

## ĆWICZENIE NR 5

# BADANIE ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH ZEROWO-PRĄDOWYCH

## 1. WPROWADZENIE

Metoda składowych symetrycznych, która rozwinęła się na początku 20 wieku, stanowi praktyczne narzędzie wykorzystywane do wyjaśniania i analizy niesymetrycznych stanów pracy systemu elektroenergetycznego. Wiele zabezpieczeń wykrywa rodzaj zakłócenia (np. zwarcia międzyfazowe 3-faz, 2-faz, zwarcia doziemne, przerwy w fazach itp.) na podstawie detekcji składowych symetrycznych zawartych w doprowadzonych do nich sygnałach wejściowych.

Dowolny niesymetryczny układ napięć lub prądów trójfazowych może być przedstawiony za pomocą składowych symetrycznych (zgodna, przeciwna i zerowa) zgodnie z następującymi zależnościami podstawowymi:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_C &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0\end{aligned}\quad (2)$$

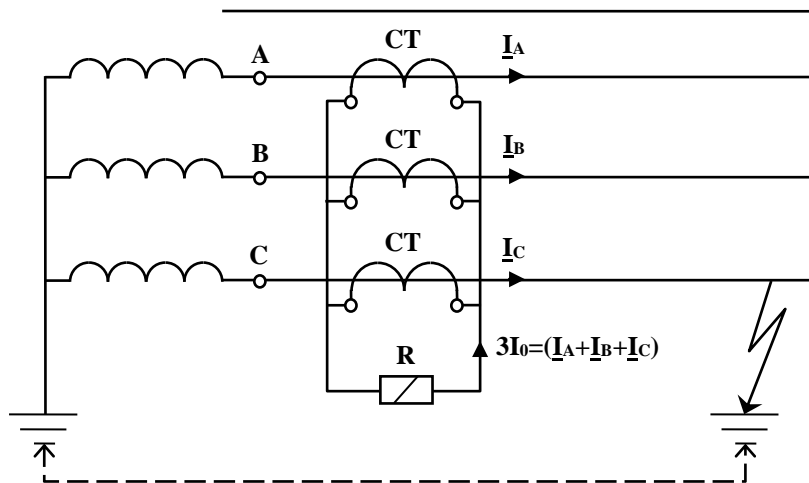
gdzie: ( $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ ) i ( $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$ ) – niesymetryczne wektory prądu fazowego i napięcia fazowego,

( $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_2$ ,  $\underline{I}_0$ ) i ( $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{U}_0$ ) składowe symetryczne: zgodna, przeciwna i zerowa prądu i napięcia.

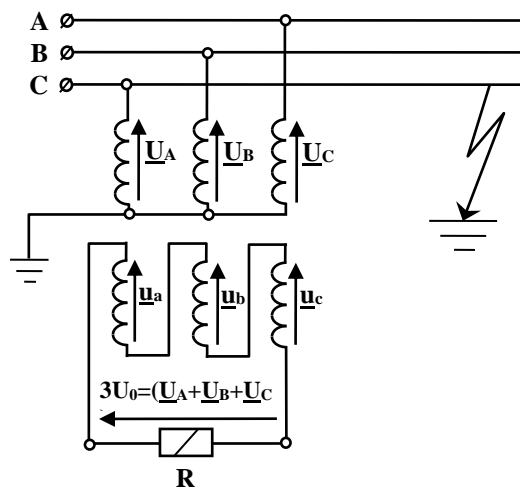
$$\begin{aligned}\underline{I}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C), & \underline{U}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \\ \underline{I}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a \underline{I}_B + a^2 \underline{I}_C), & \underline{U}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C) \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C), & \underline{U}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C)\end{aligned}\quad (3)$$

