

ROZDZIAŁ XI.

BADANIE TRANSFORMATORA.

1. *Przekładnia.* Według projektu „Przepisów oceny i badania transformatorów” (PNE—33—1935) przekładnią nazywamy stosunek liczby zwojów uzwojenia górnego napięcia do liczby zwojów uzwojenia dolnego napięcia, przy uwzględnieniu odpowiedniego układu połączeń. Wychodząc z tej definicji, możemy napisać dla transformatorów jednofazowych i takich trójfazowych, w których oba uzwojenia są połączone jednakowo (albo oba w Δ , albo oba w λ)

$$\mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2} \quad \dots (1)$$

gdzie w_1 i w_2 zwoje jednej fazy uzwojeń górnego i dolnego napięcia.

Przy układach mieszanych będzie inaczej.

Naprzykład

$$\left. \begin{array}{ll} \text{przy } \lambda/\Delta & \mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2} \sqrt{3} \\ \text{przy } \Delta/\lambda & \mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \text{przy } \lambda/\lambda & \mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2} \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \text{przy } \Delta/\lambda & \mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2} \frac{2}{3} \end{array} \right\} \quad \dots (2)$$

Przekładnia jest zwykle mierzona, jako stosunek odpowiednich napięć międzyzaciskowych przy biegu jałowym $\mathfrak{D} = \frac{V_1}{V_2}$. Przy takim wyznaczeniu przekładni mogą się wkraść następujące błędy:

1). Stosunek napięć przy biegu jałowym jest nieco większy od

stosunku SEM-ych — z powodu spadków napięć, wywołanych prądem biegu jałowego w uzwojeniu pierwotnym (patrz rys. 31). Błąd ten normalnie jest b. mały — ze względu na małą wartość prądu jałowego. Można go, zresztą, jeszcze zmniejszyć, dokonując pomiaru przy obniżonym napięciu, prąd magnesujący bowiem maleje szybciej niż napięcie, i procentowy wpływ spadków napięć od prądu jałowego przy obniżonym napięciu będzie mniejszy.

Przy tej sposobności można niekiedy uniknąć przy pomiarze napięcia stosowania transformatorów napięciowych, co również powiększa dokładność pomiaru. Iść jednak zbyt daleko z obniżaniem napięcia nie jest wskazane.

2). Pomiar napięć po stronie pierwotnej i wtórnej jest zawsze obciążony pewnym błędem — ze względu na dokładność samych woltomierzy.

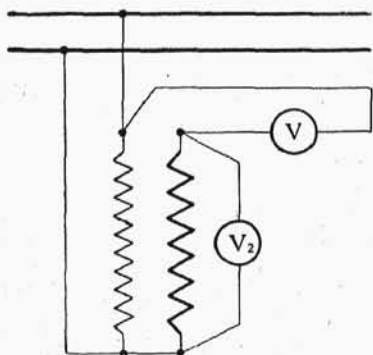
Jeżeli oznaczymy przez V_1 i V_2 rzeczywiste wartości napięcia strony pierwotnej i wtórnej przy biegu jałowym, przez ϑ — właściwą wartość przekładni ($\vartheta = \frac{V_1}{V_2}$), oraz przez δ względny błąd woltomierzy (zakładamy, że oba woltomierze są jednakowo dokładne), to wartość obliczona przekładni wyrazi się:

$$\vartheta' = \frac{(1 \pm \delta) V_1}{(1 \pm \delta) V_2} = \frac{1 \pm \delta}{1 \pm \delta} \vartheta \quad \dots (3)$$

Przyjmując wypadek najniekorzystniejszy — gdy jeden woltomierz wskazuje za mało, a drugi za dużo, — otrzymamy graniczną wartość błędu:

$$\vartheta' = \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \vartheta \simeq (1 \pm 2\delta) \vartheta. \quad \dots (4)$$

Jeżeli zatem błąd przyrządu wynosi np. $\pm 0,5\%$, dokładność pomiaru



Rys. 261.

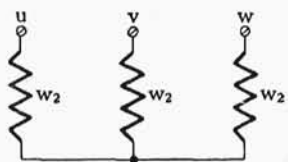
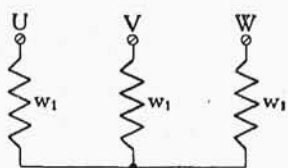
przekładni (coprawda w najgorszym przypadku) mogłaby wynosić $\pm 1\%$. Jest to, jeżeli chodzi o pomiar przekładni, błąd bardzo poważny. Większą nieco dokładność uzyskamy, mierząc napięcie jednej strony — np. niskiego napięcia V_2 i różnicę napięć obu uzwojeń $V = V_1 - V_2$, jak wskazuje schemat na rys. 261. Przyjmując, że oba woltomierze są jednakowo dokładne i że ich błędy względne są znaków przeciwnych, możemy napisać:

$$\vartheta' = 1 + \frac{(1 \pm \delta) (V_1 - V_2)}{(1 \mp \delta) V_2} = \vartheta \left(1 \pm \frac{\vartheta - 1}{\vartheta} 2\delta \right). \quad \dots (5)$$

Wynik rachunku wskazuje, że przy tej metodzie błąd pomiaru przekładni jest naogół mniejszy niż przy bezpośrednim mierzeniu obu napięć — przytem ten mniejszy, im bardziej przekładnia jest zbliżona do jedności.

3). Jeszcze jeden błąd może wystąpić specjalnie przy pomiarze przekładni transformatora trójfazowego, wskutek pewnej niesymetrii napięć przyłożonych do zacisków uzwojenia pierwotnego. Przyczyną tej niesymetrii napięć jest ta okoliczność, że transformator w biegu jałowym stanowi dla generatora, który go zasila, obciążenie niesymetryczne, zniekształcające symetryczną gwiazdę napięć generatora. Pociągnie to za sobą niesymetrię strumieni w poszczególnych słupach transformatora. Im moc pozorna biegu jałowego transformatora będzie stanowiła poważniejsze obciążenie dla generatora, tem niesymetria wystąpi wyraźniej. Zobaczmy w jaki sposób niesymetria może wpłynąć na błąd przy pomiarze przekładni i jak temu zapobiec.

Weźmiemy dla przykładu układ Δ/Δ .



Rys. 262.

Narazie, by uniezależnić się od wyższych harmonicznych, przyjmijmy, że napięcie przyłożone ma przebieg sinusoidalny. Jest przytem tak obniżone, że nasycenie żelaza jest słabe.

Suma geometryczna strumieni w trzech słupach (rys. 263) wynosi zero:

$$\hat{\Phi}_1 + \hat{\Phi}_2 + \hat{\Phi}_3 = 0 \quad \dots (6)$$

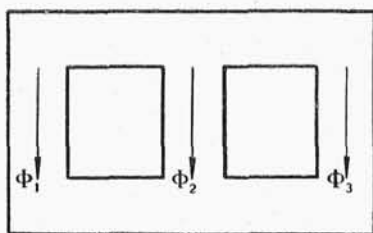
Wartości maksymalne strumieni w wypadku ogólnym, z powodu wspomnianej niesymetrii, nie będą jednakowe,

Wzajemne przesunięcia fazowe również będą się różniły od 120° .

