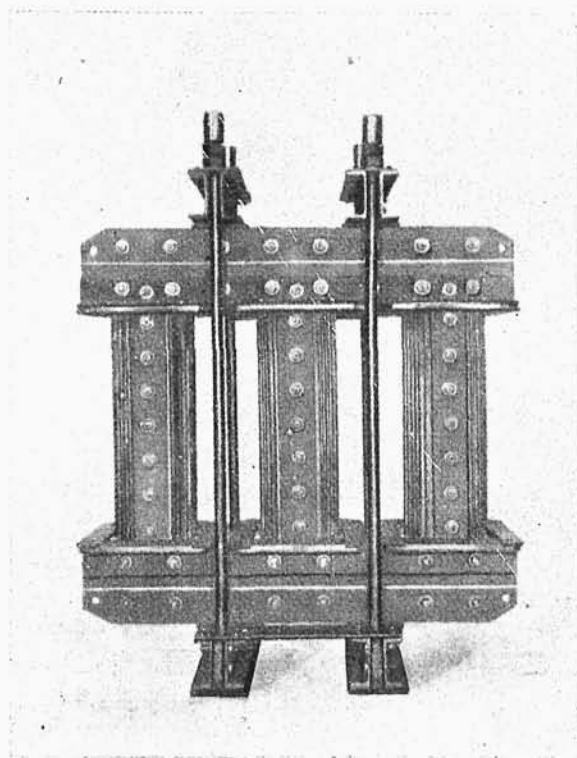


wa (rys. 155). Możliwy jest wypadek pośredni, gdy bolce śrub skrajnych przechodzą częściowo w żelazie, częściowo nazewnątrz (rys. 144, 156).



Rdzeń żelazny transformatora trójfazowego 1250 kVA P. T. E.
Rys. 157.

Omówione sposoby mocowania jarzm są stosowane przy transformatorach mniejszych i średnich mocy. Przy mocach większych umocowanie winno być solidniejsze, jak to jest uwidocznione na rys. 157 i 146.

2. Obwód elektryczny.

Po omówieniu obwodu magnetycznego przechodzimy z kolei do elektrycznego. Przed przystąpieniem do opisu budowy cewek transformatora poświęćmy parę słów tak ważnej kwestji, jak

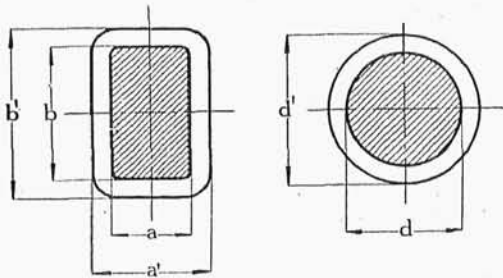
a) *Izolacja przewodów.* Przy budowie każdego uzwojenia staje przed nami pytanie z jakiego materiału ma być wykonana izolacja przewodów i jaką ma otrzymać grubość.

Obecnie najczęściej spotykamy się z izolacją bawełnianą i papierową. Izolacja bawełniana jest używana jako oprzęd, oplecenie, otaśmowanie. Jaki z tych rodzajów izolacji stosować—zależy

naogół od wielkości i kształtu przekroju. Przy drucie okrągłym często spotykany jest oprzęd, przeważnie podwójny, rzadziej potrójny lub poczwórny, niekiedy oprzęd i oplecenie.

Z drutem okrągłym mamy do czynienia przy przekrojach naogół niedużych, nieprzekraczających $6 \div 10 \text{ mm}^2$ aczkolwiek już przy $s < 6 \text{ mm}^2$ możemy często spotkać kształt prostokątny. Zdarza się zresztą i odwrotnie, że uzwojenie o większym przekroju bywa wykonywane z drutu okrągłego. Naogół, jednakże, większe przekroje otrzymują kształt prostokątny. Daje on lepsze wykorzystanie przestrzeni, oraz pozwala łatwiej wykonać uzwojenie (przy nawijaniu jak na rys. 164^{II}).

Stosowanie samego oprzędu przy większych przekrojach nie jest wskazane, gdyż może się łatwo ześlizgnąć przy zginaniu przewodów. Należy tutaj poza oprzędem dać jeszcze oplecenie, lub przewód otąsmać (bez oprzędu).



Rys. 158.

Omówimy teraz szczegółowiej każdy z rodzajów izolacji bawełnianej.

Oprzęd. Do oprzędu przewodów używa się przędzy. Jest ona w zależności od grubości oznaczana numerami — np. 160, 100, 60 (według norm A. E. G.). Grubość pojedynczej warstwy

oprzędu wynosi odpowiednio:

TABELA VII.

N ^o N ^o przędzy	160	100	60
Grubość jednej warstwy w mm.	0,05 — 0,055	0,065	0,085

Wtedy dla przekrojów okrągłych pogrubienie średnicy ($d' - d$) (rys. 158) przy często spotykanym oprzędzie podwójnym wypadnie:

TABELA VIII.

N ^o N ^o przędzy	160	100	60
$d' - d$ w mm	0,2 — 0,22	0,26	0,34

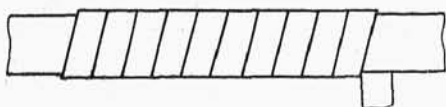
Oplecenie. Samego oplecenia zwykle się nie stosuje. Pod oplecenie daje się warstwę innej izolacji — np. oprzęd lub oprzęd i papier. Oplecenie powiększa wymiar przewodu o $0,4 \div 0,5$ mm., czyli grubość warstwy oplecenia wynosi $0,2 \div 0,25$ mm.

Otaśmowanie. Do tego używa się taśmy bawełnianej o grubości $0,15 \div 0,2$ mm. Przeważnie otaśmowuje się „przez pół”, jak na rys. 159. Przy takim otaśmowaniu mamy powiększenie wymiarów przekroju (rys. 158):



Rys. 159.

$$a' - a = b' - b = 0,6 \div 0,8 \text{ mm.}$$



Rys. 160.

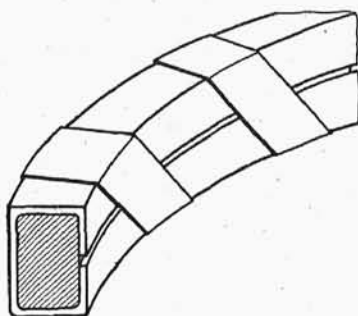
Przy izolacji papierowej przewód jest owijany tasiemką papieru — jak na rys. 160 (nie w nakładkę). Grubość taśmy papierowej $0,05 \div 0,1$

mm. Owinięcie może być pojedyncze, podwójne, potrójne.

Gdy chodzi o specjalnie silną izolację, przewód może być otoczony warstwą preszpanu. By preszpan się trzymał, otaśmowuje się go, jak na rys. 161.

Poza bawełną i papierem przy bardzo małych przekrojach używa się niekiedy jedwabiu lub emalii.

Pojedynczy oprzęd jedwabny powiększa średnicę o około $0,04$ mm. podwójny o $0,07$ mm.



Rys. 161.

TABELA IX

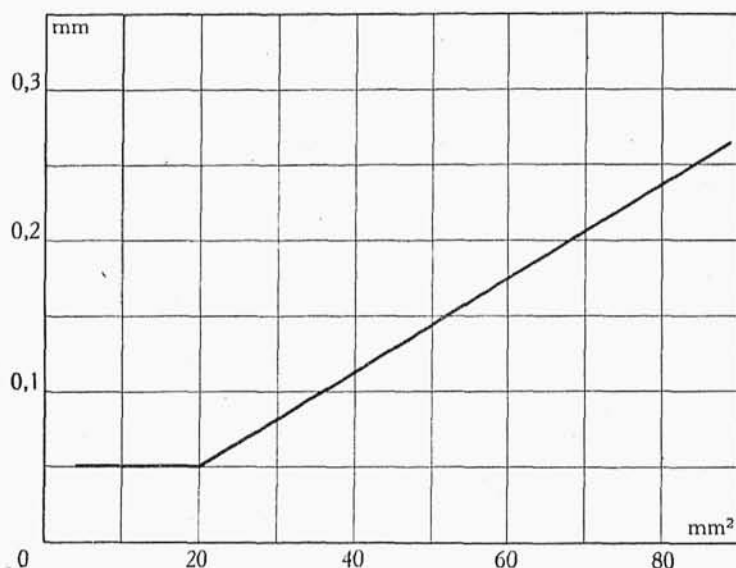
d w mm	$d' - d$ w mm
$0,05 \div 0,15$	0,02
$0,2 \div 0,3$	0,05
$0,3 \div 0,4$	0,035
$0,4 \div 0,5$	0,04
$0,8 \div 0,9$	0,065
$1,0 \div 1,5$	0,08

Tabela obok daje przyrost średnicy drutów emaljowanych. Drut emaljowany może dodatkowo jeszcze być oprzędzony.

