różnicy określają błąd prądowy i kątowy przekładnika. Pomiar jest wykonany w układzie kompensacyjnym [10].



Rys.11. Schemat układ różnicowego do wyznaczania błędów przekładnika prądowego

Najprostsze wyznaczenie błędu prądowego, możliwe przy badaniu przekładnika klasy 3 i 5, polega bezpośrednio na pomiarze prądów wtórnych przekładnika badanego i wzorcowego amperomierzami klasy 0,5 lub 0,2.

4.5. Sprawdzenie współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS

Sprawdzenie współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS jest możliwe w układzie z rys.11 po podłączeniu amperomierza A_r w miejsce opornika R . Błąd całkowity δ_c w tym układzie jest równy:

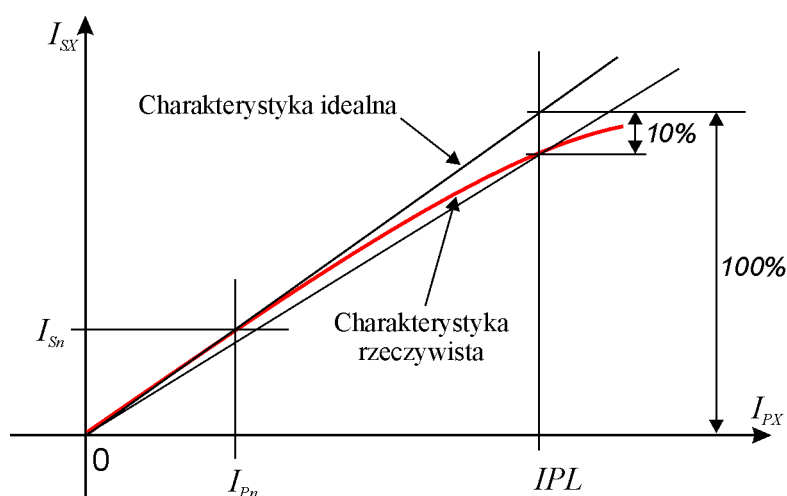
$$\delta_c = \frac{I_{\Delta}}{I_{sw}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

W celu wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS należy prąd I_p zwiększać tak długo, aż błąd całkowity δ_c osiągnie 10%, tzn. wskazania amperomierza różnicowego A_r osiągną 10% wskazania amperomierza A_w , który będzie wtedy wskazywał

znamionowy prąd bezpieczny przyrządu IPL . Współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS jest wtedy równy:

$$FS = \frac{IPL}{I_{pn}} = \frac{I_{sw} K_n}{I_{pn}} \cdot 100\% . \quad (18)$$

Można również wyznaczyć współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS metodą graficzną na podstawie wykresu prądu wtórnego I_s badanego przekładnika w funkcji prądu pierwotnego I_p . Zasadę postępowania przedstawiono na rys.12. Idealna charakterystyka jest linią prostą o współczynniku kierunkowym równym odwrotności z przekładni znamionowej K_{nx} . Charakterystyka rzeczywista początkowo pokrywa się z idealną, a dla większych prądów leży poniżej niej (błędy mają wartości ujemne). Należy wykreślić linię pomocniczą o współczynniku kierunkowym mniejszym o 10% od współczynnika kierunkowego charakterystyki idealnej i w punkcie przecięcia z charakterystyką rzeczywistą odczytać wartość znamionowego prądu bezpiecznego przyrządu IPL i podstawić do (14).

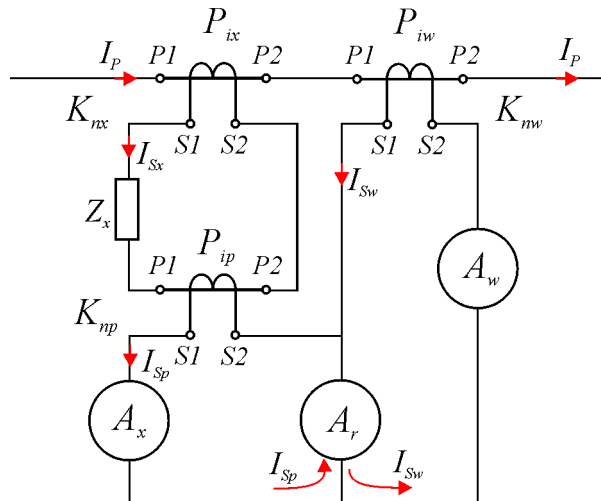


Rys.12. Sposób wyznaczenia znamionowego prądu bezpiecznego przyrządu (IPL)

