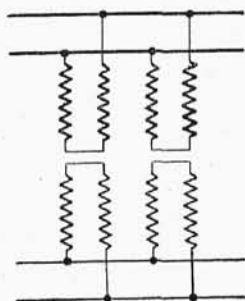


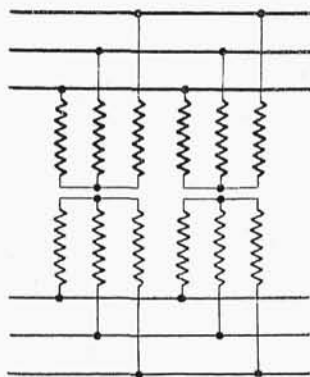
ROZDZIAŁ IV.

PRACA RÓWNOLEGŁA TRANSFORMATORÓW,

Pracą równoległą transformatorów nazywamy taką pracę, przy której uzwojenia pierwotne transformatorów są zasilane z szyn wspólnych, a uzwojenia wtórne pracują również na szyny wspólne^{*)}. Na rysunkach obok widzimy połączenie równoległe dwóch



Rys. 78.



Rys. 79.

transformatorów w wypadkach prądu jednofazowego i trójfazowego. Praca równoległa transform. różni się od pracy równoległej innych maszyn jak np. maszyn prądu stałego lub synchronicznych. O ile bowiem w maszynach wymienionych le-

ży w mocy obsługującego regulowanie pracy maszyny — przez zmianę wzbudzenia względnie momentu obrotowego silnika mechanicznego napędowego, o tyle transformator jest pozostawiony samemu sobie i jego współpraca równoległa z innym może być zła lub dobra w zależności od jego właściwości wewnętrznych — na które obsługujący żadnego wpływu niema.

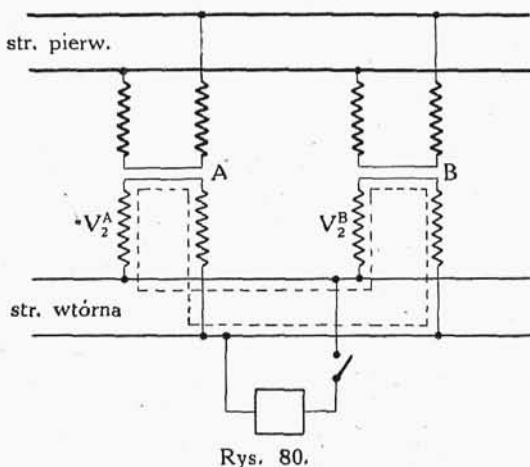
Pracę równoległą 2-ch transformatorów uważamy za doskonałą gdy:

^{*)} Wypadek, gdy uzwojenia wtórne pracują na szyny wspólne, a uzwojenia pierwotne są zasilane z sieci różnych — trzeba również nazwać pracą równoległą. Przy załączaniu należy przeprowadzić synchronizację. W dalszem będziemy mówili o pracy równoległej, odpowiadającej rys. 78 i 79.

- 1) przy biegu jałowym (sieci wtórnej nieobciążonej) nie ma przepływu prądu w obwodzie uzwojeń wtórnych;
- 2) ze wzrostem prądu obciążenia zewnętrznego, transformatory obciążają się równomiernie i osiągają swe prądy nominalne jednocześnie;
- 3) prądy obu transformatorów są ze sobą w fazie, czyli prąd obciążenia jest sumą arytmetyczną prądów obu transformatorów, lub, co na jedno wychodzi, moc pozorna odbiorników równa się sumie arytmetycznej mocy pozornych transformatorów.

Omówimy kolejno każdy z tych trzech warunków.

1) *Warunek pierwszy* będzie spełniony, jeżeli napięcia biegu jałowego w obu transformatorach po stronie wtórnej będą jednakowe—inne słowy: jeżeli przekładnie transformatorów będą jednakowe. Gdyby tego nie było, to już przy biegu jałowym mielibyśmy przepływ prądu wyrównawczego w obwodzie uzwojeń wtórnych, powodujący niepotrzebne straty mocy w uzwojeniach. Na rysunku 80 mamy dwa transformatory, których napięcia wtórne przy biegu jałowym nie są jednakowe $V_2^A \neq V_2^B$. Linia przerywana jest zaznaczony przepływ prądu wyrównawczego.