Należy zaznaczyć, że składowe zerowe prądu i napięcia pojawiają się w wyniku zwarc w systemie z udziałem ziemi (patrz rys 1 i 2) i są powszechnie wykorzystywane w zabezpieczeniach do wykrywania takich zwarc. Jak wynika ze wzorów (3), wartość składowej zerowej sygnału można łatwo otrzymać poprzez zsumowanie wartości fazowych tego sygnału, zatem do realizacji filtru składowej zerowej można wykorzystać przekładniki pomiarowe zainstalowane we wszystkich fazach, należy tylko odpowiednio połączyć uzwojenia wtórne tych przekładników. W przypadku filtru składowej zerowej prądu uzwojenia wtórne przekładników prądowych należy połączyć równolegle (połączenie w tzw. układzie Holmgreena, rys. 1), a w przypadku filtru składowej zerowej napięcia – szeregowo (połączenie w tzw. otwarty trójkąt, rys. 2)

Wadą zabezpieczeń ziemnozwarciowych wykorzystujących filtr składowej zerowej w postaci przekładników prądowych połączonych w układzie Holmgreena jest trudność uzyskania wystarczającej czułości.



Rys. 1. Zasada połączenia przekładników prądowych CT w układ Holmgreena



Rys. 2. Połączenie przekładników napięciowych w tzw. otwarty trójkąt

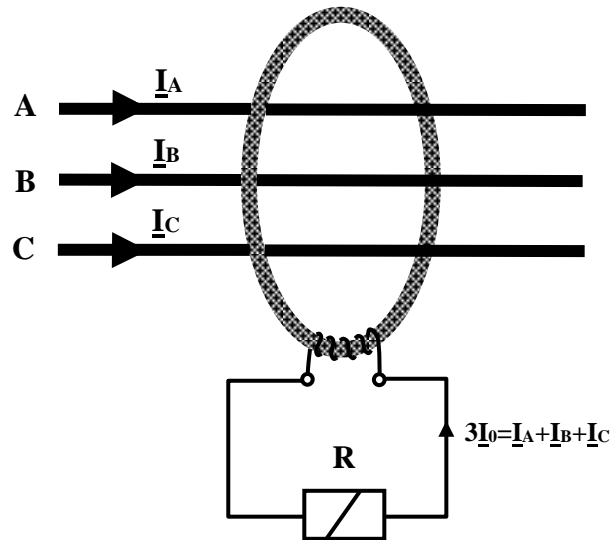
Dlatego filtry  $I_0$  rozwiązane w oparciu o przekładniki prądowe połączone w układzie Holmgreena (Rys. 3) nie mogą być stosowane w czule nastawionych zabezpieczeniach ziemnozwarciowych.

Jako filtr składowej zerowej prądu znacznie bardziej użyteczny jest specjalny przekładnik prądowy znany pod nazwą „Przekładnik Ferrantiego”, złożony z pierścieniowego rdzenia magnetycznego, na którym nawinięte jest uzwojenie. Przez okno rdzenia przeprowadza się żyły kabla, stanowiące uzwojenie pierwotne, jak pokazano na rys. 4 i 5. Z uwagi na to, że uzwojenie pierwotne ma tylko jeden zwoj, moc pobierana z obwodu pierwotnego jest stosunkowo mała. Dla uzyskania z przekładnika odpowiedniej mocy potrzebnej do zadziałania zabezpieczenia ziemnozwarciowego rdzeń magnetyczny musi posiadać odpowiednio duży przekrój i musi być wykonany z materiałów o bardzo dużej przenikalności magnetycznej.

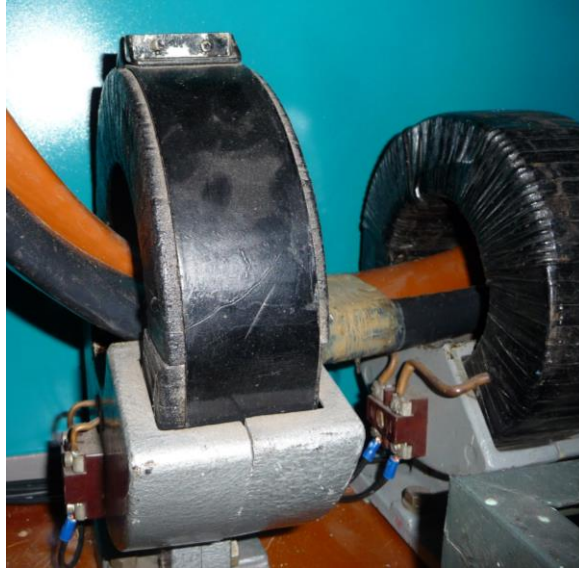
Należy zwrócić uwagę na to, że w przypadku, gdy mufa kablowa jest uziemiona, przewód uziemiający należy przeprowadzić przez okno przekładnika.