Zmierzymy po stronie pierwotnej napięcie między parą zacisków np. $U-V$ i po stronie wtórnej między jakąś inną dowolną parą, na przykład $v-w$. Utożsamiając napięcie z SEM-ą ($V \cong E = = 4,44 f \Phi w 10^{-8} = c w \Phi$), wyznaczmy stosunek:

$$\frac{V_{U-V}}{V_{v-w}} = \frac{c w_1 (\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2)}{c w_2 (\hat{\Phi}_2 - \hat{\Phi}_3)} = \frac{w_1}{w_2} \frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_2 - \hat{\Phi}_3} = \vartheta \frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_2 - \hat{\Phi}_3}$$

gdym przy układzie Δ/Δ $\frac{w_1}{w_2} = \vartheta$.



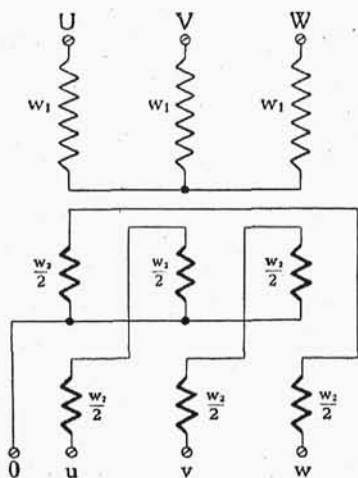
Rys. 263.

Stosunek napięć będzie się równał przekładni tylko wtedy, jeżeli będzie spełniony warunek $\frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_2 - \hat{\Phi}_3} = 1$. To jest możliwe jedynie w wypadku, jeżeli wartości maksymalne każdego z trzech strumieni są jednakowe, a wzajemne przesunięcie fazowe każdego z nich wynosi 120° — czyli tylko w razie symetrii. W ogólnym wypadku $\frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_2 - \hat{\Phi}_3} \neq 1$ i stosunek napięć $\frac{V_{U-V}}{V_{u-v}}$ wyznacza przekładnię z pewnym błędem.

Inaczej będzie, gdy pomierzmy napięcie V_{U-V} i V_{u-v}

$$\frac{V_{U-V}}{V_{u-v}} = \frac{c w_1}{c w_2} \frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2} = \frac{w_1}{w_2} = 3$$

— niezależnie od tego, czy strumienie magnetyczne tworzą układ ściśle symetryczny, czy nie.



Rys. 264.

Możemy wyciągnąć wniosek, że przy rozpatrywanym układzie Δ/Δ , (czyli A_2 i B_2 — według przepisów niemieckich, względnie 12 *Yy* 0 i 22 *Yy* 6 — według projektu przepisów polskich), aby ustrzec się od skutków ewentualnej niesymetrii, należy mierzyć przekładnię jako stosunek napięć między odpowiadającymi sobie zaciskami. Do takiegoż wniosku łatwo dojdziemy i przy układzie połączeń Δ/Δ (czyli A_1 i B_1 — według przepisów niemieckich, względnie 11 *Dd* 0 i 21 *Dd* 6. — według projektu przepisów polskich).

Rozpatrzmy jeszcze w sposób podobny do poprzedniego grupę połączeń 33 *Yz* 5 (według przepisów niemieckich

C_3). Spróbujmy znaleźć stosunek napięć między odpowiadającymi sobie zaciskami:

$$\frac{V_{U-V}}{V_{u-v}} = \frac{c w_1 (\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2)}{c \left[\frac{w_2}{2} (-\hat{\Phi}_1) + \frac{w_2}{2} \hat{\Phi}_2 + \frac{w_2}{2} (-\hat{\Phi}_3) + \frac{w_2}{2} \hat{\Phi}_2 \right]}$$

Biorąc pod uwagę zależność (6), otrzymamy:

$$\frac{V_{U-V}}{V_{u-v}} = \frac{c w_1 (\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2)}{c \frac{3}{2} w_2 \hat{\Phi}_2} = \frac{w_1}{w_2} \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\frac{3}{2} \hat{\Phi}_2} \dots (7)$$

Przy naszym układzie przekładnia (patrz wzór 2) wynosi:

$$\vartheta = \frac{w_1}{w_2} \frac{2}{\sqrt{3}}.$$

Podstawiając do tego wyrażenia stosunek $\frac{w_1}{w_2}$, określony z zależności (7), otrzymamy:

$$\vartheta = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_{U-V}}{V_{u-v}} \frac{3 \hat{\Phi}_2}{2(\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2)} = \frac{V_{U-V}}{V_{u-v}} \frac{\sqrt{3} \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}$$

Widzimy, że przekładnia będzie równa stosunkowi napięć $\frac{V_{U-V}}{V_{u-v}}$, o ile będzie spełniony warunek $\frac{\sqrt{3} \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2} = 1$ — czyli tylko w wypadku symetrii. Z tego należy wnioskować, że obrane przez nas do pomiaru napięcia V_{U-V} i V_{u-v} nie są przy rozpatrywanym układzie właściwe. Weźmy inną parę napięć V_{U-V} i V_{o-u} . Ich stosunek

$$\frac{V_{U-V}}{V_{o-u}} = \frac{c w_1}{c \frac{w_2}{2}} \frac{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2}{\hat{\Phi}_1 - \hat{\Phi}_2} = 2 \frac{w_1}{w_2}; \text{ a ponieważ } \vartheta = \frac{w_1}{w_2} \frac{2}{\sqrt{3}},$$

więc, podstawiając do tego równania stosunek $\frac{w_1}{w_2}$ z ostatniej zależności, otrzymamy:

$$\vartheta = \frac{V_{U-V}}{\sqrt{3} V_{o-u}} \dots (8)$$

Widzimy, że przez pomiar napięć V_{U-V} i V_{o-u} i obliczanie przekładni według wzoru (8) — uniezależniamy się od ewentualnej niesymetrii. Zmiana znaczków przy napięciach V (w liczniku i mianowniku wzoru 8) według obiegu kołowego pozwoli na wyszukanie pozostałych dwóch par napięć, których stosunek, podzielony przez $\sqrt{3}$, da przekładnię.

W podobny sposób możemy zbadać pozostałe układy połączeń i wynaleść odpowiednie pary napięć, przez pomiar których możemy wyznaczyć przekładnię, niezależnie od tego czy gwiazda napięć generatora, użytego do badania, jest symetryczna, czy nie.

W tabeli XXI mamy zestawione takie pary napięć dla poszczególnych układów połączeń, oraz podane wzory, za pomocą których należy obliczać przekładnię.

TABELA XXI.

