

### 1.3.2. Transformatory probiercze wielkoprądowe

#### 1.3.2.1. Wymagania dotyczące transformatorów wielkoprądowych pracujących w poszczególnych układach probierczych

Przeprowadzanie badań wielkoprądowych wymienionych w punkcie 1.3.1. stawia przed transformatorami wielkoprądowymi następujące zróżnicowane wymagania:

1. Transformatory służące do przeprowadzania prób nagrzewania torów prądowych, zestyków i uzwojeń aparatów przy przepływie długotrwałym prądów probierczych powinny być budowane jako wielozakresowe, dające długotrwale szeroki zakres prądów od 200 A do 6000 (10.000)A przy stosunkowo niewielkim napięciu, rzędu kilku do kilkunastu V. Transformatory te - prostej budowy - nie wymagają specjalnych wzmocnień uodporniających je na oddziaływania elektrodynamiczne ani silniejszej izolacji.

2. Transformatory do sprawdzania wyzwalaczy i przekaźników nadprądowych odpowiadają w zasadzie wymaganiom punktu A, jedynie przy powiększeniu liczby niższych, dostosowanych do prądów znamionowych wyzwalaczy (przekaźników) zakresów prądowych (2 - 600 A). Z uwagi na krótsze, rozdzielone przerwami okresy poboru prądów probierczych przy tego rodzaju badaniach wyzyskiwać możemy w używanych do tego celu transformatorach moc większą od znamionowej, odpowiadającą pracy przerywanej. Przy tym trzeba pamiętać, że w przypadku większej oporności wyzwalacza (przekaźnika) dysponować trzeba będzie transformatorem o większej mocy wobec tego, że zmiany oporności uzwojenia wyzwalacza (przekaźnika) w czasie ruchu zwory znacznie wpływają na wartość prądu probierczego.

3. Transformatory wielkoprądowe do badania przekładników prądowych z uwagi na znaczne oporności badanych obiektów muszą z reguły mieć znacznie większe moce niż w przypadku badań zestyków i torów prądowych nie współpracujących z obwodami magnetycznymi.

Przy sprawdzaniu uchybów przekładników prądowych transformator wielkoprądowy zasilający przekładniki badany i wzorcowy w układzie mostka kompensacyjnego powinien wraz z członem re-

gulacyjnym mieć moc na tyle dużą, aby obciążenie układem probierczym nie powodowało wyraźnego odkształcenia sinusoidy prądu probierczego. Wpłynęłoby to bowiem ujemnie na prawidłowość działania metody kompensacyjnej. W układach tych jednakże wystarczają zwykle transformatory o mocy rzędu (1 - 10)kVA.

Znacznie większe wymagania stawiane są transformatorowi zasilającemu układ służący do wyznaczania liczby przetężeniowej metodą bezpośrednią. Wtedy bowiem musimy pobierać z niego prądy w zakresie wartości od kilkudziesięciu A do kilkunastu kA i to przy znacznych napięciach. Przekładniki prądowe w obszarze 10% uchybów pracują bowiem przy dużej indukcji, a więc napięcie na zaciskach przekładników jest znacznie większe, niż przy pracy znamionowej. W konsekwencji napięcie na wyjściu transformatora probierczego musi odpowiednio wzrosnąć - stąd też i moc takiego transformatora rośnie do kilkudziesięciu i więcej kVA.

Zbliżone do ostatnich wymagania stwarza też układ probierczy do sprawdzania pracy przekładnika przy otwartym uzwojeniu wtórnym. Nie zajmując się obecnie bliżej tym zagadnieniem, stwierdzimy jedynie, że wymaga się tutaj przepływu prądu sinusoidalnego z małą, określoną przepisami, zawartością wyższych harmonicznych. Aby to zapewnić musimy transformator wielkoprądowy obciążyć nie tylko przekładnikiem badanym o stosunkowo znacznej oporności (stanowiącym oporność indukcyjną nieliniową) i przekładnikiem pomiarowym - ale dodatkowo indukcyjnością liniową, o wartości o tyle większej od nieliniowej indukcyjności przekładnika badanego, aby wymusić w obwodzie przepływ prądu "dostatecznie" sinusoidalnego. Można tu wspomnieć, że często badania te, z uwagi na trudności nastawiania dużych prądów po stronie pierwotnej przekładnika badanego, prowadzi się przy zasilaniu przekładnika od strony wtórnej i przy otwartym uzwojeniu pierwotnym. Jak poprzednio, przepuszcza się wtedy prąd równy (100 - 200)% znamionowego prądu uzwojenia (w tym przypadku wtórnego) przekładnika, pobieranego z transformatora probierczego o napięciu wtórnym rzędu kilku kV i prądzie wtórnym rzędu (5 - 10)A przy znamionowym prądzie wtórnym przekładnika równym np. 5 A.

4. Transformatory wielkopiędowe słuŹące do przeprowadzania badañ zwarciowej wytrzymałoci cieplnej i elektrodynamicznej aparatów elektrycznych stanowią juŹ jednostki duŹe o mocach od kilkuset kVA do dziesiátków MVA. Stanowią one bowiem Źródła bardzo duŹych prądów o wartościcach największych (chwilowych) do 200 (500) kA. Przy takich prądach i koniecznych wymiarach układów probierczych spadki napięcia wypadają duŹe - stąd teŹ i napięcia wtórne tych transformatorów wynoszą zwykle od 100 do 1000 V. Z uwagi na bardzo duŹe obciężanie cieplne i elektrodynamiczne tych transformatorów, wymagają one szczególnie mocnej budowy i zastosowania środków zapewniających ich dostateczną wytrzymałość cieplną.

#### 1.3.2.2. Zasady doboru parametrów transformatora wielkopiędowego

Dla objaśnienia postępowania przy doborze parametrów transformatora wielkopiędowego zatrzymamy się na przykładzie sformułowania danych dla transformatora wielkopiędowego średniej mocy, pozwalającego na przeprowadzenie omawianych badañ prądowych różnych aparatów elektrycznych.

Przed wszystkim wymagamy, aby transformator ten pozwolił na wykonywanie prób nagrzewania aparatów elektrycznych w zakresie prądów długotrwałych do 6000 A. Znalezione i założone w związku z tym parametry transformatora zdecydują z kolei o innych jego możliwościach eksploatacyjnych.

Dla ustalenia wartości napięcia po stronie wtórnej (wielkopiędowej) transformatora możemy wyjść ze stwierdzonej doświadczalnie wartości 1 - 2 V spadku napięcia na każde 1000 A prądu, co odpowiada średnim warunkom budowy tego rodzaju wielkopiędowych układów probierczych przy założeniu długości obwodu rzędu 5 mb (przy indukcyjności 1 mb rzędu  $1\mu$  H i przy pominięciu pomijalnie małej oporności czynnej obwodu).

Otrzymujemy wtedy wartość napięcia uzwojenia wielkopiędowego

$$u_2 = 1,5 \text{ V/kA} \cdot 6 \text{ kA} = 9 \text{ V}.$$

Należy tu zaznaczyć, Źe przyjęta przez nas długość obwodu wtórnego 5 m nie jest wygórowana, jeśli zwaŹymy, Źe składa się

na nią długość doprowadzeń od zacisków uzwojenia wtórnego i długość np. trzech połączonych szeregowo biegunów odłącznika odłączników wysokiego napięcia.