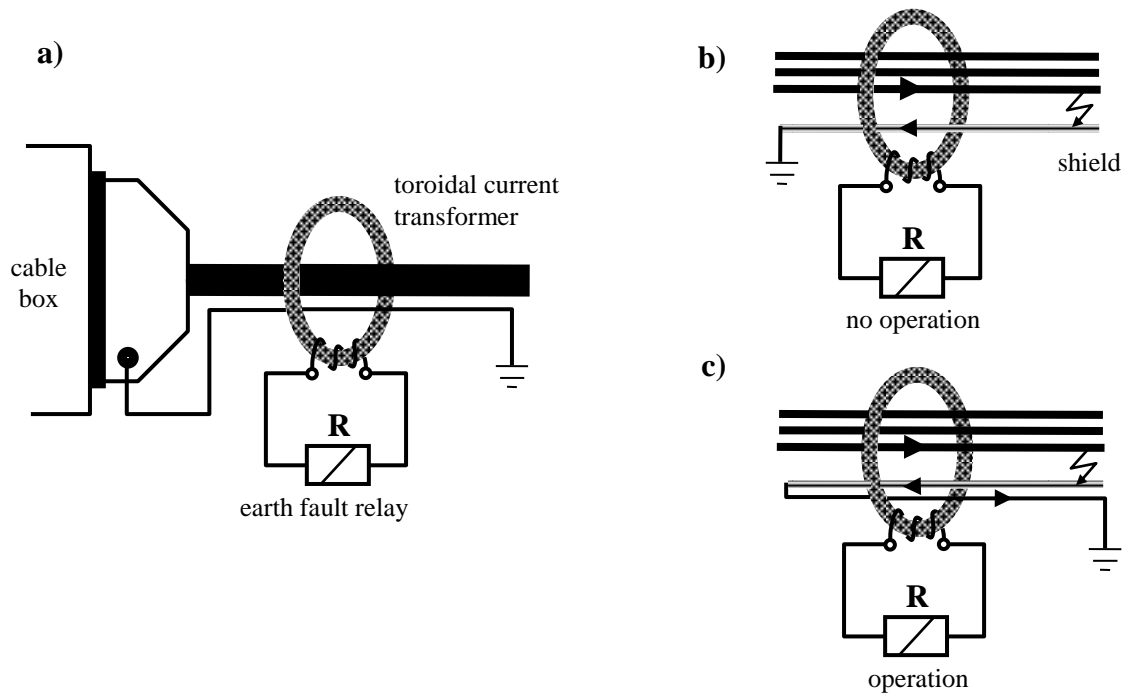
Rys. 3. Model laboratoryjny filtru  $I_0$  (Układ Holmgreena)



Rys. 4. Idea rozwiązania przekładnika Ferrantiego ( $R$  –przełącznik ziemnozwarciowy)



Rys. 5. Model laboratoryjny kablowego przekładnika Ferrantiego



Rys. 6. Typowy układ połączeń ziemnozwarciowego zabezpieczenia kabla ekranowanego zasilanego z przekładnika Ferrantiego

Składową zerową napięcia  $U_0$  otrzymuje się na zaciskach uzwojeń wtórnych trójfazowego przekładnika napięciowego połączonych w tzw. otwarty trójkąt, jak pokazano na rys. 2. Do wykrywania zwarć doziemnych stosuje się różne układy zabezpieczeniowe oparte o pomiar składowej zerowej prądu, napięcia lub ich kombinacji. W zależności od wymagań stosuje się następujące zabezpieczenia ziemnozwarciowe:

- Nadnapięciowe ( $U_0$ ),
- Nadprądowe ( $I_0$ ),
- Kierunkowe czynno-mocowe lub bierno-mocowe,
- Admitancyjne, konduktancyjne lub susceptancyjne.