O z n a c z e n i a p o l s k i e							
11 Dd0 i 21 Dd6		12 Yy0 i 22 Yy6		31 Dy5 i 41 Dy11		32 Yd5 i 42 Yd11	
13 Dz0 i 23 Dz6				33 Yz5 i 43 Yz11			
O z n a c z e n i a n i e m i e c k i e							
A_1 i B_1		A_2 i B_2		C_1 i D_1		C_2 i D_2	
A_3 i B_3				C_3 i D_3			
V_1	V_2	V_1	V_2	V_1	V_2	V_1	V_2
$U-V$	$u-v$	$U-V$	$u-v$	$U-V$	$0-u$	$0-U$	$w-u$
$V-W$	$v-w$	$V-W$	$v-w$	$V-W$	$0-v$	$0-V$	$u-v$
$W-U$	$w-u$	$W-U$	$w-u$	$W-U$	$0-w$	$0-W$	$v-w$
—	—	$0-U$	$0-u$	—	—	—	—
—	—	$0-V$	$0-v$	—	—	—	—
—	—	$0-W$	$0-w$	—	—	—	—
$\vartheta = \frac{V_1}{V_2}$		$\vartheta = \frac{V_1}{V_2}$		$\vartheta = \frac{V_1}{\sqrt{3} V_2}$		$\vartheta = \frac{\sqrt{3} V_1}{V_2}$	

W rozumowaniach naszych przyjmowaliśmy dotychczas że napięcie przyłożone i strumień mają zmienność sinusoidalną. Jeżeli przebiegu sinusoidalnego nie mamy — możemy krzywą odkształconą rozłożyć w myśl twierdzenia Fourier'a na sinusoidę podstawową i wyższe harmoniczne. Stosunki, wyprowadzone przez nas wyżej, są słuszne zarówno dla sinusoidy podstawowej, jak i dla

tych wyższych harmoniczných, które spełniają zależność (6) — a więc piątej, siódmej i t. d. Harmoniczna trzecia, która nie czyni zadość temu równaniu, w naszych rozważaniach roli nie odgrywa, bo tam, gdzie mamy do czynienia z napięciami skojarzonymi — znosi się, natomiast w układach $A_3 B_3, C_1 C_2, D_1 D_2$, zawierających Δ , strumień trzeciej harmoniczných nie posiada.

SEM skuteczna krzywej odkształconej równa się sumie geometrycznej wartości skutecznych poszczególnych fal, a zatem i tutaj możemy korzystać z podanej tabeli, niezależnie od kształtu napięcia i nasycenia żelaza.

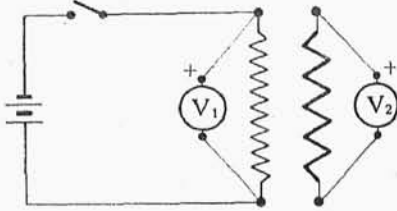
Dokładny pomiar przekładni jest potrzebny, jak wiemy, przede wszystkim ze względu na przyszłą pracę równoległą naszego transformatora z innemi. Już bowiem przy b. nieznacznych różnicach w przekładniach w uzwojeniach wtórnych transformatorów, pracujących równolegle, powstanie przepływ prądów wyrównawczych. Możemy przeto celem sprawdzenia równości przekładni, połączyć dwa (jeden badany, drugi porównawczy) transformatory na siebie jednoimiennymi zaciskami — oczywiście jeżeli połączenia tych transformatorów nadają się do pracy równoległej. Pomiar taki tylko stwierdza, czy przekładnie są równe, czy nie, natomiast nie pozwala na ilościowe ujęcie ewentualnej różnicy. W tym celu możnaby w transformatorze badanym dowinać, względnie odwinać kilka zwojów — tak by przekładnie zrównać (aby nie było prądów wyrównawczych).

Z liczby zwojów dowiniętych (względnie odwiniętych) można wnioskować o różnicy w przekładniach. Takie porównanie przekładni jest możliwe tylko wtedy, gdy mamy co najmniej dwa transformatory o nominalnie równych przekładniach. Dobrze się więc nadaje np. w fabryce przy budowie serji jednakowych transformatorów.

2. Kierunek nawinięcia uzwojeń oraz grupa połączeń.

a. *Kierunek nawinięcia.* O jednym sposobie wyznaczenia kierunku nawinięcia wspomnieliśmy już poprzednio (patrz I—9). Kierunek nawinięcia można sprawdzić również, korzystając z woltomierza magnetoelektrycznego ze skalą dwustronną i źródła prądu stałego. Woltomierz załączamy na zaciski jednego uzwojenia np. $U—V$, na zaciski zaś $u—v$ dajemy źródło prądu stałego. Przy szybkim przerywaniu obwodu $u—v$, woltomierz wychyli się w pewnym kierunku. Damy teraz woltomierz na $u—v$, a do $U—V$ włączymy źródło prądu stałego — tak, żeby biegun dodatni w obu wypadkach był przyłączony do zacisków jednoimiennych np. u i U (to samo się odnosi i do woltomierza). Jeżeli przerwa obwodu $U—V$ spowo-

duże wychylenie się woltomierza w tym samym kierunku, mamy zgodność nawinięć obu uzwojeń.



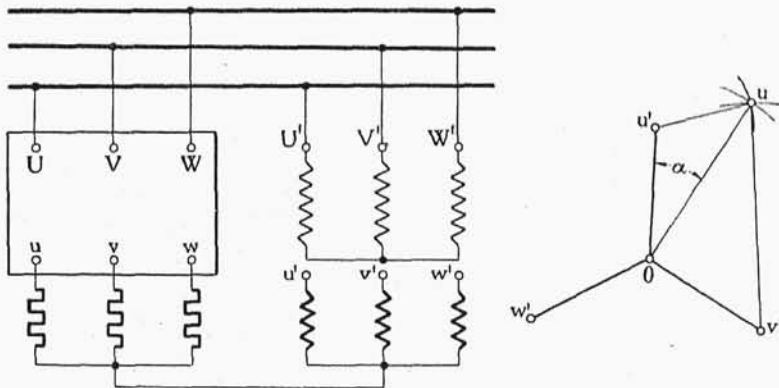
Rys. 265.

Posiadając dwa woltomierze ze skalą dwustronną, możemy ograniczyć się do jednej manipulacji—przy połączeniu przyrządów jak na rys. 265. Ze względu na bezpieczeństwo wskazane jest załączyć źródło prądu stałego na zaciski uzwojenia wyższego napięcia.

b. Wyznaczenie grupy połączeń przy prądzie trójfazowym jest możliwe przez porównanie badanego transformatora z transformatorem pomocniczym o wiadomym układzie połączeń i o przekładni tego samego rzędu co przekładnia transformatora badanego.

Najlepiej jeżeli transformator pomocniczy jest połączony dwustronnie w gwiazdę. Zaciski transformatora badanego winny być oznaczone.

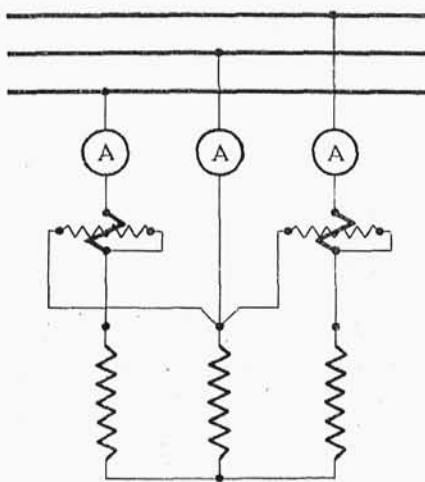
Po stronie wtórnej transformatora badanego tworzymy za pomocą trzech oporności, połączonych w gwiazdę, sztuczne zero i łączymy je z zerem pomocniczego transformatora. Następnie mierzymy napięcia $\overline{Ou'}$, \overline{Ou} , $\overline{u'u}$ oraz $\overline{v'u}$ i za pomocą prostej konstrukcji (rys. 266) określamy wzajemne położenie wektorów napięć $\overline{Ou'}$ i \overline{Ou} .