Ostatecznie przy przyjętym napięciu i prądzie pobieranym z uzwojenia wtórnego moc użyteczna transformatora wielkoprądowego wyniesie

$$S_2 = J_2 \cdot u_2 = 6 \text{ kA} \cdot 9 \text{ V} = 54 \text{ kVA}.$$

Poszczególne uzwojenia transformatora wielkoprądowego najlepiej jest kształtować jako wielocewkowe z cewkami przełączalnymi.

W rozpatrywanym przykładzie możemy przyjąć, że uzwojenia wielkoprądowe i zasilające składać się będą każde z 4 cewek. Przy tym uzwojenie wielkoprądowe będzie posiadało cewki jednozwojowe o obciążalności ciągłej pojedynczej cewki równej 1500 A. Wtedy przy równoległym, szeregowo równoległym i szeregowym połączeniu cewek będziemy mogli uzyskać prądy kolejno 6000 A, 3000 A i 1500 A przy napięciach odpowiednio 9 V, 18 V i 36 V.

Dla prób prądami mniejszymi od 1000 A niewygodnie jest korzystać z wymienionego wyżej uzwojenia wtórnego, składającego się z 4 zwojów. Daje ono bowiem stosunkowo niskie napięcie użyteczne i nie pozwala na wykorzystanie pełnej mocy transformatora przy mniejszych prądach. Dlatego też celowym jest w rozpatrywanym przypadku dodanie drugiego, również czterocewkowego uzwojenia wtórnego. Przyjmując liczbę zwojów pojedynczej cewki równą 10 i jej obciążalność ciągłą równą 150 A otrzymamy odpowiednio przy równoległym, szeregowo równoległym i szeregowym połączeniu cewek dopuszczalne prądy kolejno 600 A, 300 A i 150 A przy napięciach 90 V, 180 V, 360 V.

Dla uzwojenia pierwotnego (zasilającego) przyjmujemy napięcie zasilania równe 380 V~ ze względu zarówno na mniejsze prądy pobierane z sieci jak i równomierniejsze obciążenie faz. Przy 4 cewkach uzwojenia zasilającego po 40 zwojów każda i przy ich szeregowo równoległym połączeniu otrzymujemy wartość napięcia przypadającego na jeden zwój 9 V, którą to wartość przyjęliśmy jako znamionową dla wszystkich uzwojeń. Wobec tego po-

łączenie równoległe cewek uzwojenia zasilającego pozwala na krótkotrwałe przeciążenie transformatora (w wyniku doprowadzenia podwójnego napięcia na jeden zwój). Natomiast połączenie szeregowo cewek pozwala na zmniejszenie poboru prądu z sieci zasilającej przy odpowiednio mniejszej mocy odbieranej z transformatora.

Wyznaczone powyżej liczby zwojów poszczególnych uzwojeń transformatora oraz ich przejrzyste sekcjonowanie pozwalają na bardzo różnorodne łączenie tych uzwojeń, najlepiej odpowiadające każdorazowym warunkom probierczym w obwodzie zasilanym przez rozpatrywany transformator.

Rozpatrzmy obecnie przykładowo kilka takich układów przy ustalonych uprzednio danych wyjściowych, a mianowicie:

liczba zwojów jednej cewki uzwojenia pierwotnego (zasilającego):	$z_1 = 20,$
liczba zwojów jednej cewki uzwojenia wtórnego (wielkoprądowego I):	$z'_2 = 1,$
liczba zwojów jednej cewki uzwojenia wtórnego (wielkoprądowego II):	$z''_2 = 10,$
liczba cewek w każdym z powyższych uzwojeń:	4,
napięcie zasilające:	380 V~.

1. Układ dla warunków znamionowych i pracy uzwojenia wielkoprądowego I przy prądzie  $J_2 = 6000$  A (rys. 14a).

Przy połączeniu szeregowo-równoległym cewek uzwojenia zasilającego jego wypadkowa liczba zwojów wyniesie

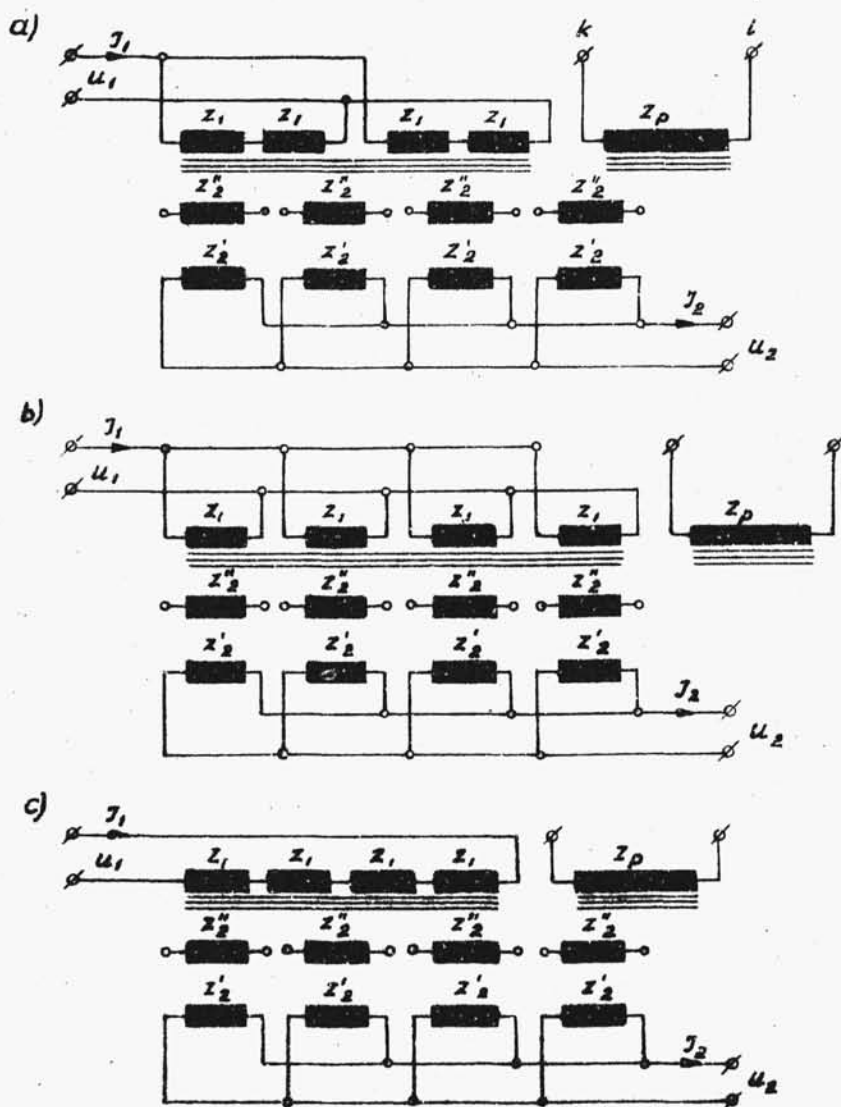
$$\sum z_1 = 40 .$$

Przy połączeniu równoległym cewek jednozwojowych uzwojenia wielkoprądowego I jego wypadkowa liczba zwojów wyniesie

$$\sum z'_2 = 1 ,$$

zatem przekładnia zwojowa w tym układzie

$$j = \frac{\sum z_1}{\sum z'_2} = \frac{40}{1} = 40 .$$



Rys.14. Przykładowe możliwości połączeń uzwojeń transformatora wielkopiętrowego

Przy założonym prądzie wtórnym  $J_2 = 6000$  A prąd pierwotny  $J_1$  wyniesie

$$J_1 \approx \frac{1}{9} J_2 = \frac{6000 \text{ A}}{40} = 150 \text{ A} .$$

Z uwagi na wewnętrzny spadek napięcia - napięcie wtórne jest mniejsze od wynikającego z przekładni zwojowej i wynosi - jak założyliśmy wyżej 9 V/1 zwój.