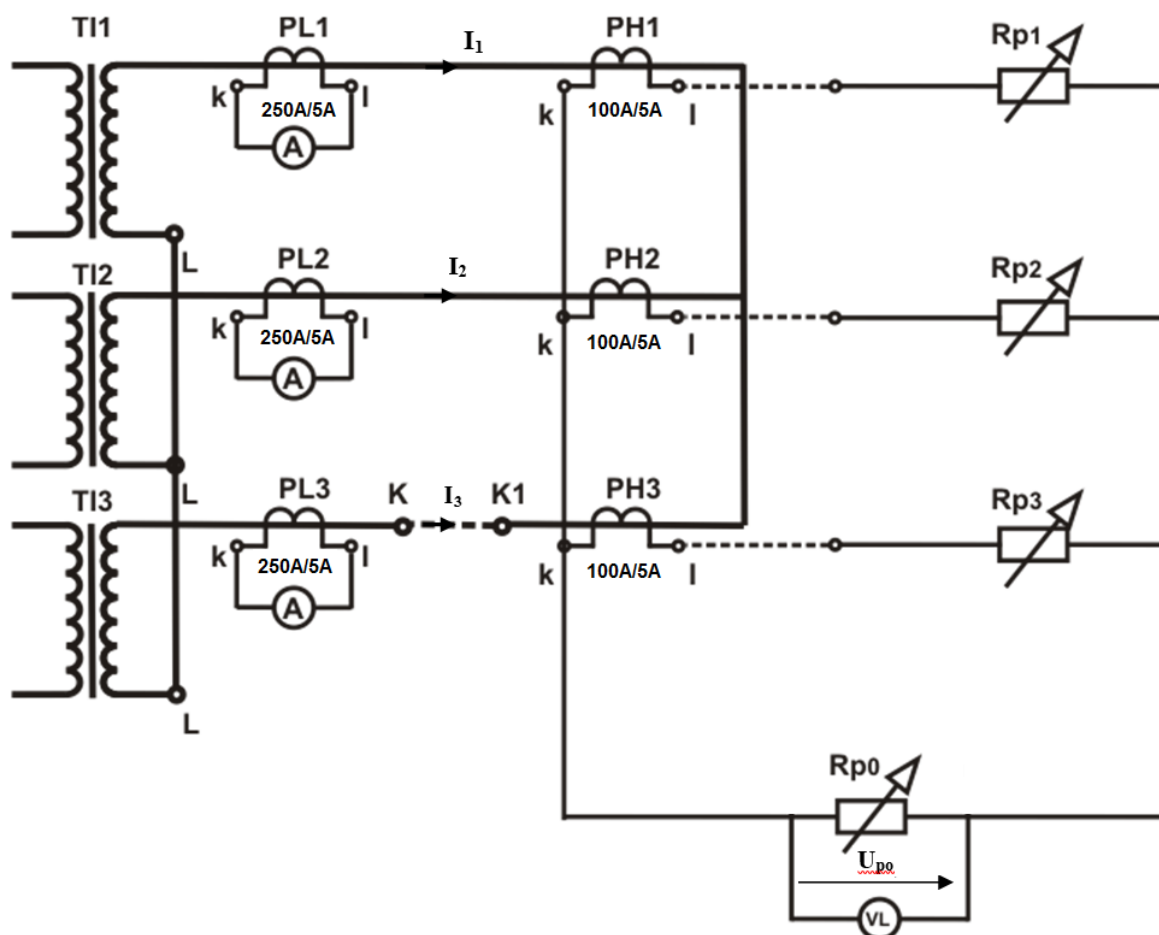
W praktyce znajdują także zastosowanie zabezpieczenia, które oparte są o pomiar zawartości składowych harmonicznych nieparzystych w prądzie ziemnozwarciowym (zwłaszcza 3-ciej harmonicznej).