Na zakończenie dodamy, że żadna izolacja, nawet najsilniejsza, nie spełni swego zadania, jeżeli przewód posiada ostre krawędzie lub zadry. Z tego względu przewody przeznaczone do budowy uzwojeń winny być przed zaizolowaniem jaknajstaranniej oglądane.

Uwaga. Przy wyznaczaniu wymiarów cewki (szerokości, wysokości) należy

się liczyć z tem, że przewód przy nawijaniu nie układa się zupełnie równo i że wymiary przekroju są wykonane z pewną tolerancją. Przy drucie okrągłym (przy $s \leq 6 \text{ mm}^2$) uwzględniamy to przez dodanie do średnicy przewodu jakichś 0,02 mm. Przy przewodach prostokątnych, które są masywniejsze, powiększenie wymiaru wypada większe. Przeciętne zwiększenie wymiarów w zależności od wielkości przekroju daje krzywa z rys 162.



Rys. 162.

Możemy teraz przejść do opisu budowy uzwojeń transformatora.

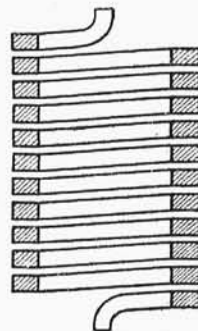
Zależy ona przede wszystkim od wysokości napięcia i mocy transformatora. Spotykamy się zasadniczo z dwoma rodzajami transformatorów. Jedne z nich przetwarzają wysokie napięcie na niskie — do zasilania instalacji oświetleniowych i drobnej siły — będziemy je nazywali *transformatorami rozdzielczymi*. Można uważać, że górną granicą wysokiego napięcia jest tutaj jakieś 35 kV. Transformatory drugiej grupy podnoszą napięcie wysokie elektrowni na jeszcze wyższe — celem przenoszenia energii elektrycznej na dalekie odległości, względnie obniżają to wyższe napięcie na napięcie pośrednie — transformatory te nazwiemy *przesyłowymi*.

Większość budowanych transformatorów stanowią rozdzielcze. Moc ich nie przekracza naogół $\sim 1000 \text{ kVA}$. Transformatory przesyłowe budowane są na moce większe i napięcia wyższe.

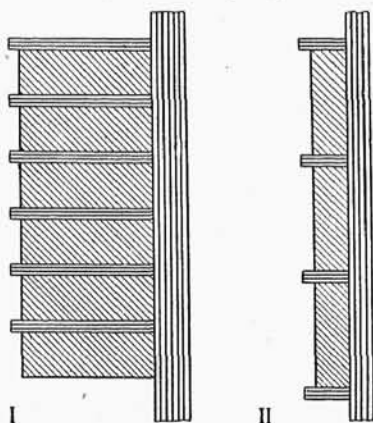
Zacniemy od transformatorów *rozdzielczych*. Najczęściej spotykanym typem uzwojenia jest cylindryczne — o niem będziemy najpierw mówili.

b) *Uzwojenie niskiego napięcia* jest wykonywane zazwyczaj jako jedna cewka — jedno, dwu lub kilkowarstwowa. Na rys. 163 widzimy schematycznie przedstawioną cewkę jednowarstwową. Ponieważ po stronie niskiego napięcia mamy do czynienia naogół z dużymi natężeniami prądu, więc kształt przekroju jest przeważnie prostokątny. Izolacja — albo otaśmowanie, albo oprzęd i oplecenie.

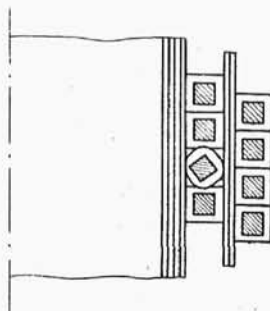
Gdy cewka jest jednowarstwowa, możliwy



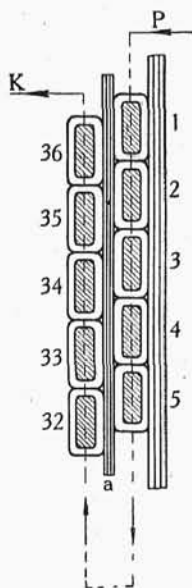
Rys. 163.



Rys. 164.



Rys. 165.



Rys. 166.

jest dwojaki sposób nawijania przekrojem prostokątnym: płasko (rys. 164^I) lub „na kant” (rys. 164^{II}). Przekrojów kwadratowych należy unikać, gdyż przewód przy nawijaniu może łatwo przyjąć niewłaściwe położenie (rys. 165), co spowoduje zgniecenie izolacji zwojowej.

Przy cewkach dwu i więcej warstwowych używa się tylko drugiego sposobu (rys. 164^{II}). Na rys. 166 uwidoczniony jest sposób wykonania cewki dwuwarstwowej. Między warstwami zwojów widzimy warstwę preszpanu (*a*), gdyż między dwoma koło siebie leżącymi zwojami 2-ch sąsiednich warstw może wystąpić dość znaczne napięcie. Np. między zwojem 1 i 36 (na rys. *P* oznacza początek nawijania, *K* — koniec) występuje pełne napięcie cewki, równe liczbie zwojów razy napięcie przypadające na jeden zwój; między zwojami 2 a 35 — mniejsze o podwójne napięcie jednego zwoju i t. d. Grubość warstwy

preszpanu (a) należy brać około 1 mm i to, nie tyle ze względu na wytrzymałość elektryczną, gdyż tutaj wystarczyłoby parę dziesiątych milimetra, ile w obawie przed uszkodzeniem mechanicznym.

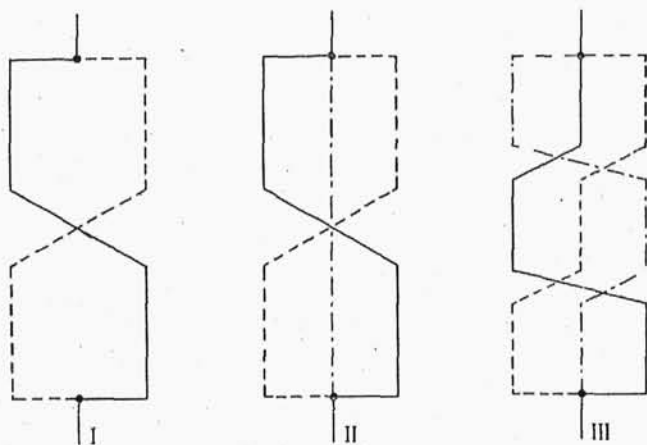
Przy cewce jednowarstwowej największe napięcie między sąsiednimi zwojami wynosi napięcie jednego zwoju — dlatego niekiedy do wykonania cewki jednowarstwowej używa się przewodu nieizolowanego, dając między zwojami przekładki preszpanowe (rys. 164^I i 164^{II}), a całość pokrywając warstwą lakieru. Takie wykonanie spotyka się zresztą dość rzadko.

Im przekrój jest większy — tem napotykamy na większe trudności przy wykonaniu (nawijaniu) cewki oraz tem większe są na ogół straty dodatkowe w miedzi, gdyż wpływ naskórkowości wzrasta z przekrojem.

Uwaga. Należy zauważyć, że na naskórkowość poza wielkością przekroju wpływa jego kształt i położenie — patrz I—5-a.

Z tego powodu przy dużych przekrojach prowadzi się uzwojenie w kilku gałęziach równoległych. Od jakiego przekroju poczynając, trzeba przeprowadzić podział na gałęzie równoległe — trudno ściśle odpowiedzieć.

Orientacyjnie można uważać, że na jedną gałąź nie powinno przypadać więcej niż 200 A., co przy gęstości $\sim 3 \text{ A/mm}^2$ da $\frac{200}{3} \simeq 60 \text{ mm}^2$.



Rys. 167.

Wogóle, przy większych przekrojach wskazanem jest sprawdzenie, czy straty dodatkowe nie wypadną za duże (patrz I—5-a).

Przy wykonywaniu uzwojenia niskiego napięcia z kilku gałęzi równoległych — by uniknąć prądów wyrównawczych w gałęziach — każda z gałęzi winna posiadać jednakową oporność omową i induk-

cyjną. Praktycznie to się osiąga przez przeplatanie warstw. Takie przeplatanie schematycznie jest uwidocznione na rys. 167^I—dla dwóch i rys. 167^{II}—dla trzech gałęzi równoległych. Przez przeplatanie warstw osiągniemy to, że przewody wszystkich gałęzi mają jednakową długość (równe oporności omowe) oraz są pod wpływem jednakowych pól rozproszenia (równe oporności indukcyjne).

Na rys. 168 widzimy wykonanie takiego przeplecenia z rys. 167^{II}!

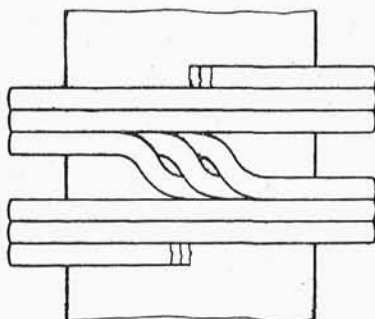
Przy połączeniu uzwojenia niskiego napięcia w zygzak stosuje się najczęściej cewka dwuwarstwowa—jedna warstwa odpowiada jednej połowie uzwojenia, druga—drugiej (patrz rys. 55).