$$u_2 < \frac{1}{j} u_1 = \frac{380 \text{ V}}{40} = 9,5 \text{ V},$$

$$u_2 = 9 \text{ V}.$$

Zatem moc pobierana przez uzwojenie zasilające transformatora wyniesie

$$S_1 = J_1 \cdot u_1 = 150 \text{ A} \cdot 380 \text{ V} = 57 \text{ kVA}.$$

Moc zaś pobierana z uzwojenia wielkoprądowego transformatora w dyskutowanym układzie połączeń wyniesie

$$S_2 = J_2 \cdot u_2 = 6,0 \text{ kA} \cdot 9 \text{ V} = 54 \text{ kVA}.$$

2. Układ dla przypadku największej mocy przepuszczanej przez transformator i pracy uzwojenia wielkoprądowego I z prądem  $J_2 = 6000 \text{ A}$  (rys.14b) - dane przybliżone nie uwzględniają znacznego wzrostu prądu magnesującego wskutek wysokiej indukcji w rdzeniu, wzrostu rozproszenia i spadku napięcia w sieci zasilającej przy obciążeniu mocą ca 150 kVA.

Przy połączeniu równoległym cewek uzwojenia zasilającego i równoległym połączeniu cewek uzwojenia wielkoprądowego I

$$\sum z_1 = 20,$$

$$\sum z'_2 = 1,$$

zatem

$$j = \frac{\sum z_1}{\sum z'_2} = 20.$$

Przy założonym prądzie wtórnym  $J_2 = 6000 \text{ A}$  prąd pierwotny  $J_1$  wyniesie

$$J_1 \approx \frac{1}{j} J_2 = \frac{6000 \text{ A}}{20} = 300 \text{ A}.$$

Odpowiednio

$$u_2 < \frac{1}{j} u_1 = \frac{1}{20} 380 = 19 \text{ V},$$

$$u_2 = 18 \text{ V},$$

$$S_1 = J_1 u_1 = 300 \text{ A} \cdot 380 \text{ V} = 114 \text{ kVA},$$

$$S_2 = J_2 u_2 = 6000 \text{ A} \cdot 18 \text{ V} = 108 \text{ kVA}.$$

3. Układ dla przypadku najmniejszej mocy pobieranej z sieci przy pracy uzwojenia wielkoprądowego I z prądem  $J_2 = 6000 \text{ A}$  (rys.14c).

Przy połączeniu szeregowym cewek uzwojenia zasilającego i równoległym połączeniu cewek uzwojenia wielkoprądowego I

$$\sum z_1 = 80,$$

$$\sum z'_2 = 1,$$

zatem

$$j = \frac{\sum z_1}{\sum z'_2} = 80.$$

Przy założonym prądzie wtórnym  $J_2 = 6000 \text{ A}$  prąd pierwotny  $J_1$  wyniesie

$$J_1 = \frac{1}{j} \cdot J_2 = \frac{6000 \text{ A}}{80} = 75 \text{ A}.$$

Odpowiednio

$$u_2 < \frac{1}{j} u_1 = \frac{1}{80} \cdot 380 = 4,75,$$

$$u_2 = 4,5 \text{ V},$$

$$S_1 = J_1 u_1 = 75 \text{ A} \cdot 380 \text{ V} = 28,5 \text{ kVA},$$

$$S_2 = J_2 u_2 = 6000 \text{ A} \cdot 4,5 \text{ V} = 27 \text{ kVA}.$$

Układ ten, z uwagi na małe, rzędu 4,5 V napięcie wtórne daje się zastosować tylko przy bardzo małej oporności obwodu probierczego.

Obok wyżej omówionych układów połączeń uzwojeń istnieje oczywiście cały szereg innych, których przydatność dla konkret-



nych potrzeb badawczych możemy ocenić korzystając z naszkicowanej wyżej metody. Chwilę uwagi poświęcić jeszcze musimy kwestii wykorzystywania uzwojenia pomiarowego wbudowanego w transformator wielkopiędowy.

Uzwojenie to spełnia rolę wielozakresowego przekładnika prądowego, dopasowanego do możliwości prądowych transformatora wielkopiędowego i korzystanie z niego w przypadku pracy pojedynczego transformatora nie stwarza dodatkowych wątpliwości. Trzeba jedynie pamiętać o tym, aby włączony w obwód uzwojenia pomiarowego amperomierz nie powodował powstawania uchybu pomiarowego od oddziaływania pola magnetycznego prądu w obwodzie wielkopiędowym. W tym celu trzeba stosować amperomierze astatyczne albo możliwie znacznie oddalać amperomierz od toru wielkopiędowego.

Natomiast w przypadku równoległego łączenia ze sobą dwóch lub więcej transformatorów wielkopiędowych należy starać się o to, aby mierzyć prąd wypadkowy przepływający w obwodzie probierczym wydzielonym przekładnikiem prądowym. Korzystanie w tym przypadku z wbudowanych w transformatory wielkopiędowe uzwojeń pomiarowych może stać się źródłem bardzo dużych błędów wynikłych z nieuwzględniania rozpiędy prądów między poszczególnymi transformatorami.

#### 1.3.2.3. Nastawianie prądu w transformatorach wielkopiędowych

Nastawianie prądu w transformatorach wielkopiędowych prowadzi się najczęściej od strony zasilania. Wynika to z większych trudności technicznych związanych z ewentualnym nastawianiem prądu po stronie wtórnej.

Jako elementy nastawcze współpracujące z transformatorami wielkopiędowymi używane są:

- 1) transformatory lub autotransformatory nastawcze,
- 2) dławiki z wyciąganym rdzeniem lub z nastawianą szczeliną,
- 3) regulatory indukcyjne,
- 4) dławiki powietrzne (bezerdzeniowe),
- 5) oporniki (w bardzo rzadkich przypadkach).

1. Zastosowanie transformatorów i autotransformatorów nastawczych (ze szczotkami) ograniczone jest do średnich wartości mocy rzędu 20 kVA, a ograniczenie to powodowane jest tutaj trudną pracą szczotek ruchomych. W urządzeniach tych bowiem szczotka toczy się po uzwojeniu przylegając doń punktowo lub co najwyżej liniowo, przy czym w miejscu styczności przenosi ona nie tylko prądy obciążenia układu ale dodatkowo prąd ze zwartego zwoju.