W praktyce prądy wtórne przy wyznaczaniu współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS są zwykle zbyt duże i amperomierz A_x jest włączany w obwód wtórny za pośrednictwem pomocniczego przekładnika o przekładni K_{np} , zaś przekładnik wzorcowy P_{iw} dobiera się o większej przekładni, równej:

$$K_{nw} = K_{nx} K_{np} . \quad (19)$$

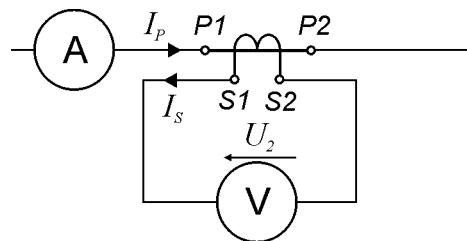
Wtedy prądy wtórne przekładnika wzorcowego i przekładnika pomocniczego powinny być sobie równe i można je odejmować w amperomierzu różnicowym A_r . Układ taki jest pokazany na rys.13. Wskazania amperomierzy A_x i A_w umożliwiają również zastosowanie metody graficznej wg. rys.12. Należy zauważyć, że badany przekładnik P_{ix} obciążony jest znamionowo impedancją Z_x włączoną w jego obwód wtórny.



Rys.13. Schemat układ różnicowego do wyznaczania współczynnika bezpieczeństwa przyrządu (FS)

4.6. Wyznaczanie charakterystyki magnesowania

Wyznaczanie charakterystyki magnesowania przekładnika prądowego przeprowadza się w układzie przedstawionym na rys.14. Należy zwrócić uwagę, że nie jest możliwe wyznaczenie charakterystyki magnesowania w postaci $B=f(H)$, gdyż natężenie pola magnetycznego H i indukcja B nie są dostępne do bezpośrednich pomiarów. Korzystamy z faktu, że natężenie pola magnetycznego H jest proporcjonalne do prądu magnesującego I_{μ} przepływającego przez uzwojenie pierwotne przekładnika, a siła elektromotoryczna E_s indukowana w uzwojeniu wtórnym przekładnika jest proporcjonalna do indukcji magnetycznej B . Przyjmujemy, że w układzie przedstawionym na rys.14 prąd magnesujący jest równy prądowi pierwotnemu I_p , a siła elektromotoryczna równa jest napięciu U_2 w obwodzie wtórnym.

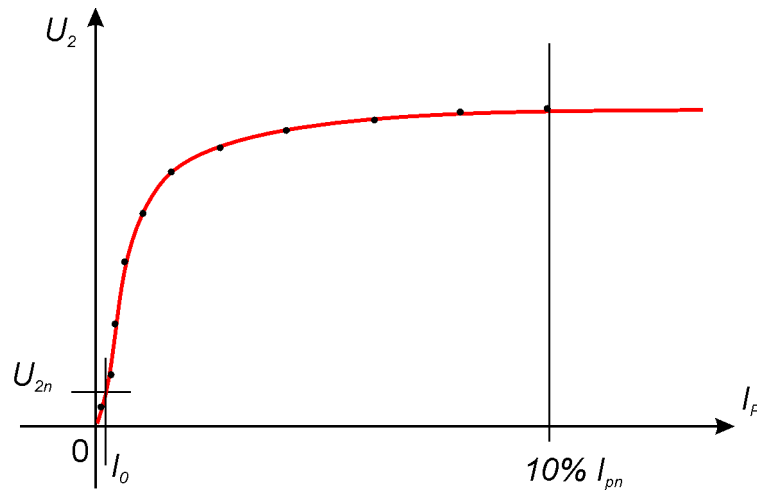


Rys.14. Schemat układu do wyznaczania charakterystyki magnesowania przekładnika prądowego

Na podstawie pomiarów można wykreślić charakterystykę magnesowania jako funkcję $U_2=f(I_p)$ w postaci przedstawionej na rys.15. Pomiary można wykonywać tylko do wartości prądu ok. 10% I_{pn} , gdyż przekładnik pracuje z rozwartą stroną wtórną i może ulec uszkodzeniu przy większych prądach (patrz p. 2.3).