Teraz o wykonaniu samej cewki. Możliwe są zasadniczo dwa sposoby:

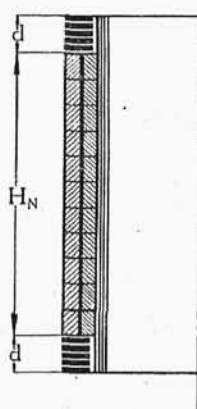
- 1) nawinięcie na tulei izolacyjnej,
- 2) bez tulei.

Pierwszy sposób widzimy na rys. 169.

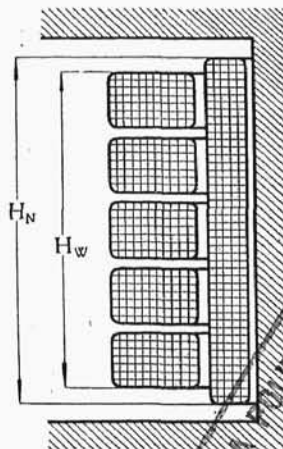
Grubość ścianki tulei izolacyjnej (przeszpawanej, lub z papieru bakelizowanego) 2 — 3 mm. By uniknąć większego spadku napięcia indukcyjnego oraz zmniejszyć siły występujące między uzwojeniami przy zwarcu, wskazaniem jest obierać wysokość uzwojenia niskiego napięcia taką samą, jak wysokiego napięcia $H_N = H_W$. Niektóre firmy przy mniejszych mocach i niższych napięciach, chcąc lepiej wykorzystać przestrzeń w oknie transformatora, nie stosują się do tego wskazania i dają (jak to widzimy np. na rys. 170) $H_N > H_W$. Odległość d (rys. 169) między uzwojeniem a jarzmem można utrzymać w ten sposób, że na początku i końcu tulei kładzie się szereg krążków preszpawanych, tak, by łączna grubość wynosiła d .



Rys. 168.



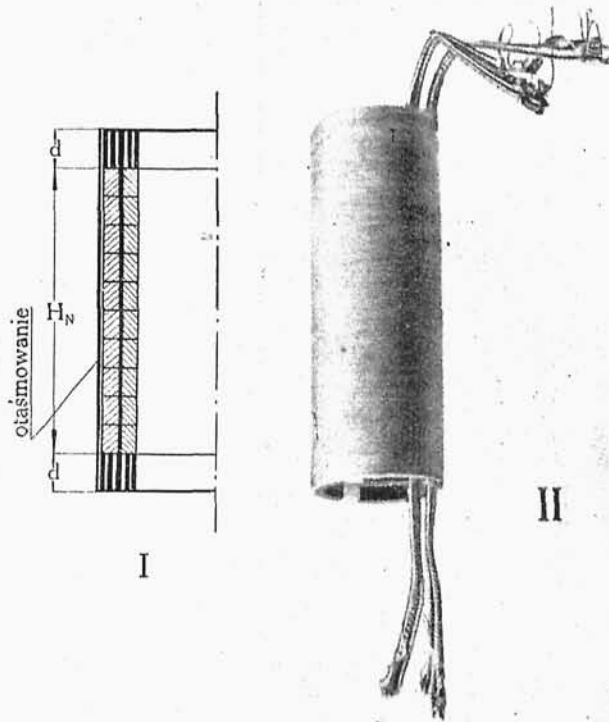
Rys. 169.



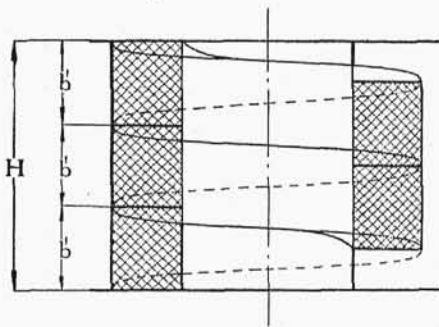
Rys. 170.

BIBLIOTEKA WARSZAWSKA
WARSZAWA
1208

Nawinięcie cewki na tulei izolacyjnej daje konstrukcję mechanicznie mocną. Pod względem chłodzenia sprawa przedstawia się nieco gorzej — gdyż powierzchnia wewnętrzna bierze słaby udział w odprowadzaniu ciepła. Lepszym pod względem chłodzenia, ale słabszym mechanicznie jest sposób drugi (bez tulei izolacyjnej), gdy cewkę niskiego napięcia nawija się na szablonie, mocno się otąsmowuje i zdejmuje z szablonu. (rys. 171^{I i II}).



Rys. 171.



Rys. 172.

Odległość d uzwojeń niskiego napięcia od jarzma można otrzymać, dając albo krążki preszpanowe, jak w wypadku poprzednim, albo skręcając w pierścień szereg koło siebie położonych pasków z preszpanu, jak to widzimy na rys. 171^I.

By pierścień i cewka tworzyły jedną całość, przy nawijaniu w kilku miejscach na

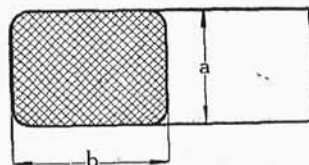
obwodzie dajemy mocną taśmę bawełnianą i przekładamy ją co parę zwojów (rys. 171¹).

Przy wyznaczaniu wysokości uzwojenia przy przekroju prostokątnym trzeba zwrócić uwagę na to, że, o ile w warstwie mamy n zwojów, to wysokość uzwojenia będzie się równa wysokości przewodu b' razy $(n+1)$. Widzimy to na rys. 172, gdzie przy dwóch zwojach wysokość nawinięcia równa się potrójnej wysokości przewodu.

Przy cewce wykonanej z drutu okrągłego wysokość cewki $\simeq d'(n+0,83)$, gdzie d' — średnica przewodu izolowanego.

c) *Uzwojenie wysokiego napięcia.* Uzwojenie jest zazwyczaj podzielone na kilka, lub kilkanaście cewek, połączonych ze sobą szeregowo. Cel podziału: uniknięcie dużego napięcia międzywarstwowego; polepszenie warunków chłodzenia, gdyż między cewkami są szczeliny, przez które przepływać może olej, względnie powietrze; pewna elastyczność w eksploatacji (gdyż w razie uszkodzenia wymienia się tylko cewki uszkodzone, a nie całe uzwojenie). Przede wszystkim chodzi o napięcie międzywarstwowe. O nim mówiliśmy poprzednio (VIII—2—b). Dążymy do tego by napięcie międzywarstwowe nie przekraczało $100 \div 150$ V. Przy napięciach większych należałoby dawać silniejszą izolację międzywarstwową. Richter daje praktyczną regułę podziału: na każdą cewkę ma przypadać nie więcej niż 1000 V.

Niektórzy konstruktorzy kierują się jeszcze dodatkowo warunkiem ze względu na chłodzenie — żaden z wymiarów przekroju (a, b) cewki nie może przekraczać $20 \div 30$ mm (rys. 173).



Rys. 173.

Do budowy cewek wysokiego napięcia używamy przewodów o przekroju okrągłym, lub prostokątnym.

Pomówimy najpierw o *przekrojach okrągłych*. Stosujemy je na ogół gdy $s \leq 4 \div 6$ mm². Izolacja — bawełna lub papier. Pogrubienie średnicy ($d' - d$) jest zależne od napięcia międzyzwojowego oraz od tego, czy między warstwami zwojów jest zastosowana przekładka.

TABELA X.

d mm	$d' - d$ mm.
0,4 — 0,65	0,4
0,65 — 0,95	0,45
1,0 — 1,25	0,5
1,3 — 1,6	0,55
1,7 — 1,9	0,6

Na ogół waha się w granicach $0,2 \div 0,6$ mm. Jeżeli chodzi o bawełnę, to Korndorfer (ETZ 1930 str. 1674) dla drutów okrągłych poleca stosować pogrubienie średnicy — jak w tabeli X. Dając między warstwami zwojów przekładki z papieru, możemy stosować izolację lżejszą.

Pogrubienie średnicy wskutek izolacji papierowej wynosi:

TABELA XI.

d mm.	Izolacja	$d' - d$ mm.
0,5 ÷ 1,4	Otaśm. podwójne	0,2
	Otaśm. potrójne	0,3
1,5 ÷ 2,0	Otaśm. podwójne	0,3
	Otaśm. potrójne	0,4

Na przewód otaśmowany papierem dodatkowo może przyjść oprzęd bawełniany, wytrzymałszy mechanicznie.

Jak zobaczymy dalej, transformator naogół posiada dwa rodzaje cewek wysokiego napięcia: cewki normalne, inaczej bieżące i t. zw. cewki wstępne. Te ostatnie winny wytrzymać i złagodzić strome czoło fali przepięciowej, trzeba zatem, by posiadały mocniejszą izolację, zarówno zwojową, jak i międzywarstwową — grubszy oprzęd bawełniany, więcej warstw papieru, często papier i oprzęd.