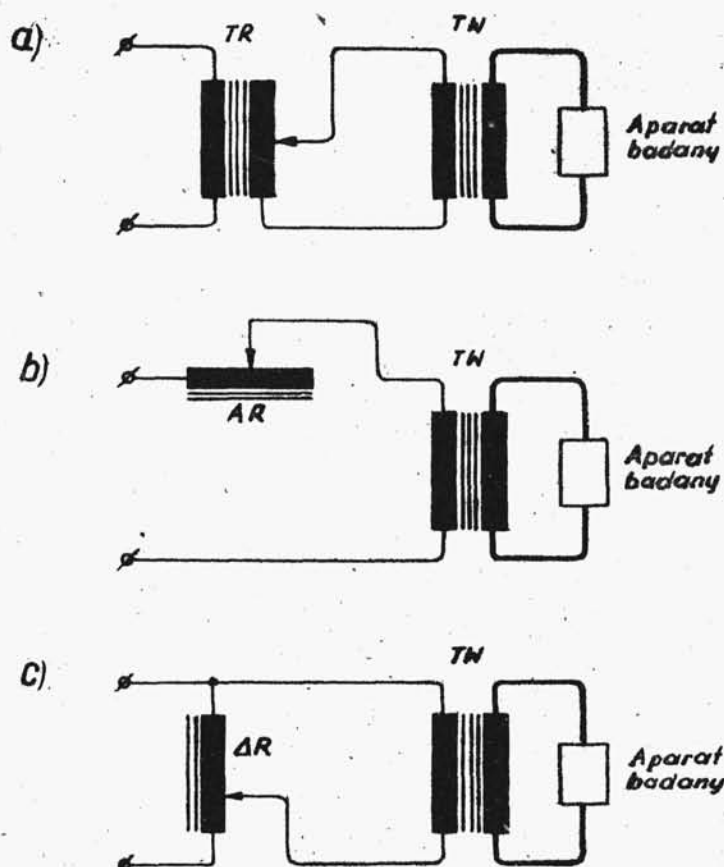
Powoduje to dodatkowe nagrzewanie szczotki, które co najwyżej rozkładać możemy na pewną skończoną liczbę szczotek pracujących równolegle, skoro nie możemy tutaj, jak w maszynie elektrycznej powiększać powierzchni szczotki.

Z porównania powyższych układów nastawiania przy użyciu transformatora regulacyjnego i autotransformatora wynika, że na ogół ekonomiczniesze jest nastawianie przy użyciu autotransformatora.

W przypadku bowiem przykładowego nastawiania w kierunku większych prądów, prąd po stronie zasilania transformatora wielkoprądowego (prąd regulowany) obciąża pełne uzwojenie transformatora nastawczego dając rosnącą z prądem stratę mocy. W przypadku natomiast autotransformatora pracującego w układzie dławika (rys.15b) przy poborze większej mocy z transformatora wielkoprądowego część lub nawet całe uzwojenie autotransformatora nie pracuje.

Wreszcie w najczęściej stosowanym układzie autotransformatora pracującego w jego normalnym układzie połączeń prądy pierwotny i wtórny autotransformatora odejmują się - w wyniku czego w miarę wzrostu prądu przy tym samym obiekcie badanym straty w miedzi autotransformatora maleją. W ten sposób moc przepustowa autotransformatora w normalnym układzie pracy jest tym większa, im jego przekładnia jest bliższa jedności. Stąd w takim układzie nastawiania transformatora wielkoprądowego należy dążyć do tego, aby drogą odpowiedniego przełączenia transformatora pracować właśnie w pobliżu tej właśnie najkorzystniejszej - bliskiej jedności - przekładni autotransformatora.

2. Jako elementy nastawcze współpracujące z transformatorami wielkoprądowymi małej mocy powszechne zastosowanie znalaz-



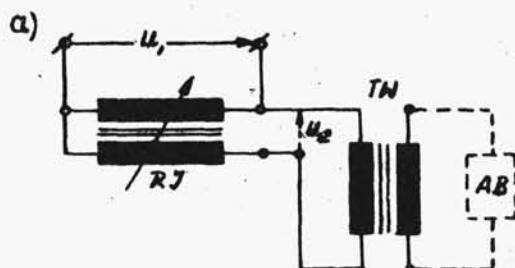
Rys.15. Nastawianie prądu w transformatorze wielkopiędowym TW przy użyciu: a - transformatora nastawczego TR, b - autotransformatora nastawczego AR pracującego jako dławik, c - autotransformatora nastawczego

ły dławiki z rdzeniem ruchomym. W dławiku takim nie występuje szcztkowy element komutacyjny, a odpowiednio płynne zmniejszanie lub powiększanie oporności biernej dławika uzyskuje się przez wyciąganie lub wsuwanie ruchomej części rdzenia. Dodatkowo nastawianie skokowe oporności pozornej dławika umożliwia sekcjonowanie jego uzwojenia.

3. Kolejna niezmiernie wygodna w eksploatacji możliwość nastawiania transformatorów wielkopiędowych polega na zastosowaniu regulatorów indukcyjnych.

Regulator indukcyjny traktować można jak wiadomo, jako specjalną odmianę autotransformatora regulacyjnego, stanowiącego w istocie zahamowany silnik indukcyjny.

W silniku takim napięcie wirnika (strony wtórnej takiego transformatora) zależy od wzajemnego położenia uzwojeń stojana i wirnika i przez obrót uzwojenia wirnika względem nieruchomego uzwojenia stojana może być zmieniane w granicach od 0 do

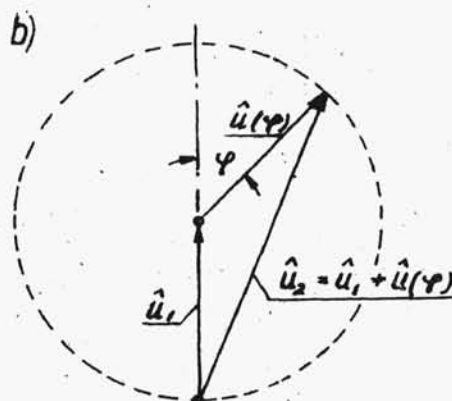


podwójnego napięcia zasilania stojana, czyli (rys.16)

$$\hat{u}_2 = \hat{u}_1 + \hat{u}(\varphi),$$

gdzie

$\hat{u}(\varphi)$  - napięcie wzbudzone polem stojana w uzwojeniu wirnika, będące funkcją wzajemnego położenia tych uzwojeń.



Wartości: największa i najmniejsza napięcia wtórnego regulatora wynoszą

$$(u_2)_{\max} = u_1 + u_1, \\ (u_2)_{\min}$$

czyli zakres regulacji napięcia dla strony wtórnej wynosi

$$u_2 = 0 \div 2 u_1.$$

Rys.16. Szkic układu transformatora wielkopięrduowego nastawianego regulatorem indukcyjnym: RJ - regulator indukcyjny, TW - transformator wielkopięrduowy, AB - aparat badany

Dla celów nastawiania transformatorów wielkopięrduowych używa się zwykle regulatorów indukcyjnych jednofazowych.

Regulatory indukcyjne charakteryzowane są oprócz zakresu nastawień napięcia mocą tzw. przejściową regulatora. Dla regulatora jednofazowego moc ta jest określona zależnością

$$S_p = (u_2)_{\max} \cdot J_2,$$

$$S_p = 2 \cdot u_1 \cdot J_2,$$

gdzie  $J_2$  - dopuszczalny prąd uzwojenia wirnika (wtórnego) regulatora.