Rys. 266.

Na podstawie wzajemnego położenia gwiazdy transformatora pomocniczego i gwiazdy transformatora badanego — możemy określić grupę połączeń.

3. *Bieg jałowy.* Za pomocą tego pomiaru określamy straty i prąd biegu jałowego. Przeprowadzamy pomiar w ten sposób, że, pozostawiając jedną stronę transformatora rozwartą, przykładamy do drugiej jej nominalne napięcie przy nominalnej częstotliwości. Ze względu na dokładność (można niekiedy uniknąć pośrednictwa transformatora pomiarowego) pomiar ten bywa wykonywany przeważnie od strony niskiego napięcia. Straty mocy biegu jałowego przy transformatorze jednofazowym są mierzone za pomocą watomierza jednofazowego, przy prądzie trójfazowym trzeba użyć dwóch watomierzy jednofazowych, połączonych w układ Arona (rys. 267). Na-



Rys. 267.

leży zauważyć, że, ponieważ prąd biegu jałowego ma charakter b. bezwzględny

$$(\cos \varphi_0 = 0,1 \div 0,2),$$

przy metodzie dwóch watomierzy wskazania ich winny być od siebie odjęte. Straty mocy przy biegu jałowym składają się ze strat w żelazie obwodu magnetycznego transformatora, strat w miedzi uzwojenia pierwotnego, strat dodatkowych w żelaznych częściach konstrukcji wsporczej, ewentualnych strat w pudle i przy bardzo wysokich napięciach strat w dielektryku.

Straty w miedzi uzwojenia pierwotnego są małe (przy prądzie magnesującym, wynoszącym 10% normalnego, straty w miedzi będą stanowiły tylko $\frac{1}{100}$ strat w mie-

dzi tego uzwojenia przy obciążeniu normalnym). Mogą one być obliczone dość dokładnie o ile jest wiadomą oporność omowa uzwojenia

Straty na prądy wirowe w pudle przy połączeniu jednego z uzwojeń w Δ są znikome, przy zaopatrzeniu gwiazdy pierwotnej w przewód zerowy wcale nie występują, zresztą i przy układzie Δ/Δ bez przewodu zerowego są tak małe, że naogół mogą być pominięte. Wartość tych strat może być obliczona, jako różnica strat biegu jałowego, pomierzonych raz przy transformatorze umieszczonym w pudle, drugi raz przy wyjętym (oczywiście o ile to z innych względów da się uskuteczyć). Straty w częściach żelaznych konstrukcji wsporczych są również w wypadkach normalnych bardzo

małe. Straty w dielektrykach występują tylko przy bardzo wysokich napięciach — wielkość ich jest nieznaczna — mogą one jednakże spowodować lokalne zagrzanie się izolacji. Z powyższego wynika, że ogólnie przy biegu jałowym należy się praktycznie liczyć tylko ze stratami w żelazie obwodu magnetycznego.

4. *Pomiar zwarcia.* Za pomocą tego pomiaru określamy napięcie zwarcia oraz straty w miedzi uzwojeń transformatora. Przeprowadzamy pomiar w ten sposób, że jedno z uzwojeń transformatora zwieramy, do zacisków zaś drugiego uzwojenia doprowadzamy takie napięcie, by w uzwojeniach transformatora popłynął prąd odpowiadający mocy nominalnej.

Napięcie to nazwalimy poprzednio napięciem zwarcia. Ponieważ wynosi ono zwykle parę procentów od napięcia nominalnego, lepiej jest (ze względu na dokładność odczytu woltomierza) zwierać uzwojenie od strony niskiego napięcia i przeprowadzać pomiar od strony uzwojenia wysokiego napięcia. Uzwojenia przytem winny być rozgrzane do temperatury pracy normalnej, względnie wyniki otrzymane trzeba przeliczyć, uwzględniając przepisany przyrost temperatury.

Należy pamiętać, że przeliczenie odnosi się tylko do oporności zmierzonej prądem stałym, różnica bowiem między opornościami pomierzonymi prądem zmiennym i stałym (której przyczyną są dodatkowe straty w miedzi wskutek prądów wirowych, oraz w częściach metalowych konstrukcji wsporczej, położonych w polach rozproszenia uzwojeń) od temperatury jest praktycznie niezależna (w rzeczywistości ze wzrostem temperatury nawet bardzo nieznacznie maleje, lecz tego się zwykle nie uwzględnia).

Moc, pomierzona przy zwarcu, składa się ze strat mocy w miedzi, (łącznie ze stratami dodatkowymi) oraz strat w żelazie; te ostatnie są znikome (np. przy $v_z\% = 4\%$ indukcja magnetyczna w rdzeniu żelaznym wynosi około $\frac{1}{50}$ części indukcji przy pracy normalnej — a straty w żelazie około $\frac{1}{2500}$ strat normalnych) — i mogą być pominięte.

Na podstawie przeprowadzonego pomiaru możemy obliczyć oporności omową i indukcyjną zwarcia.

Transformator jednofazowy.

$$r_z = r_1 + r'_2 = \frac{\Delta P_m}{I_1^2} \quad ; \quad x_z = \frac{1}{I_1} \sqrt{V_z^2 - \left(\frac{\Delta P_m}{I_1}\right)^2} ;$$

$$\cos \varphi_z = \frac{\Delta P_m}{V_z I_1} .$$

Transformator trójfazowy.

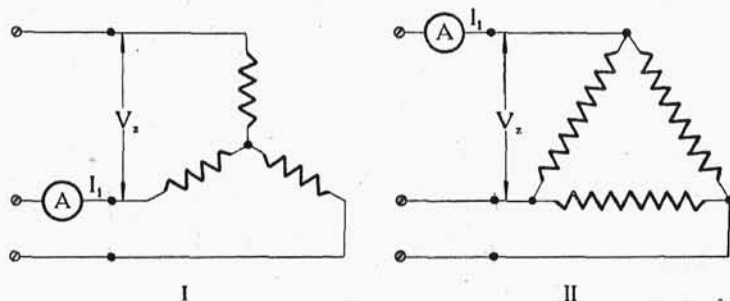
a) przy połączeniu strony pierwotnej w Δ (rys. 168^I):

$$r_z = \frac{\Delta P_m}{3 I_1^2}; \quad x_z = \frac{1}{I_1} \sqrt{\frac{V_z^2}{3} - \left(\frac{\Delta P_m}{3 I_1}\right)^2}$$

b) przy połączeniu strony pierwotnej w Δ (rys. 268^{II}):

$$r_z = \frac{\frac{\Delta P_m}{3}}{\left(\frac{I_1}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{\Delta P_m}{I_1^2}; \quad z_z = \frac{V_z}{\frac{I_1}{\sqrt{3}}}$$

$$x_z = \sqrt{z_z^2 - r_z^2} = \sqrt{\frac{3 V_z^2}{I_1^2} - \left(\frac{\Delta P_m}{I_1^2}\right)^2} = \frac{1}{I_1} \sqrt{3 V_z^2 - \left(\frac{\Delta P_m}{I_1}\right)^2}$$



Rys. 268.