Ponieważ strome czoło fali przepięciowej, wstępując do uzwojeń transformatora, ulega stopniowemu złagodzeniu, możemy również stopniować grubość izolacji. Grupę zwojów o wzmożonej izolacji tworzy naogół kilka cewek. Otóż zwoje pierwszej (2 ÷ 3% pełnej liczby zwojów fazy) otrzymują izolację najgrubszą, drugiej — nieco cieńszą i t. d.

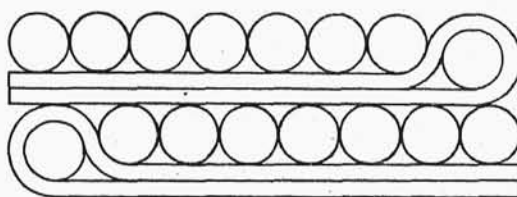
Tabela XII daje przeciętne pogrubienie średnicy drutu pierwszej cewki wstępnej.

TABELA XII.

Średnica drutu gołego d mm.	Napięcie robocze kV.	Pogrubienie średnicy $d - d'$ mm.
$\geq 0,5$	≤ 15	0,6
	15 do 20	0,8
	20 do 30	1,2.

Stopniowanie grubości izolacji przewodów cewek wstępnych opłaca się przy transformatorach większych. Przy mniejszych ograniczamy się do jednej grubości.

Jeżeli chodzi o przekładki międzywarstwowe, to przy cewkach wstępnych można je wzmocnić, wykonywując np., jak na rys. 174.



Rys. 174.

Przejdziemy teraz do *przekrojów prostokątnych*. Izolacja—bawełna, częściej papier. W tabeli XIII mamy podane przeciętne pogrubienie (dwustronne) wymiaru przy izolacji papierowej dla przekrojów $s \leq 20 \text{ mm}^2$.

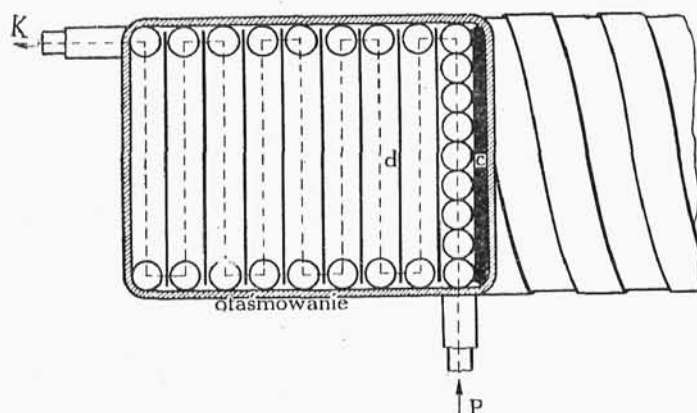
TABELA XIII.

Napięcie robocze kV.	Pogrubienie wymiaru mm.		
	Cewki bieżące	Cewki wstępne	
		I	II.
10	0,6	0,8	—
20	0,7	1,2	0,8
30	0,8	1,5	1,1
40	0,9	1,9	1,3
50	1,1	2,4	1,5
60	1,2	2,9	1,8

Tabela ta uwzględnia zarówno cewki bieżące, jak i wstępne. Dla przekrojów większych, niż 20 mm^2 grubość izolacji z tabeli należy odpowiednio powiększyć — np. dla $s = 60 \text{ mm}^2$ o 0,2 mm. dla $s = 100 \text{ mm}^2$ — o 0,4 mm.

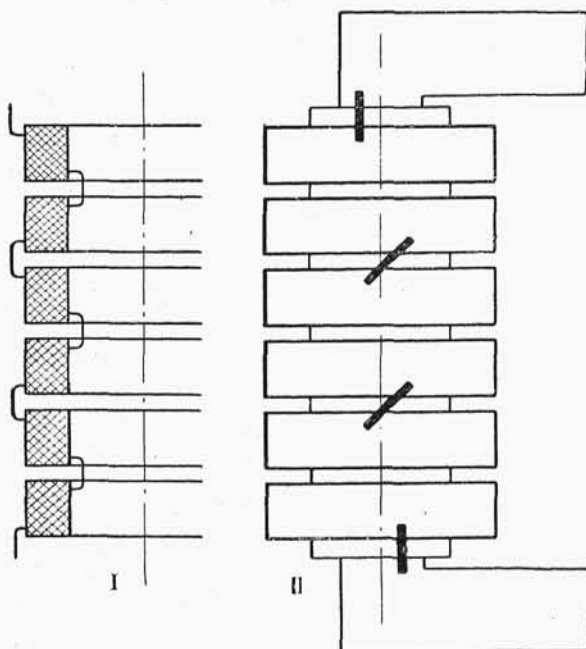
Budowa cewek wysokiego napięcia. Cewki są nawijane na szablonie. Spotykamy je w 2-ch wykonaniach — jako cewki normalne oraz jako t. zw. *dwucewki*.

Na rys. 175 widzimy wykonanie cewki normalnej. Szablon owija się paskiem preszpanu o grubości 0,2÷0,3 mm. (na rys. 175 warstwa c), później nawija się drut. Całość jest, jak widzimy, otaśmowana (otaśmowanie najczęściej pojedyncze).



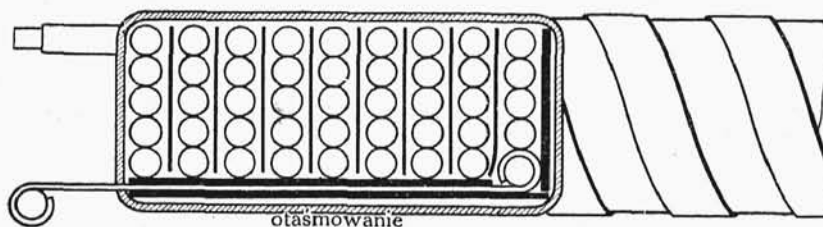
Rys. 175.

Dla tej cewki jest charakterystycznym, że początek znajduje



Rys. 176

się na wewnętrznej bocznej powierzchni cewki, a koniec na zewnętrznej — szeregowie łączenie cewek odbywa się jak na rys. 176 (I—przekrój, II—widok). Gdybyśmy chcieli początek cewki mieć również nazewnątrz, należałoby dać wyprowadzenie w postaci wstęgi miedzianej starannie izolowanej od przewodów, koło których przechodzi (patrz rys. 177). Takie wyprowadzenie wraz z izolacją powiększa wysokość cewki.

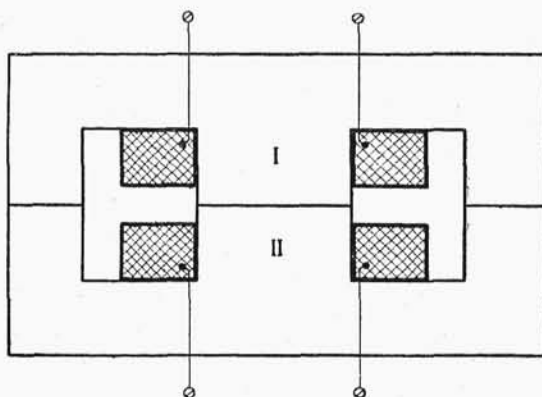


Rys. 177.

Między poszczególnymi warstwami cewki daje się zazwyczaj przekładki papierowe (warstwa d rys. 175) o grubości $0,1 \div 0,2$ mm.

Po nawinięciu cewki i otaśmowaniu sprawdza się izolację.

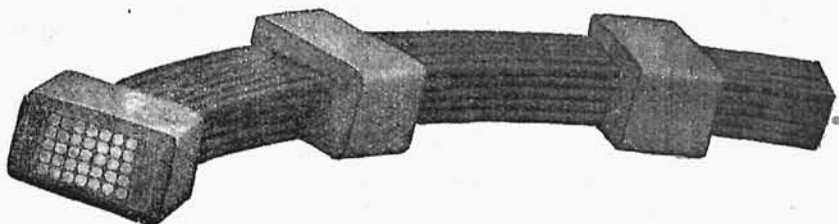
Może do tego służyć transformator z przeciętym rdzeniem żelaznym (rys. 178). Uzwojeniem wtórnym (II) jest badana cewka. Gdy między zwojami badanej cewki niema zwarcia, w obwodzie pierwotnym (I) płynie tylko prąd biegu jałowego — mały. Jeżeli zaś mamy w cewce badanej parę zwojów zwartych — prąd strony pierwotnej wzrasta — wzrost prądu zatem wskazuje nam na uszkodzenie izolacji międzyzwojowej.



Rys. 178.

Po tem badaniu cewkę się suszy, nasycy lakierem izolacyjnym (często do tego używa się lakieru bakelitowego), znowu się suszy, niekiedy sprasowuje na gorąco. Sprasowanie ma na celu nadanie cewce większej spójności i wytrzymałości mechanicznej.