## 2. BADANIA FILTRÓW SKŁADOWEJ ZEROWEJ PRĄDU

### *Przekładniki prądowe połączone w układzie Holmgreena*

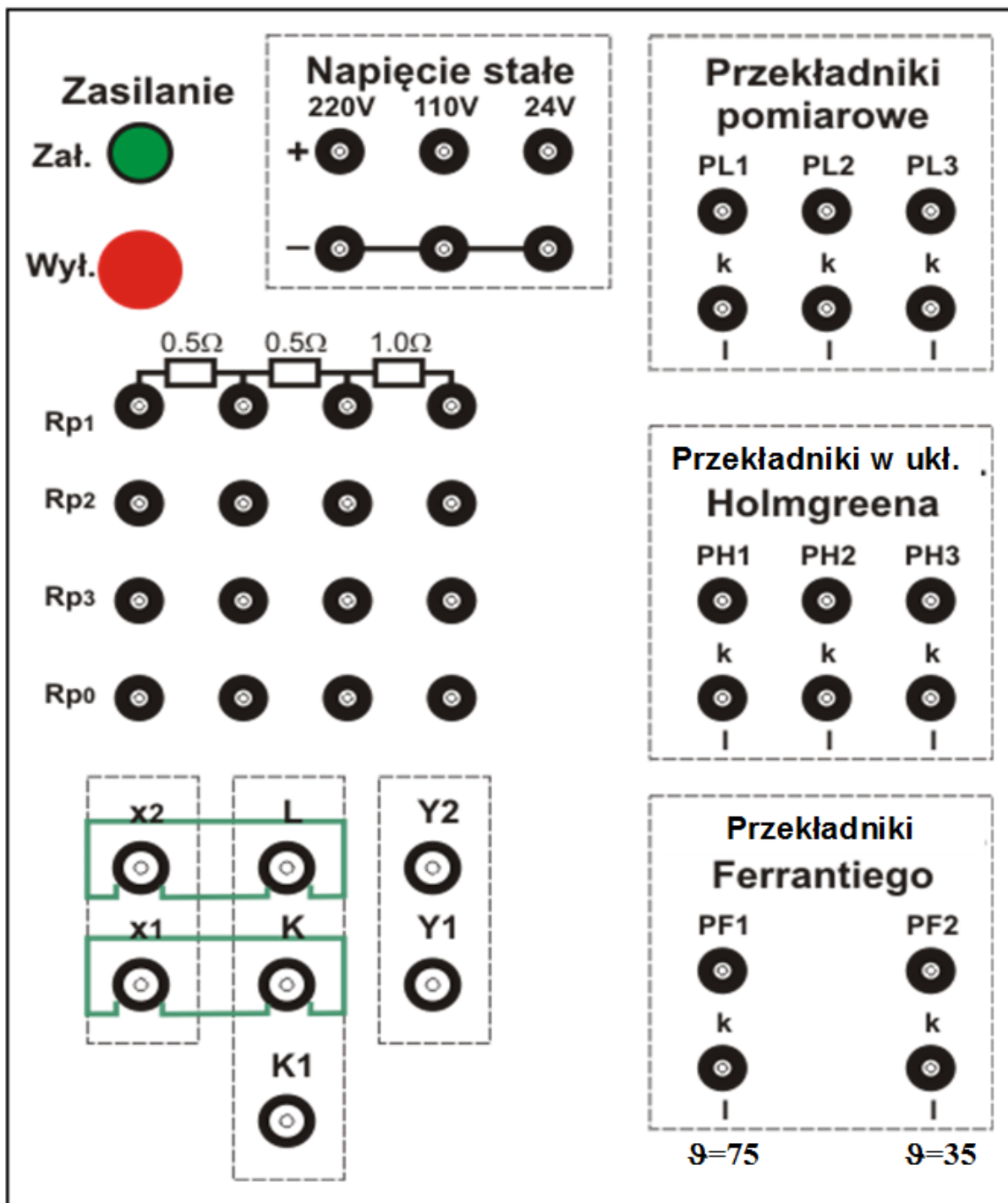
#### Pomiar prądu uchybowego

Schemat połączeń układu do badania błędów filtra składowej zerowej prądu opartego o przekładniki prądowe połączone w układzie Holmgreena pokazano na rys. 7. Pomiary wykonuje się dla różnych wartości wymuszanego prądu  $I_1..I_3$  w obwodzie pierwotnym przekładników (0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 i 1.5)  $\times I_n$  (gdzie  $I_n$  – znamionowy prąd pierwotny badanych przekładników filtru), a także dla różnych wartości rezystancji obciążenia filtra ( $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $R_{p3}$  i  $R_{p0}$ ).



*Rys. 7. Schemat układu do badania uchybów filtra składowej zerowej prądu wykonanego w oparciu o przekładniki prądowe połączone w układzie Holmgreena; T11...T13 – transformatory zasilające, PL1...PL3 – przekładniki pomiarowe, PH1...PH3 – przekładniki układu Holmgreena, VL – woltomierz elektroniczny.*