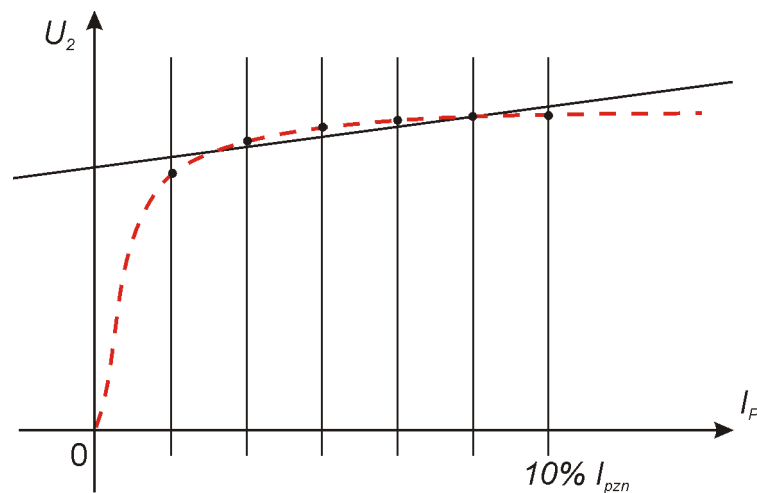
Po wykreśleniu charakterystyki jest możliwe wyznaczenie znamionowego prądu jałowego pierwotnego I_0 przekładnika, jako prądu potrzebnego do zaindukowania w uzwojeniu wtórnym napięcia równego znamionowemu spadkowi napięcia na obciążeniu przekładnika U_{2n} (pomijamy przy tym wewnętrzny spadek napięcia na uzwojeniu wtórnym). Znamionowy spadek napięcia na obciążeniu przekładnika U_{2n} wyznaczamy na podstawie znamionowej mocy pozornej przekładnika S_{2n} i jego znamionowego prądu wtórnego I_{sn} :

$$U_{2n} = \frac{S_{2n}}{I_{sn}} \quad (20)$$



Rys.15. Charakterystyka magnesowania przekładnika prądowego z zaznaczonym prądem jałowym I_0

Wyznaczając charakterystykę magnesowania przedstawioną na rys. 15 należy zwrócić uwagę, że jest ona bardzo nieliniowa w początkowej części. Należy więc tak zagęścić pomiary dla małych wartości prądów, aby uzyskać punkty pomiarowe rozmieszczone **równomiernie wzdłuż charakterystyki magnesowania**. Niewłaściwe jest wykonanie pomiarów z równomiernie narastającymi wartościami prądu, gdyż często prowadzi to do uzyskania błędnej postaci wykresu, przykładowo przedstawionego na rys.16 w postaci linii prostej. Jest to bardzo częsty błąd popełniany w laboratorium.



Rys.16. Przykład błędnie wyznaczonej charakterystyka magnesowania przekładnika prądowego

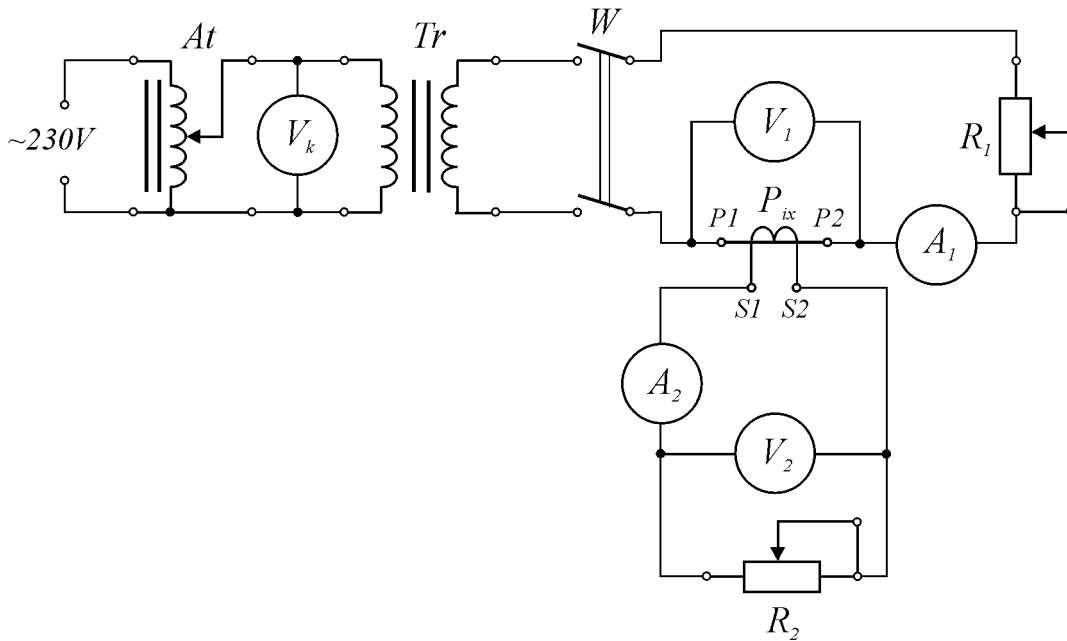
5. Inne urządzenia spełniające funkcje przekładników prądowych