Spółczynnik mocy przy zwarcu w obu wypadkach:

$$\cos \varphi_z = \frac{\Delta P_m}{\sqrt{3} V_z I_1}$$

Oporność r_z , obliczona według powyższych wzorów, zawiera w sobie wspomniane wyżej straty dodatkowe. Można je w ten sposób wyodrębnić, że od strat mocy, wykazanych przez watomierze przy pomiarze zwarcia, odejmiemy straty, obliczone na podstawie oporności omowej uzwojeń, mierzonej prądem stałym. Temperatury uzwojeń przy obu pomiarach (oporności omowej prądem stałym i opornością zwarcia) winny być, oczywiście, jednakowe. W przeciwnym razie oporność mierzoną prądem stałym należy przeliczyć na temperaturę przy zwarcu.

5. *Próba grzania.* Poprzednio (IX — 1) były podane granice dopuszczalnych przyrostów temperatury. Próba grzania ma na celu stwierdzenie, czy te granice nie zostały przekroczone. Istnieją za-

sadniczo dwa sposoby mierzenia temperatury: oporowy i termometrykowy. Do pomiaru temperatury uzwojeń stosuje się przeważnie sposób oporowy. Przy transformatorze olejowym zresztą innego sposobu zastosować nie można. Temperatura rdzenia żelaznego może być sprawdzona tylko w transformatorze suchym.

W transformatorze olejowym poza temperaturą uzwojenia można zmierzyć tylko temperaturę oleju. W tym celu pokrywa transformatora jest zaopatrzona w otwór do którego wkłada się termometr.

Tam gdzie mogą powstać wpływy zmiennego pola magnetycznego należy używać termometrów alkoholowych.

Przyrost temperatury metodą oporową może być obliczony na podstawie wzorów:

a) dla transformatorów na pracę ciągłą, przerywaną lub okresowo wzmożoną:

$$\Delta t = \frac{r_g - r_z}{r_z} (234,5 + t_z) - (t_c - t_z) \quad \dots (9)$$

b) dla transformatorów na pracę dorywczą

$$\Delta t = \frac{r_g - r_z}{r_z} (234,5 + t_z) \quad \dots (10)$$

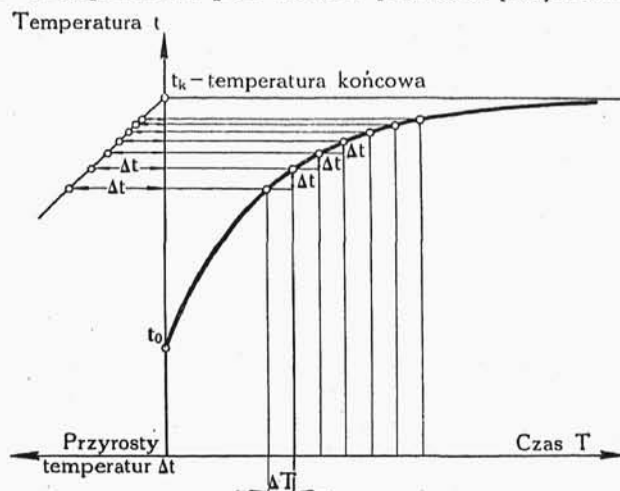
gdzie t_z — temperatura uzwojenia zimnego;

t_c — temperatura czynnika chłodzącego;

r_z — oporność uzwojenia zimnego;

r_g — oporność uzwojenia gorącego.

Mierząc co pewien czas przyrosty temperatury, możemy wykreślić krzywe nagrzewania się dla poszczególnych części transformatora. Temperatura pod koniec pomiaru przyrasta coraz wol-



Rys. 269.

niej. By przyspieszyć próbę, możemy końcowy przyrost temperatury wyznaczyć metodą wykreślną. W tym celu w równych odstępach czasu ΔT jest mierzona temperatura t badanej części transformatora. Na podstawie tych pomiarów buduje się zależność przyrostu temperatury Δt od temperatury t (lewa część wykresu). Przedłużenie linii prostej przez szereg w ten sposób znalezionych punktów odcina na osi temperatur temperaturę końcową t_k .

Jeżeli t_0 — jest temperaturą na początku próby, wtedy przyrost końcowy temperatury wyniesie: $\Delta t_k = t_k - t_0$.

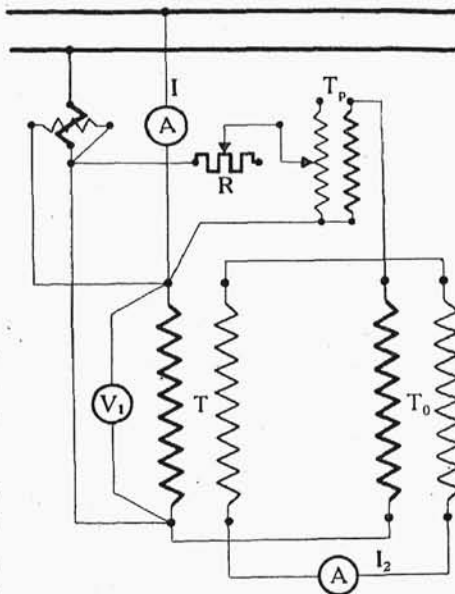
Teraz o samym obciążeniu transformatora. Najprościej byłoby obciążyć transformator badany za pomocą jakiegoś opornika — np. wodnego — do wysokości mocy nominalnej. Czas ustalenia się temperatur zależy od jego mocy.

Przy mocach	10 do 100 kVA	wynosi	8 do 10 godz.
" "	100 " 1000 "	" "	10 " 14 "
" "	1000 " 5000 "	" "	14 " 20 "

Obciążenie normalne transformatora dla próby grzania się pociągnęłoby za sobą duże koszty energii elektrycznej, pozatem, zwłaszcza przy większych jednostkach, mielibyśmy znaczne obciążenie sieci, do której jest załączony transformator badany. Bardzo często nawet rozporządzalna moc stacji probierczej w fabryce jest mniejsza od mocy badanego transformatora.

Zachodzi konieczność stworzenia takich warunków próby, przy których ilość ciepła, wydzielonego w żelazie i miedzi transformatora byłaby równa ciepłu, wydzielonemu przy pracy normalnej, moc natomiast, pobierana dla próby byłaby znacznie mniejsza od mocy nominalnej transformatora. Istnieje wiele sposobów przeprowadzenia prób grzania — rozpatrzmy kilka.

a. *Praca zwrotna.* Do tego pomiaru potrzebne są dodatkowo dwa transformatory: jeden t. zw. obciążeniowy T_0 — identyczny z transformatorem badanym T



Rys. 270.

oraz transformator pomocniczy T_p o mocy około 10% mocy badanego — z regulowaną przekładnią.

