

ROZDZIAŁ IX.

GRZANIE SIĘ I CHŁODZENIE TRANSFORMATORA.

1. Pojęcia ogólne.

Weźmy jakiś transformator i, pozostawiając bez zmiany wyzyskanie żelaza i miedzi (czyli pozostawiając bez zmiany indukcje w obwodzie magnetycznym $B = \text{const.}$ i gęstości prądu w obwodzie elektrycznym $j = \text{const.}$, zwiększymy wszystkie jego wymiary linijowe dwukrotnie. Przekroje żelaza i miedzi wzrosną czterokrotnie. Strumień magnetyczny i prąd w uzwojeniach, biorąc pod uwagę poprzednie założenia, również wzrosną czterokrotnie. Przy czterokrotnym wzroście strumienia, czterokrotnie wzrośnie SEM, wzniesiona w uzwojeniach. Ostatecznie podwojenie wymiarów linijowych wywołało czterokrotny wzrost prądu i takież sam wzrost SEM — moc transformatora wzrosła 16-to krotnie ($16 = 2^4$). Widzimy, że moc transformatora jest proporcjonalna do czwartej potęgi wymiarów linijowych.

Objętość, a zatem i ciężar żelaza i miedzi wzrośnie ośmiokrotnie, czyli proporcjonalnie do trzeciej potęgi wymiarów linijowych; ponieważ zaś straty w żelazie i w miedzi przy niezmiennym wyzyskaniu materiałów ($B = \text{const.}$, $j = \text{const.}$) są proporcjonalne do ciężarów:

$$\Delta P_z = \Delta p_z \left(\frac{B}{10000} \right)^2 G_z \qquad \Delta P_m = 2,6 j^2 G_m$$

więc i straty wzrosną proporcjonalnie do trzeciej potęgi.

Powierzchnie zaś odprowadzające ciepło wzrosną tylko czterokrotnie — proporcjonalnie do drugiej potęgi wymiarów linijowych.

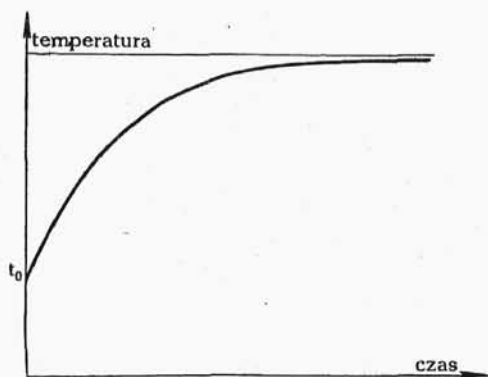
Z tego prostego rozważania możemy wysnuć dwa nader ważne wnioski: 1) transformator o większej mocy ma lepszą sprawność, gdyż ze wzrostem wymiarów straty w nim rosną wolniej (do 3-ciej potęgi), niż moc (do 4-ej potęgi). Bardzo duże transformatory na dziesiątki tysięcy kVA., mają sprawność przekraczającą 99%; 2) ze

wzrostem mocy transformatora pogarszają się warunki chłodzenia, gdyż wielkość powierzchni odprowadzających ciepło rośnie wolniej (do 2-giej potęgi wymiarów linjowych) niż straty (do 3-ciej potęgi wymiarów linjowych).

Przy transformatorach dużej mocy problem dobrego odprowadzenia ciepła jest jednym z najgłówniejszych — wtedy gdy przy mocach małych zajmuje miejsce drugorzędne i nie nasuwa większych trudności. Przy mocach małych wystarcza naturalne chłodzenie powietrzne, mamy t. zw. *transformator suchy*. By polepszyć odprowadzenie ciepła stosuje się niekiedy specjalne blachy miedziane, cynkowe lub aluminiowe, wsunięte między cewkami (patrz transf. Pichlera II-7-a).

Z transformatorem suchym spotykamy się rzadko — ze względu na mniejszą pewność ruchu. Moc transformatorów suchych nie przekracza naogół 300 kVA, napięcie zaś 10.000 V.; dla napięć wyższych wypadłoby stosować zbyt duże odstępy między uzwojeniami, oraz między uzwojeniem, a żelazem.