Połączenia przekładników i rezystorów wykonuje się na panelu, którego widok przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Wygląd panelu przedniego stanowiska do pomiaru prądów uchybowych układu Holmgreena i przekładnika Ferrantiego

Wartość prądu uchybowego  $I_v$  określa się na podstawie wyników pomiaru spadku napięcia  $U_{p0}$  na rezystancji  $R_{p0}$  zgodnie z zależnością (4):

$$I_v = \frac{U_{p0}}{R_{p0}} \quad (4)$$

Wyniki pomiarów zestawia się w tabeli 1. Należy sformułować wnioski dotyczące zależności prądów uchybowych od wartości rezystancji obciążenia  $R_p$  przekładników i rezystancji obwodu powrotnego  $R_{p0}$  oraz od wartości wymuszonego prądu  $I$ .

**Tabela 1. Wyniki pomiarów prądu uchybowego układu Holmgreena**

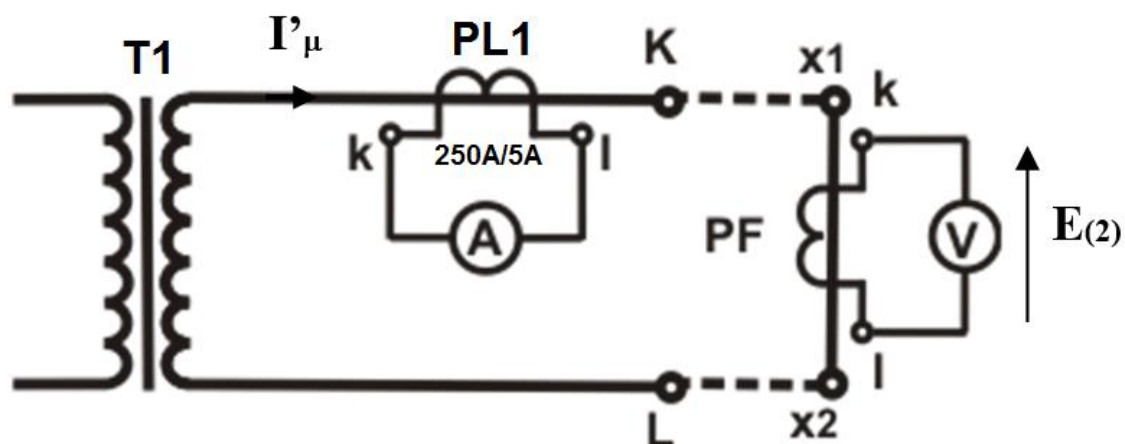
Lp	I	R <sub>p</sub>	R <sub>po</sub>	U <sub>po</sub>	Prąd uchybowy
	A	Ω		V	I <sub>v</sub> A
1	25				
2	50				
3	75				
4	100				
5	125				
6	150				

Na podstawie wyników pomiarów należy wykreślić charakterystykę  $I_v=f(I)$ .