Rys. 80.

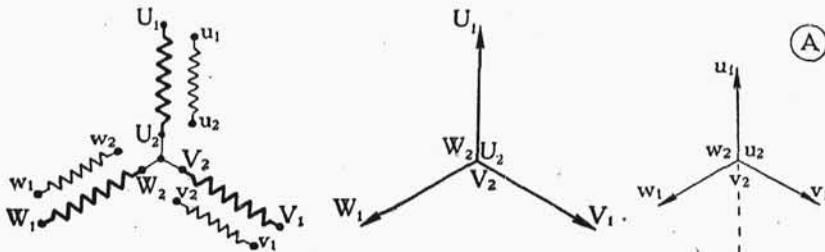
Już mała różnica w przekładni wywołuje znaczne prądy wyrównawcze—np. gdy przekładnie dwóch transformatorów różnią się tylko o 1% — w obwodzie uzwojeń wtórnych mamy przepływ prądu wyrównawczego rzędu kilkunastu % prądu nominalnego.

Gdy sieć wtórną obciążymy, to na prąd obciążenia każdego z transformatorów nałoży się prąd wyrównawczy, obciążający transformator o wyższym napięciu biegu jałowego i odciażający drugi. Nasze transformatory będą się obciążały nierównomiernie.

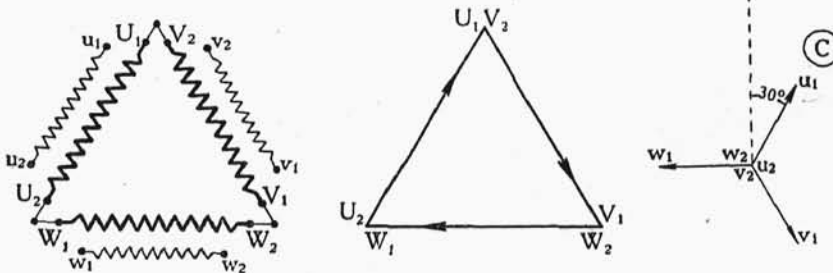
Przy transformatorach trójfazowych do warunku równości przekładni dochodzi jeszcze jeden: transformatory winny należeć do odpowiednich grup układów połączeń — mogących ze sobą pracować równolegle.

W transformatorach trójfazowych, bowiem, nie możemy się ograniczyć tylko do wymagania równości napięć wtórnych przy biegu jałowym, będzie nam zależało również i na tym, by te napięcia były ze sobą w fazie — czyli, by wartości chwilowe odpowiednich napięć międzyzacziskowych były w każdej chwili jednakowe. Tymczasem przy niektórych układach połączeń jest to niemożliwe np. transformator w układzie Δ/Δ nie może w żadnym wypadku pracować równoległe z transformatorem w układzie Δ/Δ . Najlepiej nam to wyjaśnią wykresy wektorowe przy obu połączeniach. (patrz. II — 3).

1) Gwiazda — gwiazda Δ/Δ :



2) Trójkąt — gwiazda Δ/Δ .

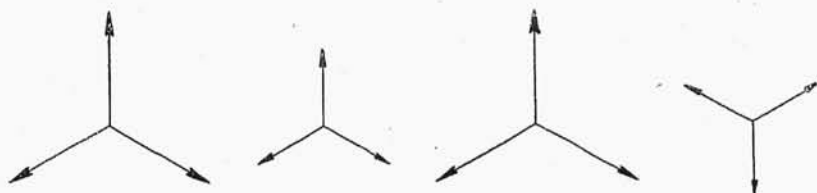


Rys. 81 i 82.

Widzimy, że gwiazda wtórna A układu Δ/Δ jest przesunięta o 30° w stosunku do gwiazdy wtórnej C układu Δ/Δ . Wartości chwilowe napięć między odpowiednimi zaciskami nigdy nie będą w obu wypadkach jednakowe — transformatory nie mogą być łączone na pracę równoległą.