Przykładowo regulator indukcyjny krajowy o zakresie nastawiania napięcia 0 - 440 V ( $u_1 = 220$  V) posiada przy prądzie  $J_2 = 148$  A moc przejściową znamionową

$$S_{pn} = 2 \cdot 220 \text{ V} \cdot 148 \text{ A} = 65 \text{ kVA}.$$

Jest to regulator jednofazowy typu RJ0-45/35-2.

Przy doborze regulatora indukcyjnego dla transformatora wielkopięradowego zważyć musimy zatem, aby dobrać prawidłowo moc regulatora indukcyjnego do mocy transformatora. Przy ograniczeniu bowiem przykładowo dla transformatora wielkopięradowego o mocy 33 kVA dopuszczalnego napięcia zasilającego do 220 V, będziemy mogli dla naszego przykładowego regulatora wykorzystać jedynie połowę jego znamionowej mocy przejściowej

$$S_p = 220 \text{ V} \cdot 148 \text{ A} = 32,5 \text{ kVA} = \frac{1}{2} S_{pn}.$$

W takim przypadku rozważany regulator indukcyjny o znamionowej mocy przejściowej 65 kVA jest zaledwie odpowiedni dla potrzeb regulacji w pełnym zakresie mocy transformatora wielkopięradowego o mocy 33 kVA (omawiany później typ TW 33).

Regulatory indukcyjne umożliwiając regulację płynną i możliwą do zastosowania również w zakresie stosunkowo dużych mocy do ~ 100 kVA posiadają tę dotkliwą w niektórych przypadkach wadę, że dają zwykle zniekształconą krzywą prądu probierczego.

4. Ostatnią, jaka pozostała nam do omówienia metodą nastawiania prądu w transformatorach wielkopięradowych polega na zastosowaniu dławików bezrdzeniowych, stanowiących w sensie elektrycznym oporność liniową pozorną o bardzo małej składowej oporności czynnej (aczkolwiek względnie większej, niż w przypadku dławików z rdzeniem).

Zastosowanie dławików posiada tę podstawową zaletę, że nie zniekształca krzywej prądu probierczego. W tych też przypadkach, gdzie kształt tej krzywej posiada istotne znaczenie, a więc dla badań prądowych przekładników prądowych, wielkopięradowych badań zwarciovych aparatów elektrycznych - stosujemy z reguły dławiki bezrdzeniowe.

Z ich zastosowaniem wiążą się jednak pewne istotne kłopoty. Przede wszystkim dławiki te nie pozwalają na nastawianie ciągłej oporności (prądu) w obwodzie probierczym i w zasadzie bez kosztownych układów przełączających nie pozwalają na nastawianie prądu pod obciążeniem.

Aby z kolei nastawianie skokowe oporności takiego dławika uczynić jak najdrobniejsze pozostają dwie możliwości:

- stosowanie zestawów cewek,
- sekcjonowanie poszczególnych cewek.

Przy stosowaniu zestawów cewek ułożonych w określonej wzajemnie konfiguracji mamy już do dyspozycji stosunkowo szeroki wachlarz wartości indukcyjności poszczególnych kombinacji elementów zestawu. Pamiętajmy bowiem o tym, że przykładowo indukcyjność zestawu dwóch współosiowych jednakowo nawiniętych i zgodnie połączonych cewek można wyrazić zależnością

$$L_z = L_1 + L_2 + M_{12} ,$$

$L_1$  - indukcyjność własna cewki 1,

$L_2$  - indukcyjność własna cewki 2,

$M_{12}$  - indukcyjność wzajemna cewek 1 i 2.

Jeśli mamy zatem do dyspozycji na przykład współosiowy zestaw  $n$  cewek bezrdzeniowych, łącząc ze sobą cewkę powiedzmy skrajną kolejno z każdą następną, otrzymamy szereg malejących wartości indukcyjności (oporności) zestawu. Dławik taki zatem daje nam możliwość zarówno łączenia szeregowego  $n$  cewek dla określonej oporności zestawu, jak też w sposób dokładniejszy nastawiania tej oporności przez dołączenie cewek (cewki) odpowiednio geometrycznie ułożonych w zestawie. Wreszcie dla nastawiania oporności w granicach jednej cewki musi to być cewka podzielona na sekcje: warstwy, grupy warstw lub zwoje zależnie od konstrukcji.

Układ taki jest najbardziej odpowiedni dla nastawiania transformatorów dużych, zwłaszcza wielkoprądowych transformatorów zwarciovych, kiedy uzwojenie zasilające transformatora jest jednocewkowe.

W przypadku jednostek mniejszych, kiedy uzwojenie pierwotne transformatora wielkoprądowego jest wielocewkowe celowe jest dopasowanie do tego zestawu dławików nastawczych. Mając np. do czynienia z cztero-cewkowym uzwojeniem zasilającym transformatora wielkoprądowego dobieramy do tego zestaw 4 grup lub 4 pojedynczych dławików, które wymiarowane na prądy znamionowe cewek transformatora łączyć będziemy wraz z nimi w układy szeregowy, szeregowo równoległy i równoległy.

Zestaw taki wyposażony w dławiki odpowiednio sekcjonowane nie daje zwykle możliwości nastawiania w zakresie prądów mniejszych. Wtedy bowiem jego indukcyjność musiałaby być stosunkowo duża, co bardzo znacznie powiększa objętość i koszt dławika bezrdzeniowego. Stąd zwykle dławiki takie obejmują tylko zakres nastawiania większych prądów. Nastawianie natomiast w zakresie mniejszych prądów przejmuje wtedy transformator nastawczy (w zakresie prądów do  $\sim 20$  A) lub dławik nastawczy z rdzeniem. Przy prądach mniejszych urządzenia te pracują jeszcze poprawnie, m.in. nie zniekształcając krzywej prądu probierczego.

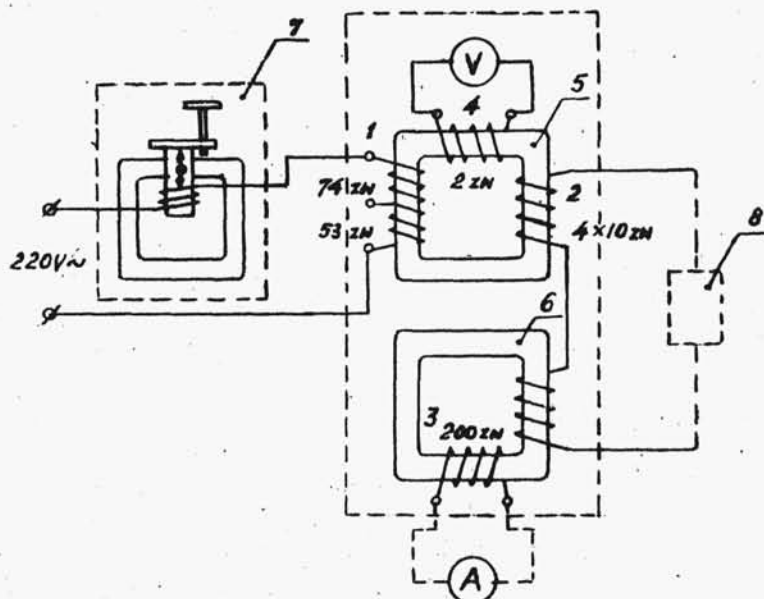
#### 1.3.2.4. Charakterystyki krajowych transformatorów wielkoprądowych różnej mocy

Transformatory wielkoprądowe dla celów badań prądowych produkowane są przez przemysł krajowy seryjnie, jeśli chodzi o transformatory małej mocy (500 i 1000 VA), częściowo średniej mocy (33 i 75 kVA) i w wykonaniach jednostkowych w przypadku transformatorów większej mocy.