Niektóre firmy sprasowują cewkę w kilku miejscach bandażami z materiału izolacyjnego (preszpan, papier bakeliz.), jak to widzimy na rys. 179. Takie wykonanie daje cewkę wytrzymałą



Rys. 179.

mechanicznie, o dobrych warunkach chłodzenia.

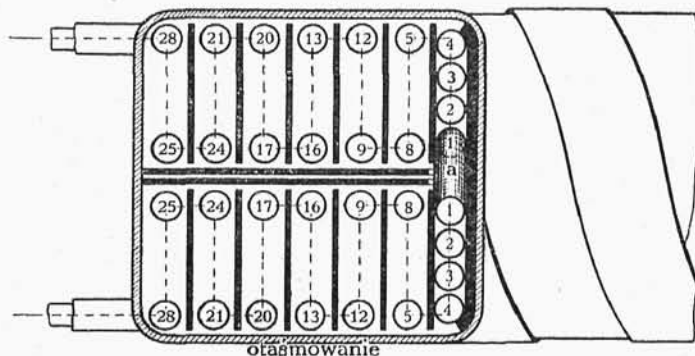
Bandaże pozatem stwarzają dystans między poszczególnymi cewkami, potrzebny zarówno ze względów izolacyjnych, jak i odprowadzania ciepła.

Dwucewki. Mają tę zaletę w stosunku do normalnych, że posiadają oba końce wyprowadzone nazewnątrz.

Dwucewkę możemy otrzymać, przykładając do siebie 2 cewki normalną tak, aby końce wewnętrzne były koło siebie; końce te

należy połączyć (zlutować). Całość jest wspólnie otaśmowiana. Przekrój dwucewki widzimy na rys. 180, *a* — jest to miejsce połączenia 2-ch końców wewnętrznych.

W miejscu rozgraniczenia obu cewek należy dać przekładkę izolacyjną — preszpan grubości ~ 1 mm., lepiej $2 \times 0,5$ mm., jak jak to widzimy na rysunku 180. Przekładka jest potrzebna dla-

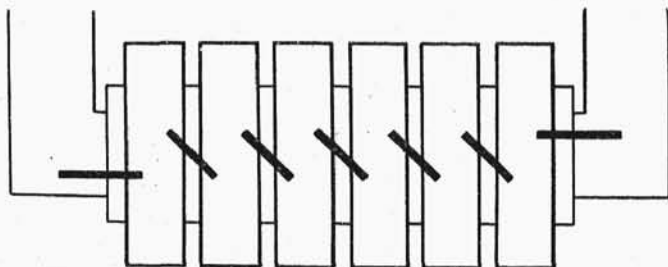


Rys. 180.

tego, że między sąsiadującymi ze sobą zwojami 2-ch cewek mogą panować znaczne napięcia. Np. między zwojami 8 i 8 występuje napięcie 16 zwojów, między 16 i 16 — napięcie 32 zwojów i t. d.

Często dwucewki są budowane z jednego przewodu. W tym celu znajduje się środek przewodnika, z którego cewka ma być wykonana i, nie rozcinając, nawija się każdą z połów przewodnika dwie cewki — nawijając np. jedną cewkę wlewo, a drugą wprawo.

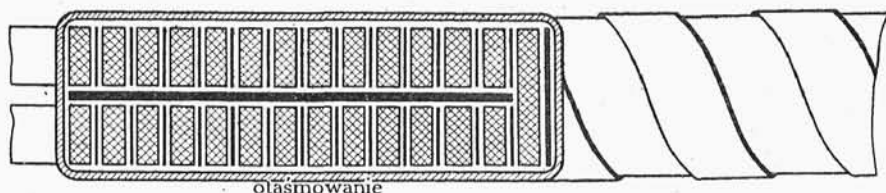
Widok szeregowo połączonych ze sobą dwucewek mamy na rys. 181.



Rys. 181.

Gdy cewka ma być wykonana z przewodu o przekroju prostokątnym i posiadać tylko 2 zwoje w warstwie, to, dając normalną konstrukcję, otrzymalibyśmy dla cewki wysokość równą potrójnej wysokości przewodu (patrz rys. 172).

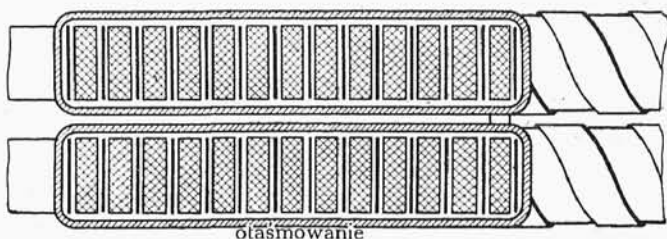
Wykonywując tę samą cewkę, jako dwucewkę, zyskujemy na wysokości (rys. 182).



Rys. 182.

Tutaj wysokość nawinięcia równa się tylko podwójnej wysokości przewodu.

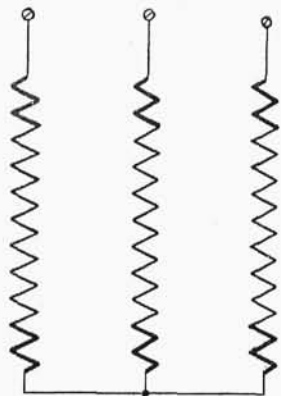
Niekiedy każda z cewek, składających się na dwucewkę, jest otaśmowana oddzielnie i między nimi jest pozostawiona szczelina $2 \div 4$ mm (rys 183); umożliwia to lepsze chłodzenie.



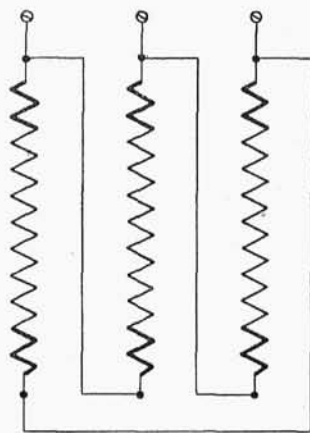
Rys. 183.

Początkowo przy budowie transformatorów izolacja wszystkich zwojów była jednakowa. Zainstalowany transformator był chroniony od fal przepięciowych za pomocą całego szeregu urządzeń przeciwprzepięciowych. Z biegiem czasu przekonano się, że urządzenia te często zawodzą, przyczem najczęściej były ukszkodzane zwoje cewek wstępnych (przy izolatorach) oraz, w wypadku połączenia w gwiazdę, również przy punkcie zerowym. — Powstała tendencja przerzucenia obrony uzwojenia transformatora od fal przepięciowych na sam transformator. Zaczęto zwoje od strony doprowadzenia, jak i przy punkcie zerowym (w wypadku połączenia w gwiazdę) izolować silniej. Zwoje o wzmocnionej izolacji tworzą oddzielne cewki (t. zw. wstępne). Mają one za zadanie wytrzymać i złagodzić strome czoło fali przepięciowej. W cewki takie zaopatruje się transformatory budowane na napięcie przekraczające 6 kV., aczkolwiek niektóre firmy zaczynają już od 3 kV.

Na rys. 184 i 185 widzimy schematycznie przedstawione uzwojenie wysokiego napięcia przy połączeniu w \wedge i \triangle z zaznaczeniem cewek o wzmocnionej izolacji. Jak widzimy z tych rysunków, każda faza posiada 2 grupy zwojów o wzmocnionej izolacji:



Rys. 184

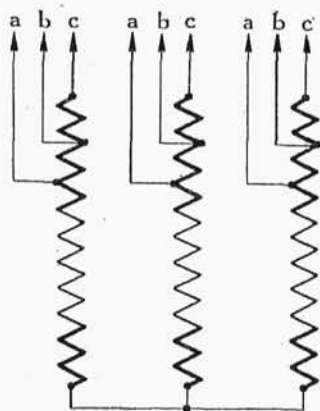


Rys. 185.

na końcu i na początku. Każda z nich posiada około 10% zwojów fazy. Izolacja międzyczwojowa powinna wytrzymać pełne napięcie robocze.

d) *Regulacja napięcia.* Nowoczesne transformatory b. często są zaopatrywane od strony wysokiego napięcia w zaczepty, pozwalające na regulowanie przekładni w małych granicach $(4 \div 5) \%$.

Umożliwia to wyrównanie spadków napięć w sieci zasilającej.



Rys. 186.