Uzwojenie pierwotne transformatora badanego bierze moc z sieci i przekazuje ją, za pośrednictwem uzwojenia wtórnego, transformatorowi obciążeniowemu T_o , który skolei zwraca ją spowrotem do sieci. Transformator T_p podbija napięcie strony wtórnej transformatora T_o i umożliwia w ten sposób powrót energii do sieci. Zmiana przekładni transformatora T_p powoduje zmianę prądu w uzwojeniu transformatora. Opor-

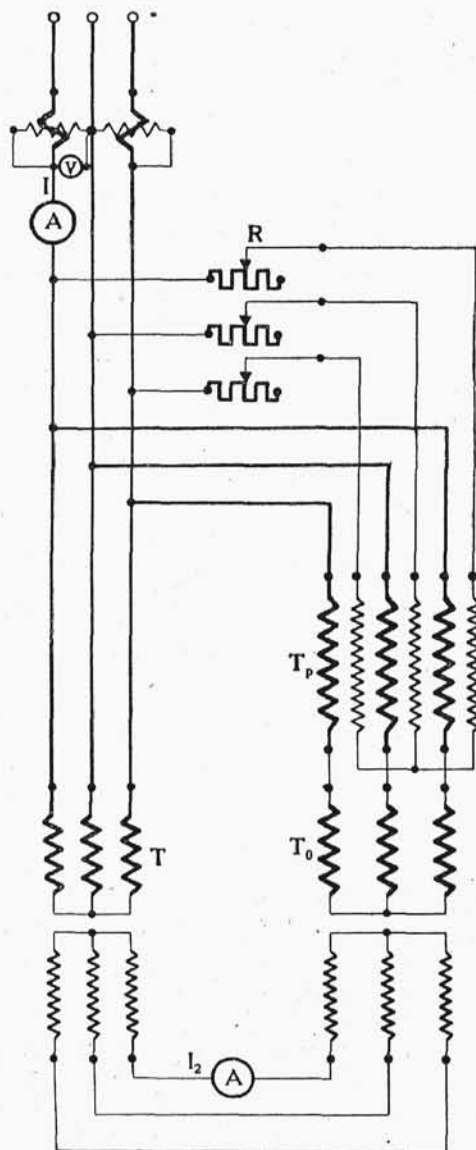
ność R służy do czulszego nastawiania prądu I_2 .

W rezultacie mamy w naszym transformatorze normalne napięcie na zaciskach (normalne straty w żelazie) oraz normalny prąd w uzwojeniach (normalne straty w miedzi). Przy doświadczeniu sieć dostarcza tylko mocy potrzebnej na pokrycie strat w transformatorach.

Transformatory T i T_o winny znajdować się od siebie na takiej odległości, by ciepłota wzajemnie na siebie nie wpływała. Na rys. 271 mamy schemat połączeń do pracy zwrotnej transformatora trójfazowego. Zmiana prądu I_2 uskutecznia się za pomocą opornika R .

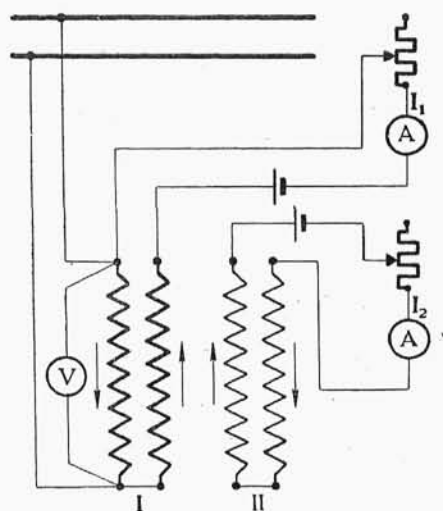
b. Połączenia sztuczne.

Niekiedy próbę grzania się wykonywuje się w ten sposób, że straty w żelazie pokrywa jedno źródło prądu, straty zaś w miedzi drugie. Do grzania miedzi można użyć albo prądu stałego, albo zmiennego. Na rys. 272 widzimy schemat połączeń do próby grzania transformatora jednofazowego. Pomiar



Rys. 271.

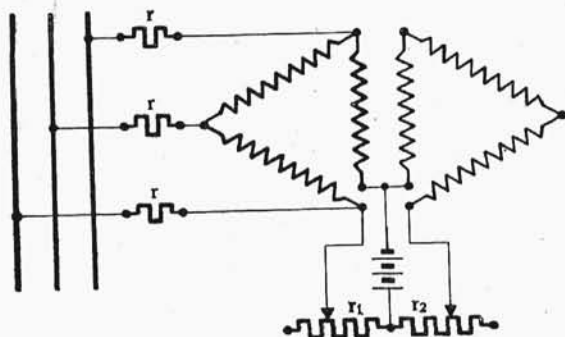
ten może być przeprowadzony tylko w wypadku, jeżeli każde z uzwojeń składa się z dwóch części zupełnie jednakowych (na każdym ze słupów). Straty w żelazie pokrywa się prąd zmiennego o napięciu równym połowie napięcia normalnego (gdyż załączamy połowę uzwojenia) i o częstotliwości nominalnej. Uzwojenia są ogrzewane przez prąd stały; kierunki prądu w obu uzwojeniach winny być tak dobrane, by na każdym ze słupów suma amperozwojów, wywołanych przepływem prądu stałego była równa zero, wtedy bowiem prąd stały nie wpływa zupełnie na magnesowanie transformatora za pomocą prądu zmiennego. Ponieważ



Rys. 272.

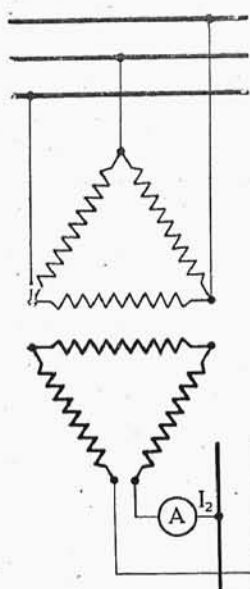
przy przepływie prądu zmiennego straty w miedzi wypadają większe niż przy prądzie stałym (przy tych samych wartościach skutecznych prądu), więc przy próbie prądem stałym należy użyć prądu nieco większego (parę procentów).

Na rys. 273 mamy podobną próbę transformatora trójfazowego. Oba uzwojenia przy próbie należy połączyć w Δ . Jedno uzwojenie przyłączamy do sieci trójfazowej, która po-

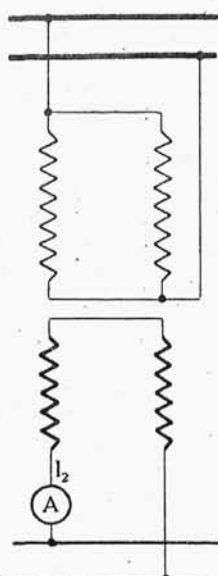


Rys. 273.

kryje straty w żelazie. Straty w miedzi pokrywa źródło prądu stałego, przyczem, jeżeli oporności obu uzwojeń różnią się od siebie nieznacznie, można zasilać oba uzwojenia z jednego źródła, jak to widzimy na rys. 273. Przy dużych różnicach należy użyć dwóch niezależnych źródeł. Oporności r są włączone w celu przeszkodzenia prądowi stałemu w odgałęzianiu się przez sieć prądu zmiennego. Napięcie sieci należy dobrać tak, by, uwzględniając spadki napięć na opornościach r , uzyskać na zaciskach pierwotnych napięcie normalne pierwotne. Zapomocą oporności r_1 i r_2 dobieramy



Rys. 274.