1. Powszechne zastosowanie w pracowniach badania aparatów elektrycznych, elementów i układów zabezpieczeń i in. znalazły transformatory wielkoprądowe małej mocy, wykonywane jako jednofazowe przez Zakład A-1 (W-wa). Transformatory te o oznaczeniach typu odpowiednio TW 0,5 (0,5 kVA) i TW1 (1 kVA) spełniają z powodzeniem rolę źródeł wielkoprądowych w przypadku badań głównie torów prądowych, zestyków i uzwojeń o małej oporności - a więc głównie dla prowadzenia prób nagrzewania prądami długotrwałymi w ograniczonym zakresie prądów i prób wyzwalaczy i przekładników - również w ograniczonym zakresie.



Jako przykład podany jest na rys.17 schemat transformatora wielkoprądowego TW 0,5 (500 VA) z zaznaczonymi: przełączalnym uzwojeniem zasilającym 1, czterocewkowym uzwojeniem wielkoprą-



Rys.17. Schemat transformatora wielkoprądowego typu TW 0,5 (mocy 500 VA): 1 - uzwojenie zasilające, 2 - uzwojenie wielkoprądowe wbudowane, 3 - uzwojenie pomiarowe, 4 - uzwojenie pomiarowe stanu nasycenia rdzenia głównego 5, 5 - rdzeń główny, 6 - rdzeń pomiarowy, 7 - dławik regulacyjny, 8 - aparat badany

dowym wbudowanym 2, uzwojeniem pomiarowym 3 i dodatkowym uzwojeniem pomiarowym 4.

Uzwojenie zasilające umożliwia wyzyskanie pełnej mocy transformatora przy wykorzystaniu sekcji z 74 zwojów. Po dodaniu 53 zwojów drugiej sekcji pracujemy przy 127 zwojach i zmniejszonym poborze prądu z sieci w przypadku mniejszej oporności obwodu probierczego.

Uzwojenie wielkoprądowe 2 składa się z 4 cewek o obciążalności długotrwałej 25 A każda (a zatem 100 A przy 4 cewkach połączonych równolegle). Przy większych prądach w zakresie do najwyżej 1000 A uzwojenie wtórne wykonuje się przewlekając dodatkowo przewody przez okno rdzenia transformatora.



Dodatkowe uzwojenie pomiarowe 4 nawinięte na rdzeniu roboczym 4 wykorzystane tu jest dla przyłączenia woltomierza, wskazującego stan nasycenia rdzenia.

W zasadzie podobnie do transformatora TW 0,5 rozwiązany jest transformator TW1 z tą różnicą, że wprowadzono tu podział uzwojeń na większą liczbę cewek przystosowując go w ten sposób szczególnie do określonego zakresu prób obiektów o większej oporności tj. wyzwalaczy, przekaźników i przekładników prądowych.

Bliższe dane dotyczące układów połączeń i dopuszczalnych obciążalności dla tych transformatorów, podawane są na zamocowanych do nich trwale tablicach połączeń.

Dla ilustracji prześledzimy obecnie na przykładzie transformatora typu TW 0,5 jego przykładowe możliwości probiercze.

a. Chcemy wyregulować wyzwalacz pierwotny w zakresie prądów 50 - 100 A. Wg tablicy połączeń uzwojeń przyjmujemy połączenie równoległe cewek uzwojenia 2 z rys.17, dopuszczające stałe obciążanie prądem do 100 A. W założeniu oporności pozornej obwodu probierczego  $z_2$

$$z_2 = 0,05 \Omega.$$

Spadek napięcia na tej oporności przy prądzie 100 A wyniesie

$$u_2 = 0,05 \Omega \cdot 100 \text{ A} = 5 \text{ V}.$$

Napięciu temu zgodnie z przekładnią zwojową odpowiada napięcie, które trzeba doprowadzić do uzwojenia zasilającego

$$u_1 = u_2 \cdot \vartheta = 5 \text{ V} \cdot \frac{127}{10} = 63,5 \text{ V},$$

gdzie  $\vartheta = \frac{z_1}{z_2} = \frac{127}{10}$  (rys.17).

Reszta napięcia sieci  $220 \text{ V} - 63,5 \text{ V} = U_{d1} \approx 156,5 \text{ V}$  musi pozostać zdławiona np. na dławiku nastawczym.

b. Jeśli ten przykładowy wyzwalacz będziemy chcieli zbudować przy prądzie 200 A, wtedy otrzymamy

$$u_2 = z_2 \cdot J_2 = 0,05 \Omega \cdot 200 \text{ A} = 10 \text{ V},$$

czyli

$$u_1 = u_2 \cdot \gamma = 10 \cdot \frac{127}{10} = 127 \text{ V}.$$

Na dławiku pozostać teraz musi napięcie  $220 \text{ V} - 127 \text{ V} \cong 93 \text{ V}$ . Należy tu zaznaczyć, że przy napięciu 127 V doprowadzonym do uzwojenia zasilającego otrzymujemy napięcie 1 V/zwój, co dla tej konstrukcji daje już prawie nasycenie rdzenia. W tym już zresztą przypadku odbieramy z uzwojenia wtórnego moc  $S = 10 \text{ V} \cdot 200 \text{ A} = 2000 \text{ VA}$  - czterokrotnie większą od mocy znamionowej transformatora.

c. Przy rozpatrywanej przykładowo wartości oporności probierczej  $z_2 = 0,05 \Omega$  prądu większego np. 400 A osiągnąć już nie będziemy w stanie, wtedy bowiem

$$u_2 = z_2 \cdot J_2 = 0,05 \Omega \cdot 400 \text{ A} = 20 \text{ V},$$

$$u_1 = u_2 \cdot \gamma = 20 \text{ V} \cdot \frac{127}{10} = 254 \text{ V},$$

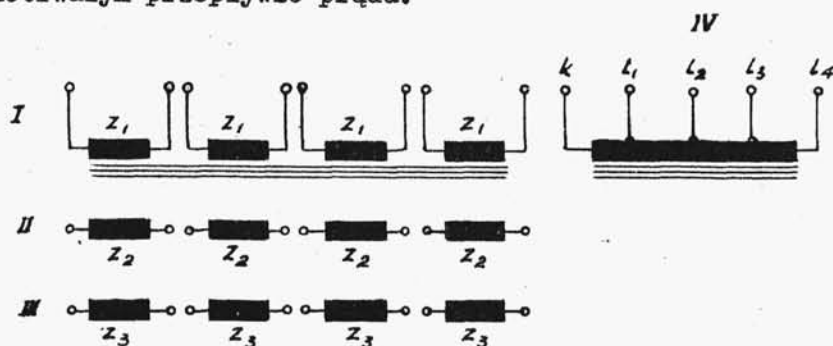
zatem

$$u_1 > 220 \text{ V}.$$

Przy tym podniesienie napięcia na zaciskach uzwojenia zasilającego np. transformatora do 254 V nic nie da, skoro nasycenie rdzenia w tym transformatorze występuje już przy ok. 130 V napięcia zasilającego.