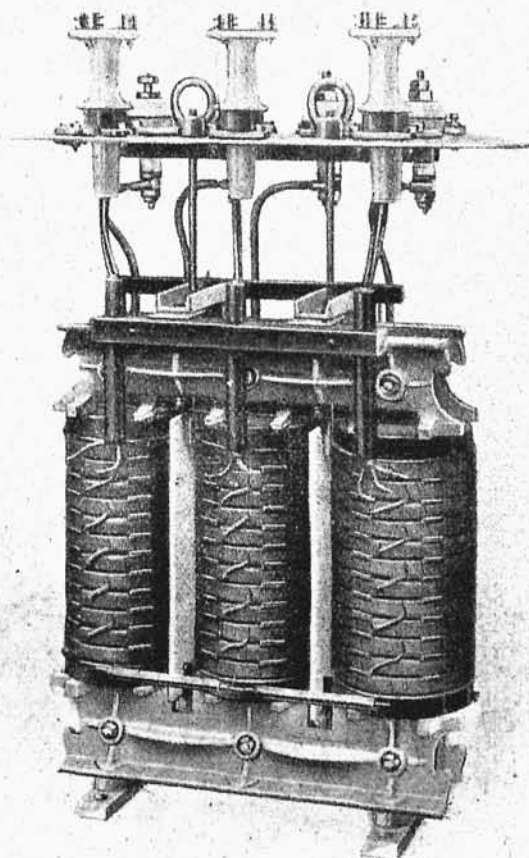
Wskazanem jest, aby odłączalne grupy zwojów, np. na rys. 186 między zaczeptami *a* i *b* lub *b* i *c*, stanowiły pełną cewkę — by nie robić odprowadzeń ze środka cewki. Ponieważ wygodniej jest odprowadzać ze strony zewnętrznej cewki — najlepiej używać tutaj dwucewek. Kilka sposobów regulacji napięcia zapomocą zaczeptów widzimy na rys. 186, 188 i 189.

Na rys. 186 mamy schemat regulacji przy połączeniu w Δ , spotykany dość często przy transformatrach mniejszych mocy.

Przez izolator przepustowy (rys. 187) — przechodzą wszystkie 3 odprowadzenia (*a*, *b* i *c*). Łącząc z szynami zbiorczymi *RST* zaczepty *b* każdej z faz, mamy przekładnię normalną.

Przy załączeniu na szyny zbiorcze zaczeptów *c* — uzyskujemy zwiększoną przekładnię — a przez to niższe napięcie po stronie wtórnej.

Przy załączeniu na szyny zaczepów *a* — zmniejszamy przekładnię i podnosimy napięcie po stronie wtórnej.



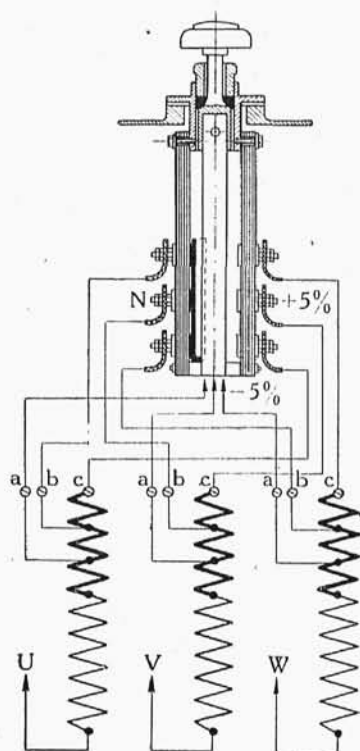
Rys. 187.

Na rys. 188 widzimy schemat regulacji dla połączenia gwiazdowego, przy której należy zastosować przełącznik.

Odprowadzenia *U*, *V*, *W* idą do izolatorów, a przełącznik tworzy zero, zwierając ze sobą we wszystkich trzech fazach zaczepty *b* (przekładnia normalna), lub *a* (przekładnia zmniejszona — napięcie wtórne wyższe), lub *c* (przekładnia zwiększona — napięcie wtórne niższe).

Na rys. 189 mamy schemat regulacji przy której zaczepty są odprowadzone ze środka każdej z faz. Zaczeptów jest cztery, przełącznik zwiera kolejno albo kontakty *b*—*c* (przekład-

nia normalna), albo $a - b$ (przekładnia zwiększona), albo $c - d$ (przekładnia zmniejszona). Ten sposób regulacji należy uważać za najlepszy — może być stosowany przy połączeniu uzwojenia wysokiego napięcia zarówno w Δ jak i Λ .



Rys. 188.

W chwili przełączania trzeba transformator od sieci odłączyć. Przy większych jednostkach zaopatrjuje się niekiedy transformator w przełącznik, pozwalający na regulację napięcia pod obciążeniem (patrz VII—6·a).

Na schematach 186, 188, 189 zgrubione linje oznaczają zwoje o wzmocnionej izolacji.

Uwaga. Zaczepy w zasadzie można by było dawać i od strony niższego napięcia. Stwarza to jednakże 2 trudności:

1) Doprowadzenia do przełącznika musiałyby posiadać duże przekroje—takie jak przekrój przewodów niskiego napięcia.

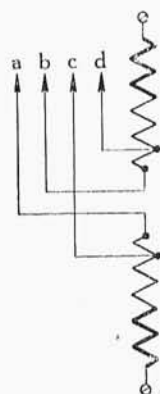
2) Drugą trudność wyjaśnimy na przykładzie. Mamy np. transformator trójfazowy 100 kVA; strona wtórna połączona w Λ , napięcie międzyczaskowe 231 V. Regulacja w granicach $\pm 5\%$.

$$\text{Napięcie fazowe } \frac{231}{\sqrt{3}} = 133 \text{ V.}$$

Napięcie na 1 zwój przy 100 kVA wynosi ~ 4 V. Przybliżona liczba zwojów $\frac{133}{4} \approx 33$. Od tego 5% wyniesie $33 \times 0,05 = 1,65$ zw.

Można wziąć tylko 2 zw., co odpowie $\frac{2}{33} 100 \approx 6\%$.

Widzimy zatem, że z powodu małej liczby zwojów zaokrąglenie obliczonej odłączalnej liczby zwojów (5%) do liczby całkowitej daje znaczny błąd. Strona wysokiego napięcia posiada dużo zwojów i taki błąd, z powodu zaokrąglenia do liczby całkowitej, jest minimalny.



Rys. 189.

Po omówieniu uzwojenia cylindrycznego przechodzimy do
e) *Uzwojenia krążkowego*. Stosuje się ono znacznie rzadziej niż uzwojenie cylindryczne.

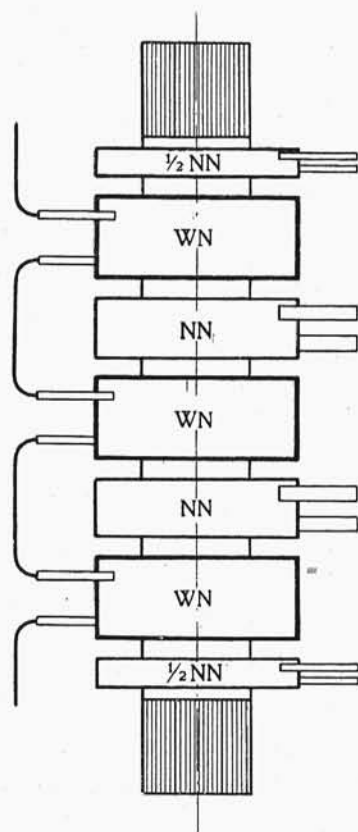
Tutaj, jak wiemy (patrz I—1 i I—4.b), każde z uzwojeń wysokiego i niskiego napięcia jest podzielone na cewki (mające wygląd krążków — stąd nazwa).

Krążki te są nakładane na słup naprzemian — raz krążek niskiego napięcia — raz wysokiego napięcia. Zewnętrzne cewkami, sąsiadującymi z jarzmem, są zazwyczaj cewki niskiego napięcia — ze względu na łatwiejsze ich odizolowanie od żelaza jarzma — aczkolwiek nie jest to regułą i spotkać się można z zewnętrznymi cewkami wysokiego napięcia.

Dla powtórzenia przypomamy, że uzwojenia krążkowe dzielą się na symetryczne i niesymetryczne (patrz I—4.b). Na rys. 190 widzimy typowy układ cewek przy uzwojeniu krążkowym symetrycznym. Przy tym najbardziej rozpowszechnionym układzie, cewki zewnętrzne, sąsiadujące z jarzmem, otrzymują połowę tej liczby zwojów, co cewki pozostałe, tak, że ostatecznie mamy n cewek jednego napięcia i $(n-1) + 2 \times \frac{1}{2} = n$ cewek drugiego napięcia.

Uzwojenie krążkowe stosuje się naogół przy transformatorach suchych, gdyż daje jednakowe warunki chłodzenia dla obu uzwojeń.

Pozatem możemy spotkać ten rodzaj uzwojenia i w transformatorach olejowych, o ile prąd w uzwojeniu niskiego napięcia jest tak duży, że wymaga prowadzenia wieloma gałęziami równoległymi. Np. transformator trójfazowy 1000 kVA — napięcie po stronie niskiego napięcia 400/231 V. Prąd fazowy $I = \frac{1000000}{3 \cdot 231} = 1445$ A. Przyjmując



Rys. 190.