Klasyczne przekładniki prądowe posiadają liczne wady, z których do najważniejszej należy zaliczyć fakt, że działają one poprawnie tylko dla prądów przemiennych. Dlatego opracowano również inne urządzenia spełniające podobne funkcje, ale działające również przy prądach stałych. Do najbardziej znanych można zaliczyć **transduktory** i przetworniki **hallotronowe** (do najpopularniejszych należą produkty szwajcarskiej firmy LEM Norma GmbH). W elektronicznych układach pomiarowych często są również wykorzystywane **transreaktory**, które jednak wprowadzają przesunięcie fazowe równe 90 stopni, a więc nie nadają się do stosowania np. przy pomiarach mocy i energii. Znane są również układy wykorzystujące do pomiaru prądu **cewki Rogowskiego**. Więcej informacji na te tematy można znaleźć w literaturze [9, 10, 11].

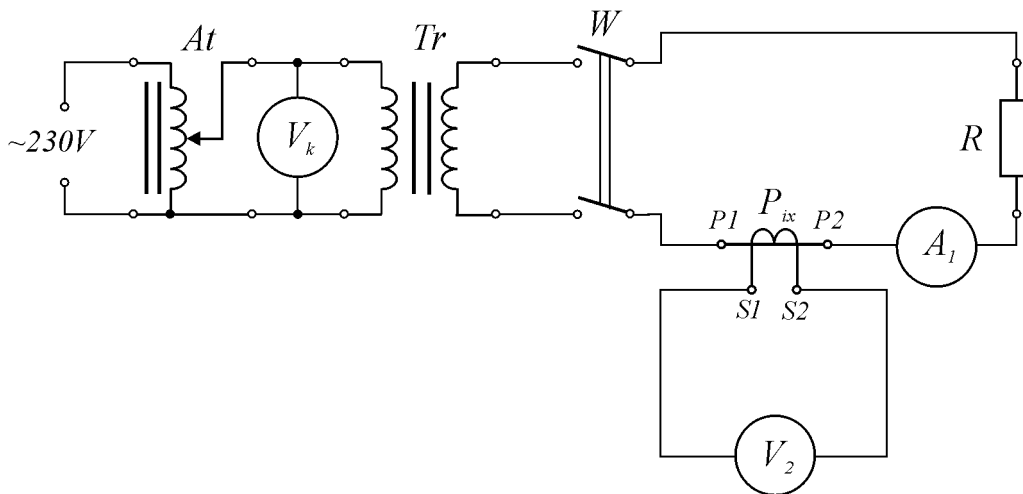
6. Wykonanie ćwiczenia

6.1. Układy połączeń

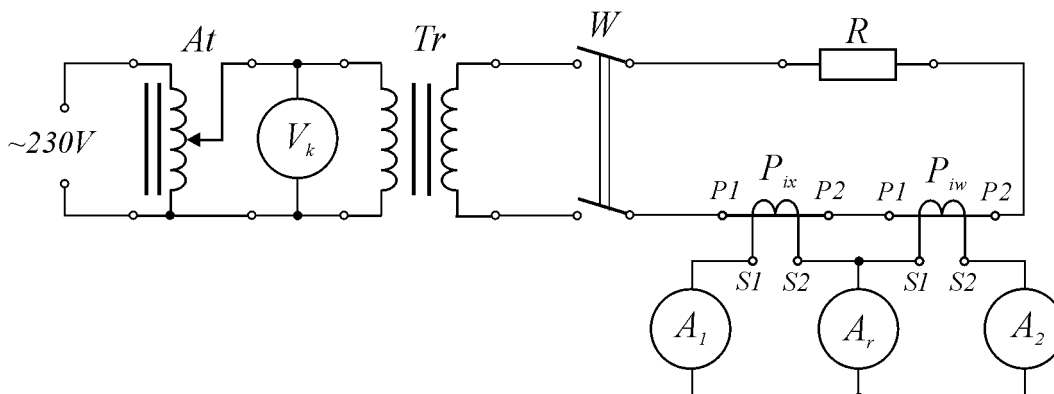
6.1.1. Badanie wpływu obciążenia przekładnika prądowego na jego pracę