Niekiedy, po odpowiednim przełączeniu końców uzwojeń, praca równoległa staje się możliwa. Mamy na przykład 2 transformatory w układzie Δ/Δ , w jednym z nich kierunek nawinięcia uzwojeń pierwotnych i wtórnych jest zgodny, w drugim — przeciwny.

Obraz wektorowy napięć naszych transformatorów przedstawia rys. 83. Od strony wtórnej mamy 2 gwiazdy odwrócone o 180° . Jeżeli w jednej z czterech gwiazd, którymi dysponujemy — obojętnie w jakiej — przełączymy „końce” na „początki” lub przeciwnie —



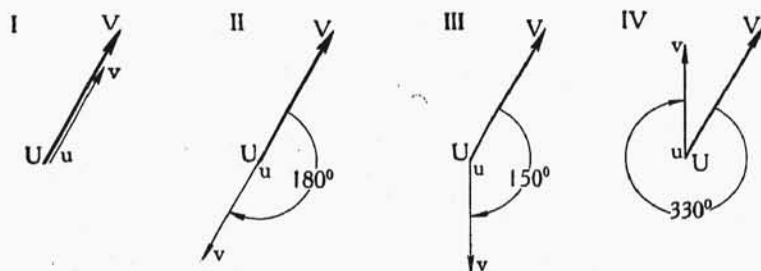
Rys. 83.

otrzymamy po stronie wtórnej gwiazdy zgodnie skierowane, które teraz już nadają się do pracy równoległej (oczywiście przy spełnieniu pozostałych warunków pracy równoległej).

Możemy wyciągnąć wniosek ostateczny: *Pewne układy połączeń mogą być łączone ze sobą równoległe od razu, niektóre po uprzednim przełączeniu „końców” i „początków”, niektóre zaś do współpracy równoległej wcale się nie nadają.*

Według projektu przepisów polskich ($\frac{PNE}{33 - 1935}$ Przepisy

oceny i badania transformatorów) spotykane układy połączeń zostały podzielone na 4 grupy główne 1, 2, 3 i 4. Każda zawiera 3 układy połączeń (patrz tabela IV). Układy połączeń w tabeli są podane przy jednokierunkowych nawinięciach uzwojeń dolnego i górnego napięcia. Układy te są oznaczone za pomocą złożonych symboli, które pozwalają zorientować się do jakiej grupy głównej



Rys. 84.

należy rozpatrywany układ (pierwsza cyfra symbolu), na jakim miejscu w tej grupie głównej się znajduje (druga cyfra symbolu), jak są połączone jego uzwojenia pierwotne i wtórne (litery V, v — oznaczają gwiazdę; D, d — trójkąt, z — zygzak). Ostatnia cyfra w symbolu uwzględnia kąt przesunięcia fazowego odpowiadających

TABELA IV.

Grupa układu połączeń		Kąt przesunięcia wektorów	Układ wektorowy		Układ połączeń		Oznaczenia wg RET 1933 r. VDE
Grupa główna	Symbole grupy		Górne napięcie	Dolne napięcie	Górne napięcie	Dolne napięcie	
Transformatory trójfazowe							
1	11 Dd0	0°			A ₁		
	12 Yy0				A ₂		
	13 Dz0				A ₃		
2	21 Dd6	+180°			B ₁		
	22 Yy6				B ₂		
	23 Dz6				B ₃		

3	31 Dy5	$+150^{\circ}$			C ₁
	32 Yd5				C ₂
	33 Yz5				C ₃
4	41 Dy11	$+330^{\circ}$			D ₁
	42 Yd11				D ₂
	43 Yz11				D ₃
Transformatory jednofazowe					
I.	0°				E

sobie napięć międzyzaciiskowych strony pierwotnej i wtórnej. Kąt ten wyrażony jest w godzinach (1 godzina na tarczy zegarowej równa się 30°) i liczony w kierunku ruchu wskazówki zegara.