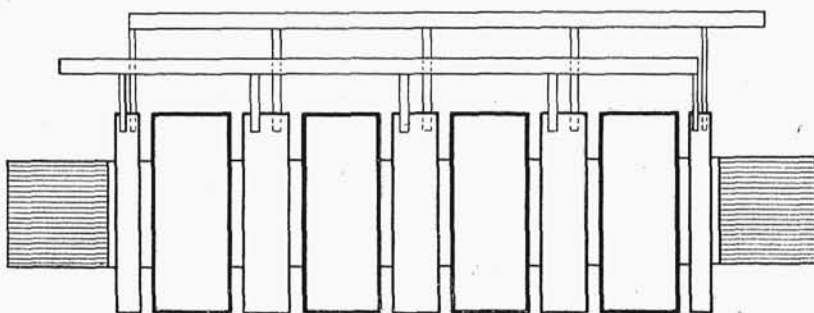
gęstość prądu $j \approx 3,5$ A/mm² otrzymalibyśmy przekrój $s \approx \frac{1445}{3,5} \approx 413$ mm².

Takiego przekroju nie można dać ani ze względu na trudności przy wykonaniu, ani ze względu na duże straty dodatkowe w miedzi, któreby przy tem wystąpiły. Należy zastosować kilka gałęzi równoległych, np. 8 — wtedy przekrój przewodu każdej z gałęzi wypadłby $\frac{413}{8} \approx 52 \text{ mm}^2$, co już jest zupełnie możliwe.

Jedną gałąź równoległą stanowiłaby jedna cewka, cewek byłoby osiem i byłyby one ze sobą połączone równolegle.

Cewki wysokiego napięcia są ze sobą łączone szeregowo, jak to widzimy na rys. 190. Cewki niskiego napięcia mogą być łączone w zależności od potrzeby albo szeregowo — przy mniejszych mocach, albo równolegle — przy mocach większych, jak to widzieliśmy na wyżej przytoczonym przykładzie. Możliwe jest również łączenie szeregowo-równoległe.

Na rys. 191 widzimy równoległe łączenie cewek niskiego



Rys. 191.

napięcia.

Jak wskazuje rys. 190 i 191 przy uzwojeniu krążkowym najwygodniej jest, jeżeli oba końce każdej cewki są wyprowadzone na zewnątrz, wtedy łączenie cewek ze sobą — obojętnie szeregowo czy równoległe — jest rzeczą prostą.

Możemy wyciągnąć wniosek, że najwłaściwszym typem cewki przy uzwojeniach krążkowych jest dwucewka — zarówno dla uzwojenia niskiego napięcia, jak i wysokiego.

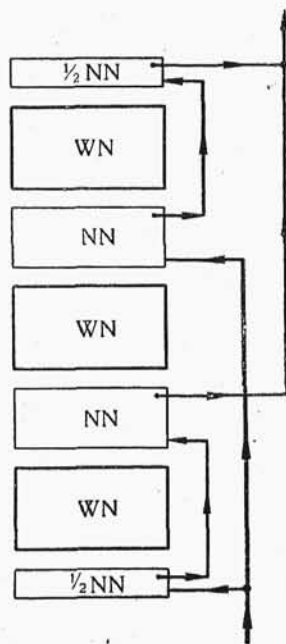
Przy transformatorach o chłodzeniu powietrznym (suchych) między połówkami dwucewki często daje się szczelinę (patrz rys. 25) — w celu polepszenia warunków chłodzenia. Według Vidmara szerokość szczeliny powietrznej — by chłodzenie było skuteczne — przy mocach przekraczających 30 kVA, winna wynosić minimum 15 mm.

Uwaga. Przy transformatorach Pichlera (patrz rys. 70 i 210) dwucewki najczęściej są wykonywane jako całość — bez szczeliny.

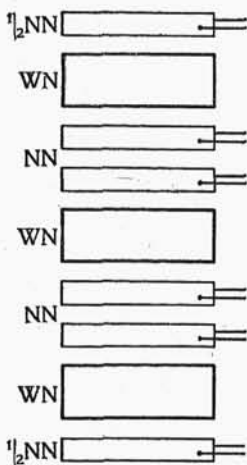
Przejdziemy teraz do omówienia równoległego łączenia cewek niskiego napięcia.

Pewną, pozorną zresztą, trudność przy łączeniu równoległym nasuwa ta okoliczność, że cewki zewnętrzne posiadają dwa razy mniej zwojów, niż pozostałe. W pewnych wypadkach trudność ta da się ominąć, np. gdy mamy $n=3$ i chcemy otrzymać dwie gałęzie równoległe; uzwojenie niskiego napięcia posiada dwie półcewki skrajne i dwie pełne cewki środkowe. Każdą z 2 gałęzi równoległych stanowią, jak wskazuje rys. 192, połowa cewki i pełna cewka, szeregowo ze sobą połączone. Podobnie ma się sprawa z uzyskaniem dwóch gałęzi równoległych przy każdej nieparzystej liczbie cewek n .

Półcewkę skrajną możemy również i bezpośrednio łączyć równoległe z cewką pełną. To jest możliwe wtedy, gdy zarówno w cewce pełnej, jak i w półcewce są wzniecane jednakowe SEM-e, oraz jeżeli obie posiadają przy właściwych sobie prądach jednakowe spadki napięcia. Osiągamy to przez nadanie półcewce takiej samej liczby zwojów, jakie posiada cewka pełna, o przekroju przewodów jednakże ściśle dwa razy mniejszym, niż w cewce pełnej — oporność omowa jak i indukcyjna tak zmienionej półcewki skrajnej będzie dwa razy większa od oporności cewki pełnej — przez półcewkę popłynie taki prąd,



Rys. 192.



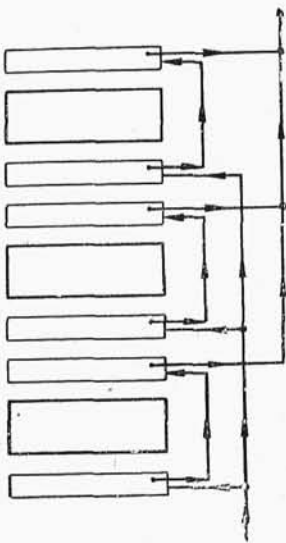
Rys. 193.

byspadek napięcia na oporności półcewki był równy spadkowi napięcia na oporności cewki całkowitej. Na rys. 191 widzimy właśnie takie równoległe łączenie półcewek skrajnych z cewkami pełnymi. Mamy tu 3 gałęzie równoległe jednakowe oraz 2 gałęzie skrajne, dające prąd połowiczny w stosunku do prądu w trzech gałęziach środkowych.

Możliwa jest jeszcze inna kombinacja przy łączeniu równoległym: zamiast cewki pełnej można dawać dwie obok siebie leżące półcewki (takie same jak skrajne), każda posiadająca dwa odprowadzenia (tak zrozumiana półcewka powinna mieć konstrukcję dwucewki). W ten sposób możemy

uzyskać (maksymalnie) tyle gałęzi równoległych, ile jest półcewek, czyli $2n$.

Na rys. 193 przy $n=3$ mamy 6 półcewek niskiego napięcia, które możemy łączyć równolegle, szeregowo, lub tworzyć kombinacje szeregowo-równoległe. Przyłączeniu szeregowo-równoległym możemy otrzymać 2 gałęzie równoległe (w każdej po 3 połówki) lub

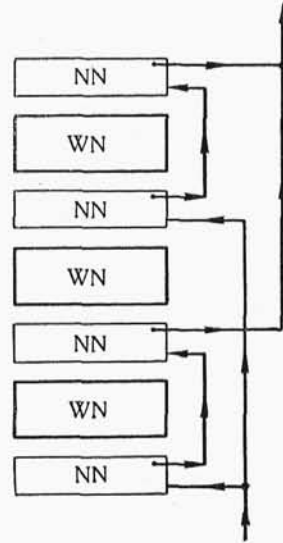


Rys. 194.

3 gałęzie (w każdej po 2 połówki).

Na rys. 194 widzimy uzwojenie niskiego napięcia z rysunku poprzedniego, poprowadzone w 3-ch gałęziach równoległych.

Przy układzie niesymetrycznym (rys. 195) jedno uzwojenie jest podzielone na n cewek, drugie na $n+1$. Zazwyczaj mamy $n+1$ cewek niskiego napięcia (wtedy przy jarzmie ma-



Rys. 195.

my cewki niskiego napięcia — rys. 195).

Układ niesymetryczny w stosunku do układu symetrycznego ma tę zaletę, że każde z uzwojeń składa się z zupełnie jednakowych cewek (niema półcewek skrajnych — jak w symetrycznym).

Zasadniczą wadą tego układu jest ta okoliczność, że poszczególne cewki znajdują się pod wpływem różnych strumieni rozproszenia. Z tego powodu indukcyjne spadki napięć w poszczególnych cewkach nie są jednakowe — cewek nie można łączyć ze sobą równoległe. Gdy liczba cewek niskiego napięcia ($n+1$) jest parzysta, można uzyskać 2 gałęzie równoległe — jak na rys. 195, gdzie $n+1=4$. Przy ($n+1$) nieparzystym — żadnego łączenia równoległego przeprowadzić nie można.