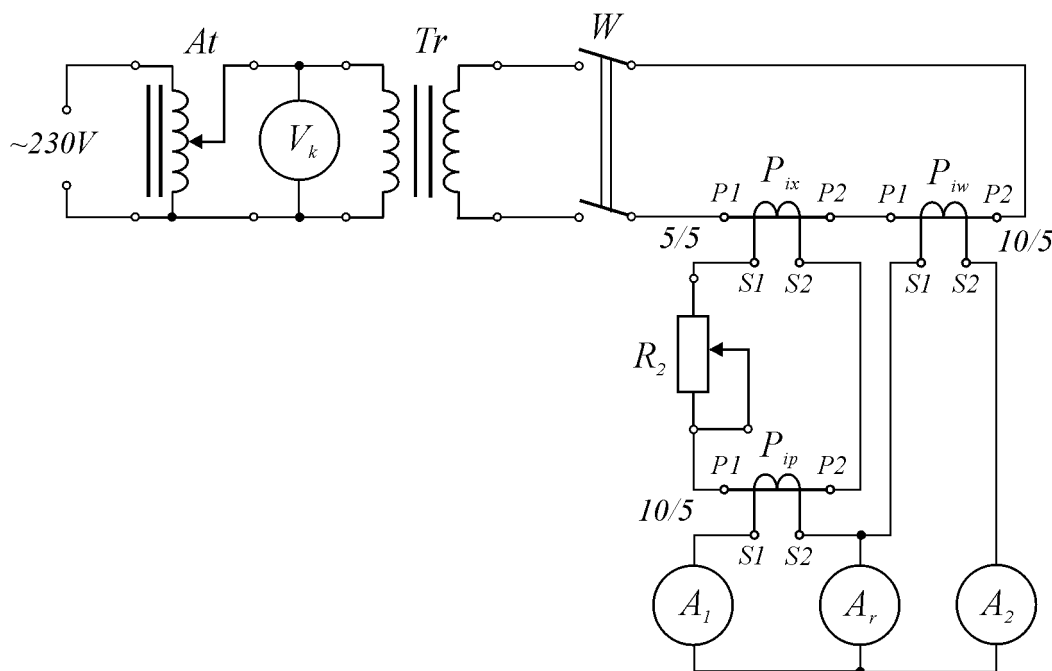


6.1.2. Wyznaczanie charakterystyki magnesowania



6.1.3. Sprawdzanie prawidłowości oznaczeń



6.1.4. Wyznaczanie współczynnika bezpieczeństwa przyrządu (FS)

Oznaczenia zastosowane na schematach:

P_{ix} - przekładnik badany

P_{iw} - przekładnik wzorcowy

P_{ip} - przekładnik pomocniczy

A_1 - amperomierz

A_2 - amperomierz

A_r - amperomierz mierzący prąd różnicowy

V_1 - woltomierz

V_2 - woltomierz

V_k - woltomierz kontrolny

At - autotransformator

Tr - transformator

R_1 - opornik suwakowy

R_2 - opornik suwakowy

W - łącznik dwubiegunowy

Uwagi.

- W czasie ćwiczenia **przed rozpoczęciem pomiarów** należy wpisać obok oznaczeń użytych przyrządów ich charakterystykę techniczną. Należy bezwzględnie **na każdym** stosowanym w ćwiczeniu przyrządzie odszukać jego tabliczkę znamionową (lub dołączoną dokumentację techniczną) i przepisać **wszystkie** dostępne informacje, również w postaci symboli graficznych. Ze szczególną uwagą należy zapoznać się z danymi technicznymi badanego przekładnika.

- Początkowy fragment obwodu zasilania we wszystkich punktach jest podobny, nie należy go rozłączać, aż do łącznika W .