W grupie głównej 1 wektory $U-V$ i $u-v$ są do siebie równoległe i skierowane zgodnie (rys. 84^I), przesunięcie fazowe wynosi zero (ostatnia cyfra w symbolu zero).

W grupie głównej 2 wektory $U-V$ i $u-v$, będąc równoległe, są skierowane przeciwnie (rys. 84^{II}), przesunięcie fazowe wynosi 180° — czyli sześć godzin (ostatnia cyfra w symbolu sześć).

W grupie 3 wektory $U-V$ i $u-v$ tworzą 150° — czyli pięć godzin (rys. 84^{III}). W grupie 4 — kąt wynosi 330° — jedenaście godzin (rys. 84^{IV}).

Ostatnia kolumna tabeli IV zawiera oznaczenia niemieckie.

Transformatory, należące do tej samej grupy głównej, mogą być łączone wprost przez załączenie na szyny jednoimiennych zacisków.

Transformatory grupy 1 i 2 mogą być połączone równoległe po uprzednim przełączeniu zacisków w jednym z czterech uzwojeń.

Transformatory grup 1 i 2 w żadnym wypadku nie mogą pracować równoległe z transformatorami grup 3 i 4.

Transformatory grup 3 i 4 mogą pracować równoległe po odpowiednim przełączeniu zacisków, jak w grupach 1 i 2, lub bez przełączenia, o ile do szyn zbiorczych będą przyłączone zaciski pierwotne i wtórne według kolejności, ujętej w tabeli V.

TABELA V.

Układ połączeń		Szyny zbiorcze			Napięcie górne			Napięcie dolne		
					R	S	T	r	s	t
Oznaczk. polsk.	31 Dy 5	32 Yd 5	33 Yz 5		U	V	W	u	v	w
Oznaczk. niem.	C ₁	C ₂	C ₃							
Oznaczk. polsk.	41 Dy 11	42 Yd 11	43 Yz 11	I	U	W	V	w	v	u
Oznaczk. niem.	D ₁	D ₂	D ₃	II	W	V	U	v	u	w
				III	V	U	W	u	w	v

To oznacza, że, jeżeli np. do szyn zbiorczych RST i rst przyłączymy zaciski jednego z transformatorów grupy 3 (31 Dy 5, 32 Yd 5 lub 33 Yz 5), tak, jak to jest pokazane w tabeli, to trans-

formatory grupy 4 (41 *Dy* 11, 42 *Yd* 11, lub 43 *Yz* 11) możemy przyłączyć do szyn, bez naruszenia połączeń wewnętrznych, według jednego z trzech (I, II, III) wariantów. Można tego dowieść, rozważając odpowiednie wykresy wektorowe.

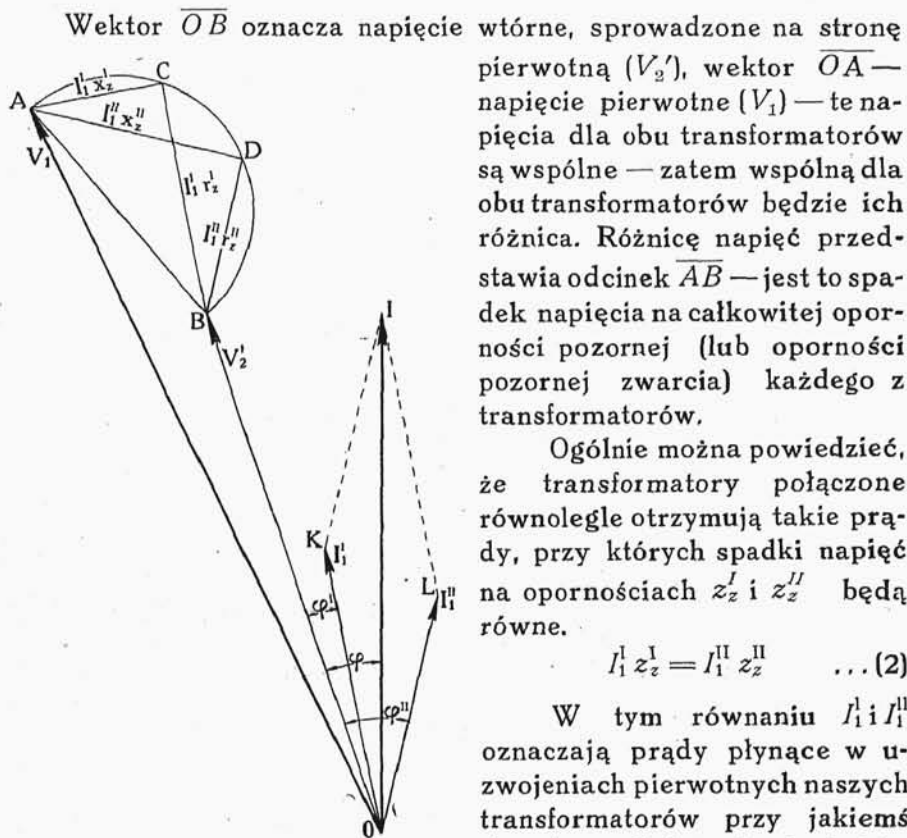
2). *Warunek drugi* będzie spełniony, gdy transformatory posiadają jednakowe napięcia zwarcia:

$$I_{1n}^I z_z^I = I_{1n}^{II} z_z^{II} \quad \dots (1)$$

W tym równaniu I_{1n}^I oraz I_{1n}^{II} oznaczają prądy pierwotne naszych transformatorów odpowiadające mocom nominalnym.

z_z^I i z_z^{II} — oporności pozorne zwarcia tych transformatorów.

Weźmy wykres wektorowy dwóch równolegle pracujących transformatorów (patrz rys. 85).



Rys. 85.

Wektor \overline{OB} oznacza napięcie wtórne, sprowadzone na stronę pierwotną (V_2'), wektor \overline{OA} — napięcie pierwotne (V_1) — te napięcia dla obu transformatorów są wspólne — zatem wspólną dla obu transformatorów będzie ich różnica. Różnicę napięć przedstawia odcinek \overline{AB} — jest to spadek napięcia na całkowitej oporności pozornej (lub oporności pozornej zwarcia) każdego z transformatorów.

Ogólnie można powiedzieć, że transformatory połączone równolegle otrzymują takie prądy, przy których spadki napięć na opornościach z_z^I i z_z^{II} będą równe.

$$I_1^I z_z^I = I_1^{II} z_z^{II} \quad \dots (2)$$

W tym równaniu I_1^I i I_1^{II} oznaczają prądy płynące w uzwojeniach pierwotnych naszych transformatorów przy jakimś dowolnym obciążeniu sieci wtórnej.

Jeżeli poza zależnością (2), która jest wynikiem każdej pracy

równoległej dwóch transformatorów, niezależnie od tego, czy są dopasowane do tej pracy, czy nie, jest spełniona jeszcze zależność (1), wtedy, dzieląc stronami równanie (2) przez równanie (1), otrzymamy:

$$\frac{I_1^I z_z^I}{I_{1n}^I z_z^I} = \frac{I_1^{II} z_z^{II}}{I_{1n}^{II} z_z^{II}}, \quad \frac{I_1^I}{I_{1n}^I} = \frac{I_1^{II}}{I_{1n}^{II}},$$

lub

$$\frac{I_1^I}{I_1^{II}} = \frac{I_{1n}^I}{I_{1n}^{II}}$$

Z ostatniego równania widzimy, że jeżeli napięcia zwarcia w transformatorach są jednakowe, to prądy w transf. przy dowolnym obciążeniu zewnętrznym pozostają zawsze w stosunku prądów nominalnych. To znaczy, że oba transformatory przy wzroście obciążenia zewnętrznego w jednym czasie osiągają swe prądy nominalne — inaczej, ponieważ napięcie jest stałe — swe moce pozorne nominalne.