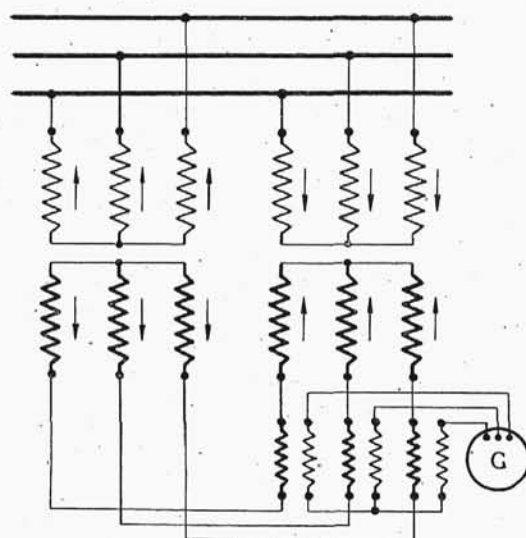


Rys. 275.

dla każdego z uzwojeń właściwy prąd obciążenia. Na rys. 274 i 275 mamy sztuczne połączenie uzwojeń, podobne do dwóch wyżej rozpatrzonych, z tą różnicą, że uzwojenia są grzane prądem zmiennym. Zasilanie odbywa się od strony wtórnej.

Gdy przy próbie mamy dwa jednakowe transformatory, obustronnie połączone w gwiazdę, to próbę można przeprowadzić, korzystając z schematu na rys. 276; tutaj straty w miedzi są pokrywane ze specjalnego źródła prądu trójfazowego (G).

Przy połączeniu Δ/Δ (względnie dla innych połączeń, przełączonych specjalnie dla próby na Δ/Δ) do grzania uzwojeń można użyć prądu jednofazowego — jak to wskazuje schemat na rys. 277.



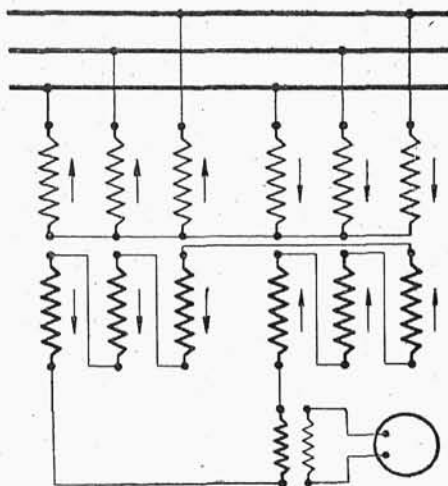
Rys. 276.

c) *Badanie grzania się za pomocą pomiaru biegu jałowego i zwarcia.* Niekiedy próba grzania się bywa przeprowadzana w sposób uproszczony. Mierzy się przyrosty temperatury oddzielnie przy pomiarze biegu jałowego i przy pomiarze zwarcia, sumując później oba przyrosty ze sobą. Każdy z po-

miarów przeprowadza się tak długo, aż temperatura się ustali. Opisany sposób wyznaczania przyrostu temperatury nie jest dokładny. Na niedokładność metody wpływa ta okoliczność, że straty w miedzi

są zależne od temperatury, a więc przy pomiarze zwarcia będą mniejsze, niż przy pracy normalnej, przy której ogólna temperatura transformatora jest wyższa. Jeżeli chodzi o transformator olejowy, to w nim temperatura w dużym stopniu jest zależna od intensywności krążenia oleju. Im olej jest rzadszy, czyli im jest wyższa jego temperatura, tem chłodzenie jest skuteczniejsze.

Widzimy zatem, że temperatura uzwojeń przy zwarcu będzie z jednej strony mniejsza, wskutek mniejszej oporności, z drugiej zaś strony większa ze względu na gorsze odprowadzenie ciepła przez gęstszy olej. Przeważa naogół pogorszenie warunków chłodzenia i przyrost temperatury, obliczony, jako suma przyrostów przy biegu jałowym i zwarcu, wypadają zwykle większy od przyrostu przy pracy normalnej.



Rys. 277.

Mimo małej dokładności, z metodą tą, dzięki jej prostocie, można się spotkać dość często.

6. *Wytrzymałość izolacji.* Izolację transformatorów poddaje się następującym próbom:

- a) próba izolacji uzwojeń,
- b) " " na fale uskokowe,
- c) " " międzyzwojowej.

Podamy tutaj w dosłownem brzmieniu pewne fragmenty projektu „Przepisów oceny i badania transformatorów” $\frac{PNE}{33 - 1935}$, które dotyczą wytrzymałości izolacji.

§ 49.

„...Próbnom na wytrzymałość izolacji można poddawać transformatory w stanie zimnym, o ile próba nagrzewania nie jest przewidziana, lub też, o ile zajądą przeszkody do uskutecznienia tych prób po próbie nagrzewania.

Wszystkie stałe połączenia uzwojeń pomiędzy sobą i ze szkieletem podczas prób mogą pozostać nierozłączone”.

§ 50. Próba izolacji uzwojeń.

„Próba ta ma wykazać, czy wytrzymałość izolacji uzwojeń jednych względem drugich oraz względem szkieletu jest dostateczna.

Wytrzymałość izolacji między poszczególnymi uzwojeniami, które nie są połączone ze sobą przy pracy, a także wytrzymałość izolacji między temi uzwojeniami a szkieletem, należy próbować przy pomocy obcego źródła prądu zmiennego. Jeden biegun źródła prądu należy przyłączyć do próbowanego uzwojenia, drugi zaś — do zespołu pozostałych uzwojeń połączonych ze sobą oraz ze szkieletem. Napięcie probiercze powinno być praktycznie sinusoidalne o częstotliwości nominalnej próbowanego transformatora, bądź też o 50 ~/sek. Próbę należy rozpocząć od $\frac{1}{3}$ pełnego napięcia probierczego, poczem należy je powiększać aż do pełnej wartości możliwie szybko, jednak tak, by można było prawidłowo odczytywać wskazania przyrządów pomiarowych. Próba przy całkowitem napięciu winna trwać 1 min. Przy napięciach ponad 30 kV., o ile nie można dla braku urządzeń probierczych przeprowadzić próby według poniższej tabeli, można wykonać próbę przy napięciu mniejszem, przedłużając odpowiednio czas próby*).