- Na czas wykonywania jakichkolwiek zmian połączeń w układzie pomiarowym należy bezwzględnie **wyłączać** zasilanie otwierając łącznik W i **odłączać** układ od sieci zasilającej poprzez wyjęcie z gniazdka sieciowego wtyczki autotransformatora At .

6.2. Wykonanie pomiarów

6.2.1. Badanie wpływu obciążenia przekładnika na jego pracę

Zbadać wpływ obciążenia przekładnika na wartość prądu wtórnego, spadki napięcia w obwodzie pierwotnym i wtórnym oraz błąd prądowy, stosując układ połączeń 6.1.1. Zwrócić uwagę na odpowiednie dołączenie suwaka rezystora R_2 , zgodnie z uwagą w p. 2.3. Obciążenie nastawiać na rezystorze R_2 w 5 punktach, od 0 do $1/2 R_{2max}$. Utrzymywać stałą wartość prądu pierwotnego $I_p = I_{pn}$, regulując odpowiednio autotransformatorem At i rezystorem R_1 . W tabeli zestawić otrzymane wartości I_p , I_s , U_1 , U_2 oraz wartości obliczone R_2 , S_2 , S_2/S_{2n} , Δ_i , δ_i . Założyć, że amperomierz posiada tylko rezystancję o wartości 0,1 Ω .

W sprawozdaniu wykonać wykresy: $I_p = f(S_2/S_{2n})$, $I_s = f(S_2/S_{2n})$, $U_1 = f(S_2/S_{2n})$, $U_2 = f(S_2/S_{2n})$, $\Delta_i = f(S_2/S_{2n})$, $\delta_i = f(S_2/S_{2n})$. Przedyskutować dokładność wyznaczenia Δ_i . Stosunek S_2/S_{2n} należy przedstawić w tabeli i na wykresie w procentach.

Uwaga: ponieważ błędy przekładnika mają małą wartość (co wynika z jego klasy), to zmiany prądu wtórnego podczas tych pomiarów będą niewielkie. Dlatego poprawne wykonanie tego punktu wymaga przestrzegania kilku poniższych zasad:

- dobrać zakresy amperomierzy tak, aby ich wskazania były jak najbliższe zakresowi,
- przed każdym pomiarem należy ustawić wskazania amperomierza A_1 precyzyjnie na działkę odpowiadającą wartości prądu I_{pn} ,
- wskazania amperomierza A_2 należy odczytywać precyzyjnie z rozdzielczością $1/5$ działki i nie wolno ich bardziej zaokrąglić,
- za pomocą woltomierza V_k kontrolować napięcie podawane na transformator Tr i nie przekraczać jego wartości znamionowej.

Tab.6. Wyniki pomiarów i obliczeń z badania wpływu obciążenia przekładnika na jego pracę

lp	Nastawy			Odczyty				Obliczenia					
	U_k	$I_1 = I_p$		U_1	$I_2 = I_s$		U_2	R_2	S_2	S_{2n}	S_2/S_{2n}	Δ_i	δ_i
	V	dz	A	V	dz	A	V	Ω	VA	VA	%	A	%
1													
2													
3													
4													
5													

6.2.2. Wyznaczanie charakterystyki magnesowania przekładnika prądowego

Wyznaczyć charakterystykę magnesowania badanego przekładnika, stosując układ połączeń 6.1.2. Dobierając amperomierz należy zastanowić się, jakie wartości prądu pierwotnego będą na nim nastawiane? Napięcie na rozwartych zaciskach wtórnych przekładnika należy zmierzyć przy prądzie pierwotnym w granicach $0 \div 10\% I_{pn}$. Pomiary należy zacząć od zerowej wartości prądu pierwotnego a następnie notować wyniki:

- do 1% I_{pn} co 0,2%,
- do 4% I_{pn} co 0,5%
- do 10% I_{pn} co 2%.

Uwagi.

- Po wykonaniu pomiarów należy od razu przeanalizować tabelkę z wynikami i sprawdzić, czy obejmuje ona wartość znamionowego spadku napięcia na obciążeniu i w razie potrzeby wykonać dodatkowe pomiary.

- Po wykreśleniu charakterystyki należy wyznaczyć znamionowy prąd jałowy pierwotny przekładnika według opisu w p.4.6 (rys.15). Dla dokładnego odczytu może się okazać konieczne wykonanie dodatkowego wykresu obejmującego w powiększeniu początkową część charakterystyki.