Zapobiega temu, oraz b. znacznie poprawia warunki chłodzenia *umieszczenie transform. w pudle wypełnionem olejem*. Tutaj krążenie oleju powoduje przenoszenie ciepła od transformatora właściwego do ścianek pudła, a stąd nazewnątrż. Przy mocach bardzo dużych olej należy chłodzić za pomocą specjalnych urządzeń — chłodzenie sztuczne. Ciepło wywiązujące się w transformatorze jest przezeń oddawane do otaczającego środowiska za pośrednictwem promieniowania, oraz konwekcji i przewodnictwa. Ilość ciepła oddawanego w jednym i drugim wypadku w jednostce czasu jest proporcjonalna do powierzchni, odprowadzającej ciepło oraz do różnicy temperatur między transformatorem a ośrodkiem. W pierwszych chwilach pracy transformatora różnica temperatur jest mała — ciepło, wytwarzane przez transformator, pozostaje w nim i idzie na podniesienie jego temperatury; z czasem różnica temperatur wzrasta —



Rys. 217.

następuje intensywniejsza wymiana ciepła — temperatura wzrasta wolniej i po kilku lub kilkunastu godzinach (zależnie od mocy), praktycznie biorąc, ustala się. Wzrost temperatury w transformatorze obrazuje krzywa z rys. 217 (t_0 — temp. otoczenia). Wysokość obciąż-

żenia transf. (czyli jego moc) jest ograniczana właśnie przez tę końcową temperaturę, gdyż temperatura końcowa nie może przekroczyć pewnych granic niebezpiecznych ze względu na trwałość izolacji. Według przepisów niemieckich (VDE RET 1930) temp. dopuszczalna dla poszczególnych części transf. nie może przekroczyć wartości podanych w tabeli XV (przyjmuje się, że temp. otoczenia = 35° C.).

TABELA XV

	Temperatura maxim.	Wzrost temp. ponad otocz.
1. Bawełna, papier { nienasycona	85° C	50°C
jedwab, drzewo { nasyciona	95° C	60°C
{ w oleju	105° C	70°C
2. Przetwory mikowe lub azbestowe	115° C	80°C
3. Rdzeń żelazny { Transformator suchy	95° C	60°C
{ „ olejowy	105° C	70°C
4. Olej w górnych warstwach	95°C	60°C

Projekt przepisów polskich przewiduje, jako najwyższą temperaturę otoczenia, również 35° C. Dopuszczalne przyrosty temperatury zawiera tabela XVI.

TABELA XVI

Bawełna, papier,	Uzwojenie chłodzone powietrzem zarówno w sposób naturalny, jak i sztuczny	nienasycone . . .	50°C
jedwab		nasycone . . .	60°C
„	Uzwojenie, zanurzone w oleju		70°C
Mika, azbest i t. p.			80°C
Olej w górnej warstwie			60°C
Rdzeń żelazny transformatorów suchych			60°C
„ olejowych			70°C

Rozróżniamy następujące rodzaje prac dla transformatorów:

1. Praca ciągła, przy której transformator, pracując dowolnie długo, nie przekroczy dozwolonych przyrostów temperatury. Moc transform. odpowiadająca tej pracy, będziemy nazywali mocą pracy ciągłej.

2. Praca dorywcza, trwająca pewien zgóry określony czas (np. n minut), podczas którego przyrosty temperatur nie mogą przekroczyć granic dopuszczalnych. Przerwa w pracy winna trwać tak długo, aż transformator ostygnie. Moc, którą transformator oddaje przy takiej pracy, nosi nazwę mocy pracy dorywczej (np. moc 10 kVA. 30 minut).

3. Praca przerywana, składająca się z szeregu krótkotrwałych obciążeń, przerywanych przez odłączenie uzwojenia wtórnego od sieci zasilanej. Czas trwania obciążenia i następującego po nim stanu jałowego łącznie nie powinien przekraczać 10 min. Pracę przerywaną określa się za pomocą przeciętnego względnego czasu pracy, obliczonego jako stosunek sumy czasu trwania obciążeń do całego czasu pracy przerywanej.

Mocą pracy przerywanej (wyrażoną w %) nazywamy taką moc, która może być oddawana bez przekroczenia dopuszczalnego przyrostu temperatury, jeżeli czas pracy wynosi n % całego czasu przerwy i pracy razem.

Jasną jest rzeczą, że moc dorywcza, względnie przerywana będzie dla tego samego transformatora większa, niż moc ciągła.