Oporność indukcyjną zwarcia ($x_z = x_1 + 3^2 x_3$) można obliczyć ze wzoru:

$$x_z \cong \frac{4,4 f l_{sr} w_1^2 \left(\partial + \frac{a_1 + a_2}{6} \right)}{n b} 10^{-8} \text{ omów} \quad \dots (5)$$

gdzie f — częstotliwość; w_1 — liczba zwojów wys. nap. w jednej fazie; n — liczba cewek wysokiego napięcia:

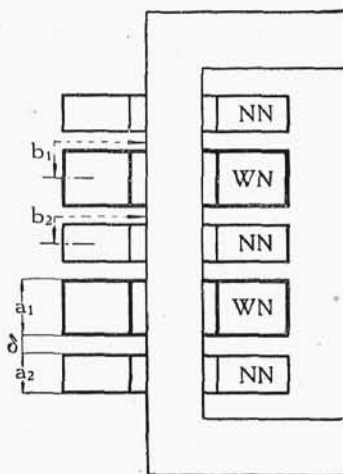
$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}$$

$b_1, b_2, a_1, a_2, \delta$ — jak na rys. 196 — w centymetrach;

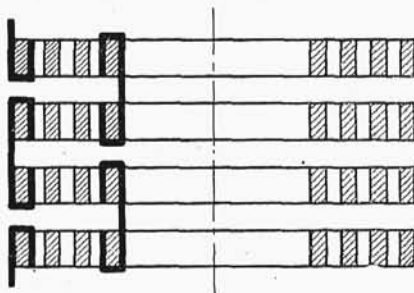
l_{sr} — średnia ze średnich długości zwojów uzwojeń wysokiego i niskiego napięcia.

Poza rozpatrzonym układem niesymetrycznym istnieje jeszcze jeden, jednakże ma znaczenie raczej tylko teoretyczne.

f) Omówimy jeszcze w paru słowach *cechy charakterystyczne uzwojeń dużych transformatorów przesyłowych*. Spotykamy się tutaj z reguły z uzwojeniem cylindrycznym. Uzwojenie górnego napięcia tych transformatorów składa się zazwyczaj z cewek



Rys. 196.



Rys. 197.

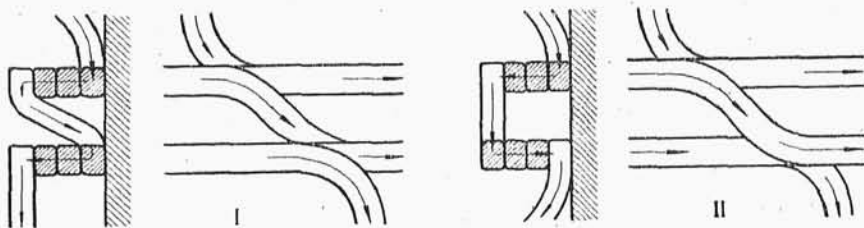
płaskich z jednym zwojem w warstwie. Na rys. 197 widzimy kilka cewek, połączonych ze sobą w szereg. Można tutaj nawet używać przewodów gołych, dając między zwojami przekładki z preszpanu, częściej jednak stosuje się przewody izolowane (patrz X—5-a i b).

Wykonanie uzwojeń, jak na rys. 197, ma tę wadę, że uzwojenie posiada szereg miejsc lutowa-

nych, poza tym w wypadku wykonania uzwojeń z przewodu izolowanego nie mamy ciągłości izolacji. Jednemu i drugiemu może zapobiec np. sposób nawijania, stosowany przez A. E. G., przy którym całe uzwojenie jest zbudowane z jednego przewodu. Rys. 198 nam to wyjaśni.

Najpierw nawija się dwie zwyczajne cewki, jak na rys. 198^I, poczem zwoje cewki drugiej rozluźnia się i przekształca tę cewkę w ten sposób, że z jej przewodów nawija się tuż obok inną, przy czem początkiem tej nowej cewki będzie koniec poprzedniej drugiej. Po przeszerokowaniu zwojów otrzymamy obraz jak na rys. 198^{II}. Nawijamy potem (ciągle tym samym przewodem) nowe dwie cewki, drugą z nich przekształcamy, jak wyżej i t. d.

Uzwojenie dolnego napięcia w transformatorach przesyłowych może być wykonane również z cewek płaskich z jednym zwojem



Rys. 198.

w warstwie, przyczem cewki te niekiedy tworzą grupy szeregowo równoległe, by uniknąć stosowania dużych przekrojów.

Przy mocach b. dużych, względnie stosunkowo niskich napięciach uzwojenie dolnego napięcia bywa wykonywane, jako cewka jednowarstwowa, przyczem — by zmniejszyć dodatkowe straty w miedzi — prowadzi się często tę cewkę w kilku gałęziach równoległych, przeplatając je ze sobą, podobnie jak to jest przedstawione na rys. 167 i 168.

Przy transformatorach dużych należy zwracać uwagę jeszcze na jedną rzecz, która przy mniejszych może być zwykle pominięta. Trzeba mianowicie dbać o to, by uzwojenia posiadały dostatecznie dużą powierzchnię, odprowadzającą ciepło, w przeciwnym bowiem razie, przy większych gęstościach prądu, jak to bywa zwykle w tych transformatorach, wzrost temperatury przekroczyć może łatwo granice dopuszczalne.

Budowa płaskich cewek z jednym zwojem w warstwie jest tu bardzo korzystna, gdyż każdy z przewodów styka się bezpośrednio z olejem. Winno być jednakże olejowi zapewnione swobodne krążenie — tak, by mógł omywać cewkę ze wszystkich stron. W tym celu trzeba stworzyć dostatecznie szerokie kanały, zarówno w kierunku poosiowym, jak i promieniowym. Nie powinny być one węższe od jakichś 6 mm.

Gdy mamy w ten sposób zapewnione krążenie oleju, można uważać, że cała powierzchnia cewek bierze udział w odprowadzaniu ciepła.

Doświadczenie wykazało, że o ile na 1 m^2 powierzchni chłodzenia przypada 1000 W., różnica temperatur między powierzchnią cewek a olejem wynosi około 10°C .

Sprawdzanie chłodzenia samych uzwojeń odbywa się w ten sposób, że się oblicza powierzchnię chłodzącą [w m^2] i dzieli się przez nią straty w uzwojeniu. Rachunek należy przeprowadzić oddzielnie dla każdego z uzwojeń. Naogół na 1 m^2 nie powinno wypadać

więcej niż ~ 1300 W. Jeżeli powierzchnia chłodząca okaże się za mała, należy albo obniżyć straty przez przyjęcie mniejszej gęstości prądu, albo powiększyć powierzchnię przez zastosowanie kanałów między poszczególnymi zwojami, względnie grupami zwojów. Uzwojenie dolnego napięcia na rys. 258 posiada właśnie jeden taki kanał. Przy obliczaniu powierzchni chłodzącej kanały te należy uwzględniać jednostronnie (patrz X—5-b).

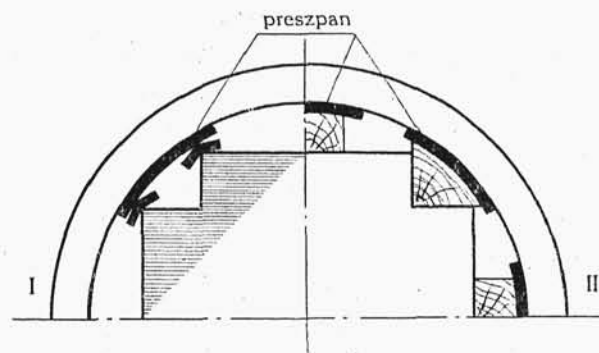
3. Osadzenie uzwojeń na słupie.

a) *Przy uzwojeniu cylindrycznem* uzwojenia niskiego i wysokiego napięcia umieszcza się na słupie współśrodkowo; wewnętrzną warstwę stanowi cewka niskiego napięcia — jako dająca się łatwiej odizolować od żelaza słupa, nazewnątrz zaś mamy uzwojenie wysokiego napięcia podzielone na cewki, według zasad poprzednio omówionych.

Osadzenie uzwojeń na słupie schematycznie jest przedstawione na rys. 203.

Ponieważ między uzwojeniami mogą wystąpić znaczne siły (przy ewentualnem zwarciu), osadzenie to winno być pewne i mocne.

Na rys. 199 widzimy dwa sposoby umieszczenia na słupie



Rys. 199.

uzwojenia niskiego napięcia. Z lewej strony (I) mamy konstrukcję lżejszą, z prawej (II) — solidniejszą z klinami drewnianymi na całą wysokość słupa. W ostatnim wypadku, jak widać z rysunku, nie możemy ściągać słupów zapomocą bandaży ze szpagatu (jak na rys. 147).

W obu wypadkach można wykonać cewkę niskiego napięcia bez nawijania jej na tuleję izolacyjną. Gdy mamy cewkę ni-