- Należy pamiętać, że charakterystyka magnesowania zawsze **rozpoczyna się w początku układu współrzędnych** i jest silnie nieliniowa.

- Podczas pomiarów będzie konieczna zmiana zakresu pomiarowego amperomierza, dlatego dla uniknięcia pomyłki przy odczycie jego wskazań, w tabelce należy zapisywać aktualną stałą amperomierza (w A/dz) i wskazanie w działkach.

Tab.7. Wyniki pomiarów charakterystyki magnesowania przekładnika prądowego

lp	Nastawy						Odczyty		U_{2n}	I_0
	U_k	I_{pn}	I_p/I_{pn}	$I_1=I_p$			U_2			
	V	A	%	A/dz	dz	A	dz	V		
1										
2										

dobrać odpowiednią liczbę wierszy

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.2.3. Sprawdzanie prawidłowości oznaczeń zacisków przekładnika prądowego

Sprawdzić prawidłowość oznaczeń zacisków przekładnika badanego przez porównanie z oznaczeniami przekładnika wzorcowego w układzie 6.1.3. Sprawdzić, czy po zmianie zacisków $S1S2$ przekładnika badanego amperomierz A_r wskaże inną wartość prądu? W tabeli należy zamieścić otrzymane wartości prądów A_1, A_2, A_r z obu pomiarów oraz wartości prądu wyliczone z różnicy i sumy wskazań amperomierzy A_1 i A_2 .

Tab.8. Wyniki sprawdzenia poprawności oznaczeń zacisków przekładnika prądowego

lp	Nastawy			Odczyty	Obliczenia		Wniosek
	U_k	I_1	I_2	I_r	I_1+I_2	I_1-I_2	
	V	A	A	A	A	A	
1							
2							

6.2.4. Wyznaczanie współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS

Wyznaczyć współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS dla badanego przekładnika w układzie 6.1.4. Na podstawie opisu w p.4.5 wykonać pomiary i wyznaczyć charakterystykę $I_{Sx}=f(I_{Px})$ w zakresie $I_{Px}=(0\div 200\%)I_{Pxn}$ co 20% I_{Pxn} . Procedura postępowania opisana jest w p.4.5.

Podczas pomiarów badany przekładnik należy obciążyć opornikiem suwakowym R_2 nastawionym na ok. $1\ \Omega$. Jest to wartość przewyższająca wielokrotnie znamionowe obciążenie przekładnika, w celu obniżenia wartości prądu bezpiecznego przyrządu IPL do wartości łatwej do zmierzenia w laboratorium dydaktycznym.

Uwaga: wykonywać pomiary możliwie krótko, aby uniknąć uszkodzenia przeciążanego przekładnika P_{ix} .

Z wykresu $I_{Sx}=f(I_{Px})$ wyznaczyć metodą graficzną wartość znamionowego prądu bezpiecznego przyrządu IPL i na jego podstawie obliczyć współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS (p.4.5, rys.12).

Tab.9. Wyniki pomiarów do wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS

lp	Nastawy				Odczyty		Obliczenia				Obliczenia porównawcze				Z wykresu	
	U_k	R_2	I_{Px}/I_{Pxn}	I_2	I_1	I_r	I_{Px}	I_{Sx}	Δ_{ix}	δ_{ix}	I_r/I_2	S_2	S_{2n}	S_2/S_{2n}	IPL	FS
	V	Ω	%	A	A	A	A	A	A	%	%	VA	VA	%	A	%
1																
2																

dobrać odpowiednią liczbę wierszy

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.3. Opracowanie wyników pomiarów i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić opis stanowiska pomiarowego oraz w punktach kolejno zrealizowane zadania pomiarowe podając: temat zadania pomiarowego, schemat układu pomiarowego, wykaz przyrządów, tabelkę z wynikami pomiarów i obliczeń, niezbędne wzory obliczeniowe, przykładowe obliczenia, wykresy przewidziane programem ćwiczenia.