2. Dla drugiej grupy transformatorów wielkoprądowych, tj. transformatorów średniej mocy, typowym przedstawicielem może być transformator wielkoprądowy typu TW 33 (prod. Zakładu A-1) o mocy znamionowej 33 kVA. Transformator ten przy tej mocy i dzięki odpowiedniemu zwymiarowaniu uzwojeń jest już źródłem prądu o bardzo dużym zakresie zastosowania - poczynając od prób nagrzewania prądami do 5400 A (6000 A) poprzez próby przekładników (z pewnymi ograniczeniami możliwości wykonywania badań przy rozwartym uzwojeniu wtórnym przekładników) do prób

wyzwalaczy, przekaźników i niektórych innych. W ograniczonym do kilkunastu kA wartości szczytowej prądu zakresie transformator ten pozwala również na przeprowadzanie badań np. zestyków przy krótkotrwałym przepływie prądu.



Rys.18. Transformator TW-33, schemat uzwojeń: I - uzwojenie zasilające z 4 cewkami o  $z_1 = 36$  zwojów każda, II - uzwojenie wielkoprądowe o mocy 25 kVA z 4 cewkami o  $z_2 = 12$  zwojów każda, III - uzwojenie wielkoprądowe o mocy 33 kVA z 4 pojedynczymi zwojami przewleczonymi ( $z_3=1$  zw), IV - uzwojenie pomiarowe wielozaczepowe: k -  $l_1 = 480$  zwojów, k -  $l_2 = 720$  zwojów, k -  $l_3 = 1200$  zwojów, k -  $l_4 = 2000$  zwojów

Tablica 1

Tablica dopuszczalnych obciążeń długotrwałych dla poszczególnych uzwojeń transformatora typu TW-33 (przy zasilaniu 220V~).

Uzwojenie I (zasilające)		Uzwojenie II (wielkoprądowe)		Uzwojenie III (wielkoprądowe)		
Połączenie cewek	Dopuszczalne obciążenie trwałe [A]	Połączenie cewek	Dopuszczalne obciążenie trwałe [A]	Połączenie zwojów	Liczba zwojów	Dopuszcz. obciążenie trwałe [A]
szeregowe	37,5	szeregowe	85	szeregowe	4	1350
szereg-równol.	75	szereg-równol.	170	szeregowe	3	1800
równoległe	150	równoległe	340	szereg-równol.	2	2700
				równoległe	1	5400

Dla transformatora tego podane są bliższe dane, a mianowicie schemat uzwojeń (rys.18), tablica dopuszczalnych obciążeń (tablica 1), tablica przekładni pomiarowych (tablica 2) oraz tablica schematów (tablica 3).

Tablica 2

Tablica przekładni przekładnika prądowego wbudowanego w transformator wielkoprądowy typu TW-33

Połączenie cewek uzwojenia II	Prąd. amperom. do zacisków	Przekładnia znamionowa	Liczba zwojów przenikających	Prąd. amperom. do zacisków	Przekładnia znamionowa
szeregowe	k - L <sub>1</sub>	50/5	1 równoległe	k - L <sub>1</sub>	2400/5
	k - L <sub>2</sub>	75/5		k - L <sub>2</sub>	3600/5
szeregowo- równoległe	k - L <sub>1</sub>	100/5		k - L <sub>3</sub>	6000/5
	k - L <sub>2</sub>	150/5		k - L <sub>4</sub>	10000/5
równoległe	k - L <sub>1</sub>	200/5	2 szeregowo- równoległe	k - L <sub>1</sub>	1200/5
	k - L <sub>2</sub>	300/5		k - L <sub>2</sub>	1800/5
				k - L <sub>3</sub>	3000/5
				k - L <sub>4</sub>	5000/5
Uwagi:	1. Nie pracujące uzwojenie pomiarowe należy zawsze zwierać 2. Przekładnik pomiarowy ma następujące dane: przekładnia 50 ÷ 10000/5 A/A ; klasa 0,2 ; moc 10 VA ; 50 °/s		3 szeregowe	k - L <sub>1</sub>	800/5
				k - L <sub>2</sub>	1200/5
				k - L <sub>3</sub>	2000/5
				k - L <sub>4</sub>	—
			4 szeregowe	k - L <sub>1</sub>	600/5
				k - L <sub>2</sub>	900/5
				k - L <sub>3</sub>	1500/5
				k - L <sub>4</sub>	2500/5

Uwagi:

1. Nie pracujące uzwojenie pomiarowe należy zawsze zwierać
2. Przekładnik pomiarowy ma następujące dane: przekładnia 50 ÷ 10000/5 A/A; klasa 0,2; moc 10 VA; 50 c/s




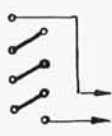
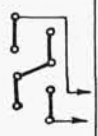

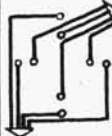


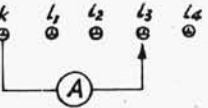
Obok omówionego wyżej typu transformatora o mocy 33 kVA (25 kVA) ten sam wytwórca buduje również transformatory analogicznej budowy o mocy 75 kVA o odpowiednio rozszerzonym zakresie zastosowania, zwłaszcza w zakresie badań przekładników.

Omówione dotąd transformatory wielkoprądowe w pewnych przypadkach nie są jednak odpowiednie - mianowicie wtedy, gdy z transformatora zasilac musimy obwód probierczy w zakresie prądów 5 - 300 A (przykładowo), przy stosunkowo znacznym napięciu, jak to ma miejsce często przy badaniach przekładników czy układów zabezpieczeniowych. Wtedy transformatory typu TW 0,5, czy TW 1 mają za małą obciążalność prądową przy więk-

szych napięciach wtórnych (za małą moc), transformatory zaś grupy następnej (TW 33 i TW 75) są dla tych potrzeb za duże.

Tablica 3

Tablica schematów połączeń cewek transformatora TW-33

Uzwojenie	Rodzaj połączenia		
	szeregowe	szereg-równol.	równoległe
I (Zasilające)			
II (Wielkopiędowe)			
III (Wielkopiędowe)	3 zwoje	4 zwoje	
			
IV (Pomiarowe)			

Wynikłą w ten sposób lukę należy zapełnić transformatorem wielkopiędowym o mocy rzędu 10 kVA przy odpowiednim do zadanych warunków probierczych doborze uzwojeń. Transformatory takie są obecnie wykonywane w kraju jednostkowo przez niektórych zainteresowanych użytkowników (Inst. Elektrotechniki).

3. Ostatnią interesującą nas grupę transformatorów wielkopiędowych stanowią transformatory dużej mocy, większej od 100 kVA, stosowane dla przeprowadzania badań wytrzymałości zwarciowej cieplnej i dynamicznej aparatów rozdzielczych. Typowym w naszych warunkach przedstawicielem tej grupy jest transformator wielkopiędowy zwarciowy jednofazowy suchy o mocy znamionowej 500 kVA opracowany i produkowany w Zakładach Wytwórczych Transformatorów M17 - Elta.