4. Istnieje jeszcze jeden rodzaj pracy — okresowo-wzmoczonej. Według projektu norm polskich jest to taka praca, przy której transformator może podlegać trwałym przeciążeniom o 60%, oraz w ciągu około 500 godzin w roku przeciążeniom 100%, trwającym 12 godzin na dobę. Dopuszczalny jest wtedy większy przyrost temperatury o 10° C.

Transformatory takie nadają się specjalnie dla zasilania energią elektryczną gospodarstw rolnych. O ile mówimy poprostu o mocy transformatora, należy uważać, że to jest moc pracy ciągłej.

Możemy teraz przejść do omówienia poszczególnych rodzajów chłodzenia.

2. Transformator suchy.

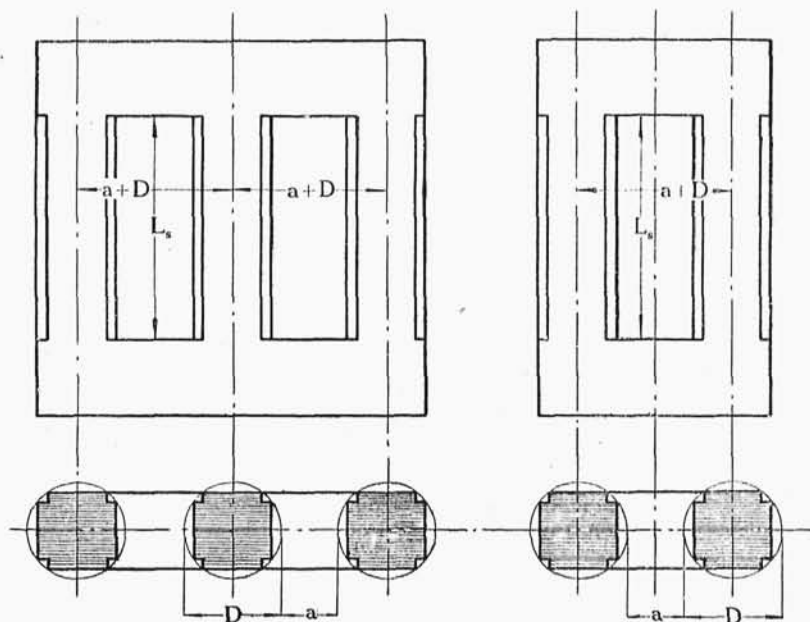
Ciepło, wytwarzane w transformatorze jest odprowadzane nazewnątrż za pośrednictwem promieniowania oraz konwekcji i przewodnictwa.

Głównem zadaniem przy obliczaniu chłodzenia suchego transformatora jest wyznaczenie dwóch powierzchni: 1) odprowadzającej ciepło przez promieniowanie A_{pr} ; 2) odprowadzającej ciepło za pomocą przewodnictwa i konwekcji (głównie konwekcja) A_k . Mając powierzchnie, możemy obliczyć ciepło, które one mogą odprowadzić.

Zazwyczaj rachunek bywa przeprowadzony oddzielnie dla uzwojeń i oddzielnie dla rdzenia żelaznego.

a) *Uzwojenia*. Przy transformatorach suchych najczęściej spotykamy się z uzwojeniami krążkowymi, gdyż stwarzają one dogodne warunki chłodzenia dla uzwojeń zarówno wysokiego, jak i niskiego napięcia.

Promieniowanie. Powierzchnią promieniowania A_{pr} będzie tu powierzchnia obwiedni dookoła uzwojeń transformatora, a zatem, biorąc oznaczenia, jak na rys. 218, oraz przyjmując, że średnica słupa uzwojonego wynosi $D + a$, otrzymamy:



Rys. 218.

Dla transformatora trójfazowego:

$$A_{pr} \cong [4(a + D) + (a + D)\pi] L_s \cong 7,14(a + D) L_s \text{ m}^2.$$

Dla transformatora jednofazowego:

$$A_{pr} \cong [2(a + D) + (a + D)\pi] L_s \cong 5,14(a + D) L_s \text{ m}^2.$$

Doświadczenie wykazuje, że 1 m^2 powierzchni promieniowania uzwojeń transformatora w ciągu 1 sek. przy różnicy temperatur 1°C wypromieniuje w przestrzeń $h_{pr} \cong 6 \text{ W/}^\circ \text{C m}^2$.