We wnioskach należy przedstawić własne uwagi na temat zrealizowanych pomiarów, napotkane trudności, ocenę uzyskanych wyników, a w szczególności ustosunkować się do następujących zagadnień:

- jakie oznaczenia znajdują się na przekładniku ?
- czy przekładnik posiada naniesione oznaczenia zgodnie z normą ?
- czy błąd prądowy zmieniał swoją wartość przy zmianie obciążenia przekładnika ?
- czy wyznaczone wartości błędu prądowego odpowiadają klasie oznaczonej na przekładniku ?
- jak duże było obciążenie przekładnika w stosunku do obciążenia znamionowego ?
- czy zaobserwowaną nieliniowość charakterystyki magnesowania przekładnika ?
- ile wynosi znamionowy prąd jałowy przekładnika i czy jego wartość jest zgodna z błędem prądowym przekładnika ?
- czy badany przekładnik posiada prawidłowo oznaczone zaciski ?
- ile wynosi znamionowy prąd bezpieczny przyrządu *IPL* ?
- ile wynosi współczynnik bezpieczeństwa przyrządu *FS* ?
- jaka moc była pobierana z badanego przekładnika przy wyznaczeniu współczynnika *FS* ?

7. Pytania kontrolne

1. W jakim celu stosuje się przekładniki prądowe ?
2. Jak zbudowany jest przekładnik prądowy ?
3. Jaka jest zasada działania przekładnika prądowego ?
4. Jakie przekładnie definiuje się dla przekładnika prądowego?
5. Co to jest poprawka zwojowa ?
6. Omów schemat zastępczy przekładnika prądowego.
7. Omów wykres wskazowy przekładnika prądowego.
8. Jakie błędy definiuje się dla przekładnika prądowego ?
9. Co to jest centyradian ?
10. Omów charakterystykę magnesowania przekładnika prądowego?
11. Czy zwarcie strony wtórnej jest bezpieczne dla przekładnika prądowego i dlaczego ?
12. Czy wolno rozewrzeć obwód wtórny przekładnika prądowego i dlaczego ?
13. Jaka jest zasada oznaczania zacisków przekładnika prądowego ?
14. W jakim celu uziemia się stronę wtórną przekładnika prądowego ?
15. W jaki sposób definiuje się klasy przekładników prądowych ?
16. Wyjaśnij różnice pomiędzy przekładnikami pomiarowymi i zabezpieczeniowymi.
17. W jaki sposób określa się wymagania na pracę w stanie przeciążenia przekładnika ?
18. Jak sprawdzić poprawność oznaczeń zacisków przekładnika prądowego /
19. Jak wyznaczyć współczynnik bezpieczeństwa przyrządu *FS* ?
20. Jak wyznaczyć znamionowy prąd jałowy przekładnika prądowego ?

8. Literatura

1. PN-EN 60044-1:2000. Przekładniki-Przekładniki prądowe. Wprowadza: EN 60044-1:1999, zastępuje: PN-IEC 185:1994.
2. PN-EN 60044-1:2000/A1:2003. Przekładniki-Część 1: Przekładniki prądowe. Wprowadza: EN 60044-1:1999/A1:2000.
3. PN-EN 60044-1:2000/A2:2004. Przekładniki-Przekładniki prądowe. Wprowadza: EN 60044-1:1999/A2:2003.

4. PN-EN 60044-8:2006. Przekładniki-Część 8: Przekładniki prądowe elektroniczne. Wprowadza: EN 60044-8:2002, zastępuje: PN-EN 60044-8:2003.
5. PN-E-04201:1965. Przekładniki prądowe-Badania zwarciove. Norma wycofana zastąpiona przez PN-E-06552:1971.
6. PN-E-06552:1971. Przekładniki prądowe-Ogólne wymagania i badania. Norma wycofana zastąpiona przez PN-E-06552:1984, zastępuje: PN-E-04201:1965 | BN-67/5564-01.
7. PN-E-06552:1984. Przekładniki prądowe. Norma wycofana zastąpiona przez PN-IEC 185:1994, zastępuje: PN-E-06552:1971.
8. PN-IEC 185:1994. Przekładniki prądowe. Norma wycofana zastąpiona przez PN-EN 60044-1:2000. Wprowadza: IEC 60185:1987/A1:1990, IEC 60185:1987, zastępuje: PN-E-06552:1984.
9. Chwaleba A. i inni, Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 2009.
10. A. Koszmider , J. Olak , Z. Piotrowski, Przekładniki prądowe, WNT, Warszawa 1985.
11. Isolated current and voltage transducers characteristics-applications-calculations, LEM Know-How, (CH24101E.pdf). LEM NORMA GmbH, Austria, <http://www.lem.com/>