Transformator ten, opracowany dla zwarciowni Politechniki Gdańskiej wszedł do eksploatacji w zwarciowni Politechniki Warszawskiej (1 szt.), w laboratorium niskich napięć Instytutu Elektrotechniki (12 szt.), w laboratorium wielkoprądowym Zakładu A-10 (1 szt.) i Instytutu Energetyki (3 szt.). Z uwagi na znaczną moc transformator ten jest zasilany napięciem wysokim 15(6) kV przy istnieniu dodatkowych zaczepek nastawczych  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$ . Uzwojenie wtórne (wielkoprądowe) wykonane jest w postaci 8 cewek, z których każda zwymiarowana jest na napięcie 110 V. Przez łączenie równoległe, szeregowo równoległe i szeregowo poszczególnych cewek otrzymuje się napięcia wtórne 110, 220, 440 i 880 V. Wykorzystując wspomnianą wyżej możliwość nastawiania zaczepek po stronie zasilania można uzyskać po stronie wtórnej napięcia 120 ... 127, 380 ... 400, 500 i najwyższe napięcie 1000 V.

Możliwości probiercze tego transformatora przy bardzo krótkim obwodzie probierczym ocenić można na ok. 100 kA wartości skutecznej składowej okresowej prądu zwarciovego. (Przy ok.  $3\mu\text{H}$  indukcyjności obwodu i napięciu 100 V).

W przeciętnych obwodach probierczych i przy pomijalnej nawet oporności sieci zasilającej możliwości te są z reguły znacznie mniejsze i przy napięciu najniższym 100 V nie przekraczają zwykle 30 - 50 kA.

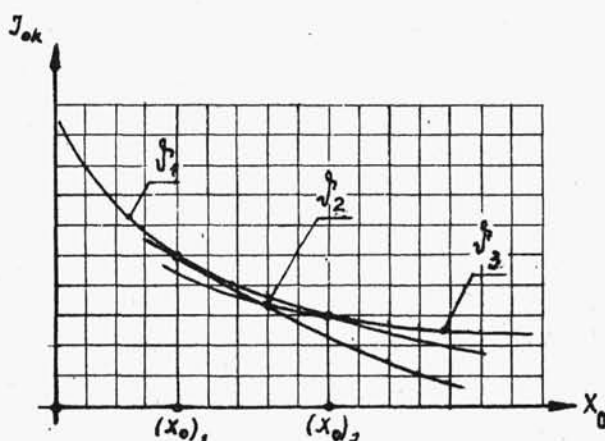
Zestawienie tych wartości wskazuje też na ogromne znaczenie, jakie dla osiągnięcia możliwie największych prądów w tego typu laboratorium posiada ukształtowanie obwodu probierczego o możliwie najmniejszej oporności (głównie indukcyjnej). Podobnie zatem jak przy transformatorach wielkoprądowych mniejszej mocy należy tu zestawiać jak najkrótsze obwody probiercze, przy jak najmniejszej powierzchni obejmowanej pętlą tego obwodu.

Oczywiście w przypadkach znacznych oporności aparatu badanego, np. przekładnika prądowego o małej przekładni, zabiegi przy zmniejszeniu oporności obwodu probierczego nie dadzą znaczniejszych efektów, zwłaszcza wtedy, gdy z uwagi na wartość oporności aparatu badanego musimy zasiląć obwód napięciem wyższym, np. 220, 440 czy nawet 880 V. Przy tym o ile dla naj-

korzystniejszych warunków oceniamy prąd probierczy tego transformatora na wspomniane już 100 kA przy połączeniu równoległym cewek uzwojenia wtórnego (110 V), o tyle przy napięciu 880 V prąd ten nie przekroczy już 10 kA (wartość skuteczna).

Oczywiście moc zwarciova transformatora jest wyższa niż wynika to z iloczynu przytoczonych wyżej wartości napięcia i prądu i wynosi przy napięciu zwarcia  $\sim 3,3\%^x$ , 15 MVA dla jednego transformatora jednofazowego.

Przy eksploatacji transformatorów wielkopiędowych szczególne znaczenie posiada wybór najwłaściwszego napięcia wtórnego do próby. W tym przypadku pamiętać musimy o jednym z ważniejszych twierdzeń elektrotechniki teoretycznej głoszącym, że przy zasilaniu z sieci sztywnej maksimum mocy biernej do prób w obwodzie indukcyjnym otrzymuje się przy jednakowych indukcyjnościach (lub opornościach biernych) transformatora oraz układu probierczego poza transformatorem (aparatu badanego, ew. dławika szeregowego, bocznika i szyn). W tablicy 4 zestawione są przybliżone wartości oporności zwarciovej transformatora dla różnych przekładni (malejące oczywiście z kwadratem tejże przekładni). Daje to stosunkowo duże skoki oporności i w zasadzie można mówić o dopasowaniu oporności transformatora i obwodu wtórnego w "pierwszym" przybliżeniu. Zależności te ilustruje jakościowo rys.19, gdzie przedstawiono wartości



Rys.19. Przebieg największych osiągalnych wartości składowej okresowej prądu zwarciowego w funkcji oporności  $x_0$  (toru wielkopiędowego i obiektu badanego) dla różnych przekładni transformatora

$$\mathcal{V}_1 > \mathcal{V}_2 > \mathcal{V}_3$$

x)

Napięcie zwarcia tego transformatora zależy od połączenia zarówno uzwojeń w.n. jak i uzwojeń n.n.



składowej okresowej prądu probierczego w funkcji oporności obwodu wtórnego, które można uzyskać przy różnych przekładniach transformatora.

Tablica 4

Napięcie znamionowe wtórne	110	220	440	880
Oporność zwarciova transformatora na poziomie tego napięcia w przybliżeniu ( $m\Omega$ )	0,8	3,2	13	52
Indukcyjność odpowiadająca tej oporności w przybliżeniu ( $\mu H$ )	2,5	10	40	160

### 1.3.3. Wielkopądowe źródła prądu stałego

Do przeprowadzania prób nagrzewania aparatów prądu stałego, zwłaszcza wtedy, gdy tor prądowy przebiega w sąsiedztwie mas ferromagnetycznych, konieczne są wielkopądowe źródła prądu stałego.

Źródła takie są konieczne również w przypadku niektórych badań nad obwodami magnetycznymi, do pomiarów oporności torów prądowych i zestyków, do badań specjalnych.

Ponieważ w przypadku takich badań wymagamy obok jednokierunkowości prądu również minimalnego procentu zawartości składowej zmiennej w prądzie probierczym, zatem jako źródła takiego prądu są stosowane praktycznie tylko prądnice prądu stałego, jedynie przy mniejszych prądach baterie akumulatorów. Do celów tych nie używa się na ogół prostowników nie tylko ze względu na znaczną zawartość składowej zmiennej również w przypadku prostowników zasilanych trójfazowo, ale również z uwagi na kłopotliwe nastawianie.

Wspomniane wyżej maszynowe źródła prądu stałego występują w postaci tzw. przetwornic galwanizacyjnych (używanych głównie do zasilania urządzeń galwanizacyjnych). Przetwornice takie - składają się z napędowego silnika indukcyjnego i prądnicy boczniowej prądu stałego. Z wykonanych katalogowych (produkowanych seryjnie) prądnice galwanizacyjne wykonywane są w zakresie mocy do 30 kW, przy największym prądzie twornika 2000 A i napięciu 7 - 15 V.