### **Kablowy przekładnik Ferrantiego**

#### **Pomiar charakterystyki magnesowania $E_{(2)}=f(I'_u)$**

Pomiary wykonuje się w układzie przedstawionym na rys. 9. W celu zapewnienia odpowiednich warunków pomiarowych należy zmienić konfigurację zacisków na panelu przednim stanowiska i zewrzeć zaciski x2 – L oraz x1 – K (rys.8). Układ pomiarowy przystosowany jest do zakresu zmiany wartości prądu  $I'_u = 0-200A$ . Wyniki pomiarów zestawia się w tabeli 2.



**Rys. 9. Schemat układu do pomiaru charakterystyki magnesowania  $E_{(2)}=f(I'_u)$  przekładnika Ferrantiego PF (PL1 – przekładnik pomiarowy)**

**Table 2. Wyniki pomiarów impedancji magnesowania**

Lp	I' <sub>μ</sub>	E <sub>(2)</sub>	Z <sub>μ</sub>	Uwagi
	A	V	Ω	
1				
2				

Należy wykreślić charakterystyki  $E_{(2)}=f(I'_u)$  oraz  $Z_u=f(I'_u)$

Oznaczenia:

$I'_u$  - pierwotny prąd magnesowania,

$E_{(2)}$  - SEM mierzona na rozwartych zaciskach wtórnych k, l,

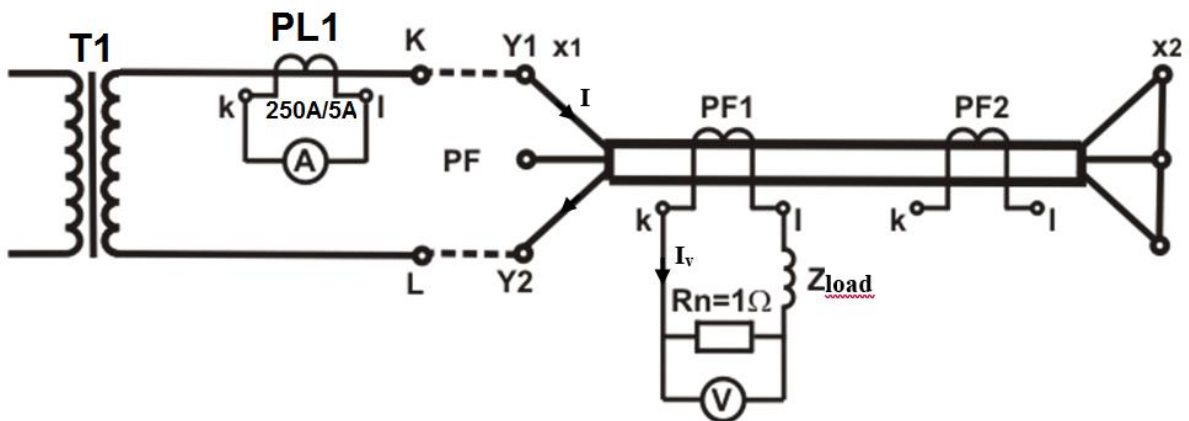
$Z_u$  - impedancja magnesowania „widziana” od strony wtórnej

$$Z_u = \frac{E_{(2)}}{I_\mu} \mathcal{G}_F$$

$\mathcal{G}_F$  - przekładnia zwojowa przekładnika Ferrantiego.

## Pomiar prądów uchybowych

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 10. W celu dostosowania stanowiska do warunków pomiarowych należy zewrzeć zaciski L – Y2 oraz zaciski K – Y1.