Napięcie probiercze dla uzwojeń

	Wielkość napięć roboczych	Napięcie probiercze
1	Uzwojenia do 750 V	2500 V
2	Uzwojenia powyżej 750 V do 3000 V	3,25 U
3	Uzwojenia powyżej 3000 V do 4500 V.	1000 V
4	Uzwojenia powyżej 4500 V	2 U + 1000

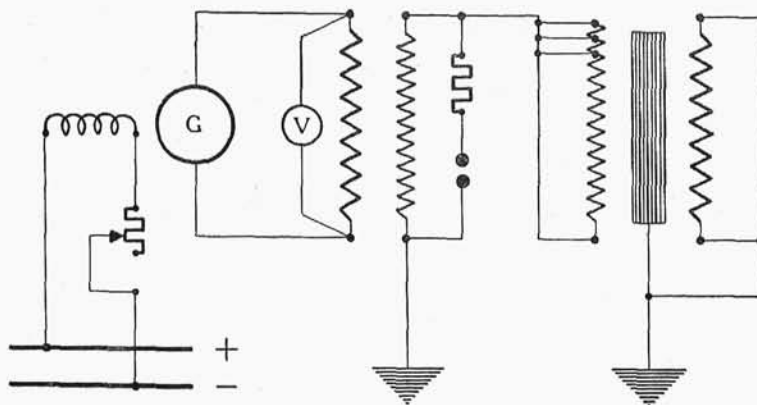
W tabeli litera U oznacza — nominalne napięcie próbowanego uzwojenia"....

....., Wynik próby jest zadowalający, jeżeli nie nastąpiło przebicie, nie było przeskoków i jeżeli stwierdzono przez obserwację prądu, pobieranego podczas próby, że materiały izolacyjne nie zostały uszkodzone.

Przy stałym napięciu probierczem natężenie prądu nie powinno podczas próby ani wzrastać ani się wahać".

Na rys. 278 widzimy schemat połączenia dla omawianej próby. Napięcie probiercze podnosimy przez zmianę wzbudzenia generatora. Każde z uzwojeń transformatora lepiej jest zewrzeć, a to w tym celu, by uniknąć powstania różnicy napięć na zaciskach uzwojeń, wskutek ich pojemności. Napięcie probiercze może być wyznaczone albo bezpośrednio za pomocą woltomierza elektrostatycznego, lub iskiernika kulowego, albo jako iloczyn napięcia po stronie niskiej transformatora probierczego przez przekładnię tego transformatora.

*) Np. według wzoru $\frac{U_p}{2} + \frac{U_p}{2\sqrt{t}}$, gdzie U_p oznacza napięcie probiercze; t — czas trwania próby w minutach.



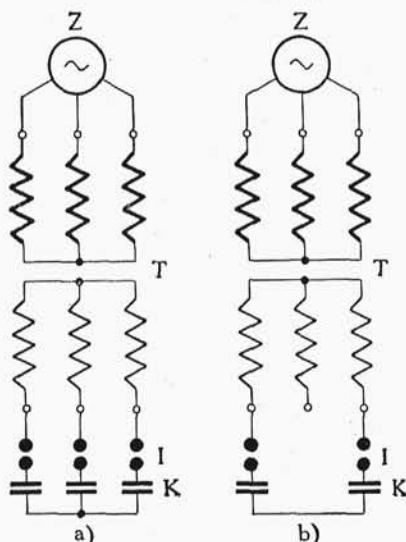
Rys. 278.

§ 51. Próba izolacji na fale uskokowe.

„Uwaga. Próba ta nie jest obowiązująca. Odbiorca ma prawo żądać tej próby tylko wtedy, gdy zostało to wyraźnie przewidziane w umowie, lub zamówieniu”...

„...Próba ta ma wykazać, czy wytrzymałość izolacji zwojów na fale uskokowe, powstające przy praktycznej pracy, jest dostateczna.

Uzwojenia gotowych transformatorów na napięcia, których wartość U jest zawarta w granicach od 2,5 do 60 kV, próbuje się w wytwórni niezależnie od grupy ich układu połączeń, według jednego z poniżej podanych schematów:



Rys. 279;

- a) Transformatory zwykłe trójfazowe.
b) Transformatory zwykłe jedno i trójfazowe.

Uzwojenia transformatora (T) łączy się poprzez iskierniki (I), których kule winny posiadać średnicę conajmniej 50 mm, do kondensatorów lub kabli (K), których pojemność podaje tablica.

Napięcie U w kV,	Pojemność w każdym przewodzie najmniej μF	Stosowany rodzaj pojemności
2,5—6	0,05	Kabel lub kondensator
do—15	0,02	"
do—35	0,01	"
do—60	0,005	Kondensator

Przy użyciu kabla trójżyłowego należy dobrać jego pojemność roboczą według podanej wyżej wartości. Pojem-

ność robocza kabla trójżyłowego jest dwukrotnie większa od pojemności dwóch jego przewodów, które są dołączone do źródła prądu, podczas gdy trzeci przewód pozostaje odłączony.

Odstęp między kulami w każdym iskierniku nastawia się na przeskok odpowiadający napięciu 1,1 U (patrz PNE 35). Transformator wzbudza się ze źródła prądu napięciem, wynoszącym 1,3 U. Napięcie źródła prądu powinno być praktycznie sinusoidalne o co najmniej nominalnej częstotliwości próbowanego transformatora.

Iskiernik zapala się w sposób dowolny, np. przez chwilowe zbliżenie kul, albo chwilowe metaliczne ich połączenie.

Gra iskry winna trwać 10 sek., przyczem przerwa iskiernika powinna być poddana działaniu prądu powietrza o prędkości około 3 m/sek. Po próbie należy niezwłocznie rozładować kondensatory, czy też kable. Pod wpływem przeskoku iskier kondensatory otrzymują co chwila ładunek innego znaku, wywołany napięciem próbowanego uzwojenia, przyczem w uzwojeniu wpada fala uskokowa przy każdej raptownej zmianie ładunku.

Przy wykonywaniu połączeń zaleca się używanie możliwie krótkich przewodów, gdyż zbyt długie niekorzystnie wpływają na poprawność próby. Transformatory wielofazowe mogą być próbowane w układzie jednofazowym, przyczem jednak należy zmieniać zaciski tak, by każda z faz była poddana próbie na fale uskokowe (patrz. rys. 219).

Wynik próby jest zadowalający, jeżeli nie nastąpiło przebicie izolacji sąsiednich zwojów, co należy stwierdzić przez próbę podaną w § 52".

§ 52. Próba izolacji zwojów.

„Próba ta ma wykazać, czy wytrzymałość izolacji sąsiednich zwojów jest dostateczna, albo czy też nie nastąpiło jej uszkodzenie przy próbie na fale uskokowe (patrz § 51).

Próbę tę wykonywa się podczas pracy jałowej transformatora przez dołączenie go do źródła prądu o napięciu probierczym, którego wielkość podaje tabela.

Napięcie probiercze przy próbie izolacji zwojów.

Poz.	U z w o j e n i a	Stosunek napięcia probierczego do nap. nominalnego
1	Wszelkich transformatorów z wyjątkiem podanych w poz. 3.	do 1000 kVA
2		powyżej 1000 kVA
3	Transformatorów stale połączonych ze szkieletem oraz ze stopniowaną izolacją względem szkieletu.	2

Próba winna trwać 5 minut. Napięcie probiercze powinno być praktycznie sinusoidalne, a częstotliwość jego może być przytem odpowiednio powiększona*). Wynik próby jest zadowalający, jeżeli nie nastąpiło przebicie i jeżeli nie zaobserwowano zjawisk towarzyszących instnieniu w uzwojeniach zwartych zwojów".

*) By prąd magnesujący nie wzrósł nadmiernie.