Wróćmy do naszego wykresu wektorowego. Odcinek \overline{AB} jest spadkiem napięcia na oporności pozornej zwarcia każdego z transformatorów spowodowanym przepływem prądów I_1^I w jednym i I_1^{II} w drugim. Spadek napięcia na oporności pozornej zwarcia jest sumą geometryczną spadków napięć na opornościach zwarcia omowej i indukcyjnej. Wektor \overline{AB} będzie przeciwprostokątną trójkąta spadków napięć, którego przyprostokątnymi są spadki napięć omowej i indukcyjnej. Ponieważ w ogólnym przypadku stosunki oporności omowej zwarcia do indukcyjnej zwarcia dla każdego z transformatorów są niejednakowe, zatem i trójkąty spadków napięć będą niejednakowe, mając tylko wspólną przeciwprostokątną.

Na naszym wykresie $\triangle ACB$ jest trójkątem spadków napięć transformatora pierwszego, a $\triangle ADB$ transformatora drugiego.

Wektory \overline{BC} i \overline{BD} są spadkami napięć na opornościach omowych zwarcia naszych transformatorów.

$$\overline{BC} = I_1^I r_z^I \quad \overline{BD} = I_1^{II} r_z^{II}$$

Wektory prądów, płynących w transformatorach, są równoległe do wektorów odpowiednich omowych spadków napięć.

Na wykresie wektor \overline{OK} oznacza prąd I_1^I , wektor \overline{OL} — prąd I_1^{II} . Widzimy, że te prądy nie są ze sobą w fazie, ich geometryczna suma daje nam prąd odbioru — a ponieważ przy stałym napięciu prądy są proporcjonalne do mocy pozornych — więc moc pozorna odbioru może być otrzymana jako suma geometryczna mocy pozornych transformatorów — innymi słowy: moc pozorna odbioru jest mniejsza od arytmetycznie dodanych do siebie mocy pozornych transformatorów.

Tak więc, jeżeli mamy np. 2 transformatory każdy po 100 kVA o jednakowych napięciach zwarcia, lecz niejednakowych trójkątach spadków napięć (stosunek $\frac{r_z}{x_z}$ w obu nie jest jednakowy), to przy pełnym obciążeniu każdego z nich moc odbiornika wypadnie mniejsza niż 200 kVA.

W praktyce nie może być wymagana ścisła równość napięć zwarcia. Napięcie zwarcia, bowiem, jest zależne od oporności indukcyjnej transformatora, a między opornością indukcyjną, obliczoną na podstawie wzorów (I-4·b) a pomierzoną w transformatorze wykonanym może wypaść dość duża rozbieżność — rzędu $10 \div 15\%$. Poza to ze wzrostem mocy maleje (procentowo) spadek napięcia na oporności omowej, co pociąga za sobą, naogół, pewne zmniejszenie napięcia zwarcia ze wzrostem mocy (przy tem samym napięciu górnym). Według przepisów niemieckich (również i według projektu przepisów polskich) napięcia zwarcia równoległe pracujących transformatorów mogą się różnić od swojej średniej wartości o $\pm 10\%$ czyli w wypadku skrajnym możliwą jest 20% różnica napięć zwarcia. Jeżeli napięcia zwarcia nie są równe, to wskazanem jest, by transformator o mocy mniejszej miał wyższe napięcie zwarcia niż większy — gdyż wtedy najpierw obciąży się transformator większy.

Niekiedy, gdy transformatory przeznaczone do pracy równoległej mają znaczne różnice w napięciach zwarcia — przed transformatorem o mniejszem napięciu zwarcia daje się dławik z żelazem z regulowaną szczeliną powietrzną.

Należy zauważyć, że, gdy transformatory pracujące równoległe znajdują się od siebie na znacznej odległości, nierówność napięć zwarcia odgrywa rolę mniejszą, możliwem jest dopuszczenie większej różnicy, rachunkowo jednakże ująć tego się nie da, gdyż tutaj, poza odległością transformatorów i przekrojem sieci wtórnej, ma znaczenie rozmieszczenie odbiorników, które są włączane i wyłączane w sposób dowolny.