Rys. 10. Schemat układu do pomiaru prądu uchybowego przekładnika Ferrantiego (PF1, PF2 – przekładniki Ferrantiego, PL3 – przekładnik pomiarowy)

Przekładnik obciąża się impedancją  $Z_{obc}$  (w układzie pomiarowym jest to przełącznik ziemnozwarciowy) i mierzy się prądy uchybowe dla wartości prądu wymuszonego w zakresie 0-200A. Wyniki pomiarów zestawia się w tabeli 3.

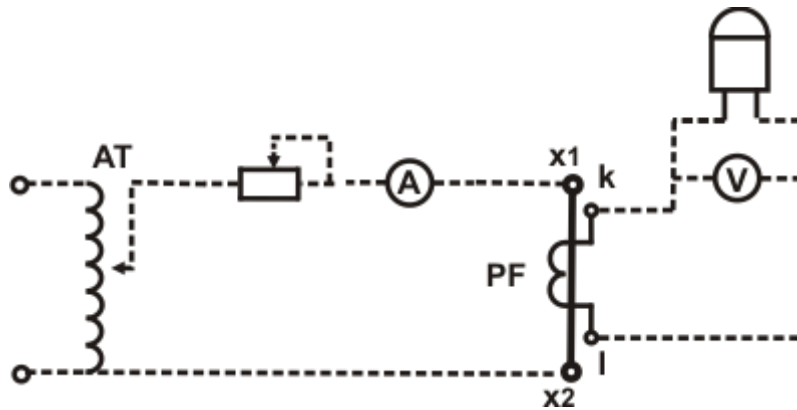
Tabela 3. Wyniki pomiarów prądów uchybowych

Lp		1	2	3	4	Uwagi
I	A	50	100	150	200	
$I_v$	mA					

## Pomiar przekładni prądowej przekładnika Ferrantiego.

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.11. Regulowane źródło prądowe należy podłączyć do zacisków x1 oraz x2. Pomiary przeprowadza się dla wszystkich wartości nastawieniowych przełącznika nadprądowego. Zastosowany w układzie miliwoltomierz elektroniczny mierzy spadek napięcia na impedancji wejściowej przełącznika.





Rys. 11. Schemat układu do pomiaru przekładni prądowej przekładnika Ferrantiego

Jeśli znana jest impedancja uzwojenia przekładnika i spadek napięcia na niej, to można wyznaczyć prąd płynący w jego obwodzie. Wyniki pomiarów zestawia się w tabeli 4. Znając wartość prądów pierwotnych  $I_{(1)}$  i wtórnych  $I_{(2)}$  wyznacza się przekładnię prądową  $\mathcal{G}_i$  zabezpieczenia oraz teoretyczną wartość prądu wtórnego:

$$I'_{(1)} = \frac{I_{(1)}}{\mathcal{G}_F}$$

$\mathcal{G}_F$  - zwojowa przekładnia przekładnika Ferrantiego

Należy obliczyć uchyb prądowy przekładnika za pomocą wzoru:

$$dI_{\%} = \frac{I_{(2)} - I'_{(1)}}{I_{(1)}} 100\%$$

Tabela 4. Wyniki pomiarów charakterystyki  $I_{(1)} = f(I_{rn})$

Lp.	$I_{rn}$	$I_{(1)}$	$I_{(2)}$	$Z_{RIg}$	$I_{(2)}$	$I'_{(1)}$	$\mathcal{G}_i$	$\mathcal{G}_F$	dI	Uwagi
	mA	A	mV	$\Omega$	mA	mA	-	-	%	

## Pomiar opności uzwojeń przekładnika Ferrantiego i przekładnika nadprądowego.

Rezystancję R uzwojenia przekładnika nadprądowego i przekładnika Ferrantiego mierzy się mostkiem Thomsona; impedancję uzwojenia Z przekładnika nadprądowego natomiast metodą techniczną, przy czym do pomiaru spadku napięcia na zaciskach uzwojenia należy stosować woltomierz elektroniczny.