3) *Warunek trzeci* — by prądy obu transformatorów były ze sobą w fazie — będzie spełniony, gdy poza równością napięć zwarcia, uzyskamy jeszcze równość spadków napięć na omowych opornościach zwarcia $I_1^I r_z^I = I_1^{II} r_z^{II}$.

Wtedy (patrz rys. 85) wektory $\overline{BC} = I_1^I r_z^I$ oraz $\overline{BD} = I_1^{II} r_z^{II}$ ze sobą się pokryją, a ponieważ wektory prądów są równoległe do wektorów omowych spadków napięć — więc i wektory prądów nałożą się na siebie — prądy w obu transformatorach będą ze sobą w fazie. W tym wypadku prąd odbioru będzie się równał sumie

arytmetycznej prądów transformatorów, lub — co na jedno wychodzi — moc pozorna odbioru będzie się równała sumie arytmetycznej mocy pozornych transformatorów. To należy uważać za ideał pracy równoległej.

Jednakże, jak zobaczymy za chwilę, nie możemy naogół wymagać od transformatorów spełnienia tego warunku.

Jak wiemy (I-8), procentowa strata mocy w miedzi uzwojeń transformatora równa się procentowemu spadkowi napięcia przy obciążeniu omowem, a ten ostatni jest niczem innym jak procentowym spadkiem napięcia na oporności omowej zwarcia transformatora.

$$\frac{\Delta P_m}{P} 100 = \frac{I_1 r_z}{V_1} 100$$

Procentowa strata mocy w miedzi uzwojeń jest zazwyczaj, jak już wspominaliśmy, podawana w katalogach transformatorów.

Zobaczmy, jak ta wielkość zmienia się wraz ze wzrostem mocy transformatorów.

Tabela VI

Moc nominalna w kVA.	5	10	20	30	50	75	100
Straty w miedzi w ‰ mocy nominalnej przy $\cos \varphi = 1$	3,3	3,0	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1
Napięcie zwarcia w ‰	4,2	4,0	3,9	3,8	3,6	3,5	3,5

Napięcie górne podanej serii transformatorów wynosi 10000 V. przy układzie Δ/Δ .

Z tabeli widzimy, że napięcie zwarcia maleje znacznie wolniej od procentowej straty mocy w miedzi, czyli, że ze wzrostem mocy stosunek $\frac{r_z}{x_z}$ maleje — oporność indukcyjna odgrywa coraz to większą rolę; wierzchołek (rys. 83) trójkąta zwarcia przesuwają się ku punktowi B.

Wyciągamy stąd ważny wniosek: warunek trzeci (by prądy obu transformatorów były ze sobą w fazie) dla transformatorów różnej mocy spełnionym być normalnie nie może. Z tego punktu widzenia najwłaściwiej łączyć ze sobą równolegle transformatory o jednakowej mocy (aczkolwiek transformatory na tę samą moc, lecz wykonane przez różne fabryki — również mogą nie posiadać jednakowych omowych spadków napięcia).

Im bardziej moce transformatorów różnią się od siebie, tem dalej odbiegamy od warunku trzeciego pracy doskonałej.

Ponieważ w eksploatacji trudno jest ograniczyć się do łączenia transformatorów tylko jednakowej mocy — dopuszczalną jest praca równoległa transformatorów o mocach różnych, stosunek mocy jednak nie może przekraczać 3:1.

Zestawiając wszystko cośmy dotychczas o pracy równoległej napisali, powiemy, że praktycznymi warunkami pracy równoległej są:

1) Przynależność do grup układów połączeń, mogących ze sobą współpracować.

2) Równość napięć biegu jałowego. Tolerancja przekładni według przepisów niemieckich wynosi $\pm 0,5\%$, według projektu polskiego $\pm 0,3\%$. Odnosi się to do stosunku policzonych zwojów (a nie do stosunku zmierzonych napięć przy biegu jałowym, bowiem sam pomiar może być obarczony błędem większym niż dopuszczalna tolerancja — patrz XI—1).

3) Równość napięć zwarcia (tolerancja $\pm 10\%$).

4) Stosunek mocy transformatorów nie powinien naogół przekraczać 3:1.