Wobec tego moc wypromieniowywaną można obliczyć według wzoru:

$$\Delta P' = 6 \Delta t A_{pr} \text{ watów}$$

gdzie Δt — wzrost temperatury powierzchni uzwojeń ponad temperaturę otoczenia.

Konwekcja i przewodnictwo. Przy małych transformatorach (do 10 kVA), gdzie liczyć na kanały chłodzące między cewkami nie możemy (niedostateczna ich szerokość — ze względu na małe wymiary całego transformatora), powierzchnię A_k możemy obliczyć według przybliżonych wzorów (Vidmar):

Dla transformatora trójfazowego: $A_k \cong 9(a + D) L_s \text{ m}^2$.

Dla transformatora jednofazowego: $A_k \cong 6(a + D) L_s \text{ m}^2$.

Przy mocach wyższych należy dążyć, by wszystkie kanały chłodzące nie były węższe od 15 mm — wtedy na powierzchnię A_k składają się całkowite powierzchnie wszystkich cewek.

Można uważać, że 1 m² odprowadzi przez konwekcję i przewodnictwo w ciągu 1 sek. przy różnicy temperatur 1°C $h_k \cong 7 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$.

Wtedy moc odprowadzona w ten sposób przez transformator:

$$\Delta P'' = 7 \Delta t A_k \text{ watów.}$$

Moce $\Delta P'$ i $\Delta P''$ w sumie będą dawały moc straconą w miedzi uzwojeń (w założeniu że temperatura jest ustalona).

$$\Delta P_m = \Delta P' + \Delta P'' = (6 A_{pr} + 7 A_k) \Delta t$$

skąd

$$\Delta t = \frac{\Delta P_m}{6 A_{pr} + 7 A_k} \quad \dots (1)$$

Przy transformatorach suchych dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia wynosi 60°C. Temperatura średnia uzwojeń (mierzona sposobem opornościowym) jest wyższa od temp. powierzchni cewek o jakie 15 ÷ 20°. Pozostaje na różnicę między temperaturą powierzchni cewek, a otoczeniem $\Delta t \cong 40 \div 45^\circ \text{C}$.

Przyrost temperatury obliczony ze wzoru (1) nie może przeto przekroczyć tej wartości.

b) *Przykład.* Sprawdzić na grzanie uzwojenia suchego transformatora jednofazowego (I-4.c). Straty w miedzi uzwojeń wynoszą $\Delta P_m = 945 \text{ W}$.

$$D = 165 \text{ mm}; \quad a = 162 \text{ mm}; \quad L_s = 665 \text{ mm};$$

$$A_{pr} = 5,14 (0,162 + 0,165) \cdot 0,665 = 1,12 \text{ m}^2.$$

Celem obliczenia powierzchni A_k obliczymy osobno powierzchnię półcewek niskiego i wysokiego napięcia.

Szerokość cewek obu napięć przyjmujemy jednakową:

$$\frac{55,6 + 55,4}{2} = 55,5 \text{ mm.}$$

Średnica zewnętrzna cewek: $165 + 2 \times 15 + 2 \times 55,5 = 306 \text{ mm.}$

Średnica wewnętrzna cewek: $165 + 2 \times 15 = 195 \text{ mm.}$

Powierzchnia całkowita półcewki wysokiego napięcia:

$$\pi \cdot 0,0316 (0,306 + 0,195) + 2 \frac{\pi}{4} (0,306^2 - 0,195^2) \simeq 0,13 \text{ m}^2.$$

Powierzchnia całkowita półcewki niskiego napięcia:

$$\pi \cdot 0,0206 (0,306 + 0,195) + 2 \frac{\pi}{4} (0,306^2 - 0,195^2) \simeq 0,112 \text{ m}^2.$$

Na każdym słupie mamy po 6 półcewek niskiego i wysokiego napięcia — na obu słupach po 12.

Całkowita powierzchnia wszystkich cewek wysokiego napięcia:

$$12 \times 0,13 = 1,56 \text{ m}^2.$$

Całkowita powierzchnia wszystkich cewek niskiego napięcia:

$$12 \times 0,112 = 1,35 \text{ m}^2.$$

$$\text{Razem: } A_k = 1,56 + 1,35 \simeq 2,9 \text{ m}^2.$$

Podstawimy wyznaczone powierzchnie do równania (1):

$$\Delta t = \frac{\Delta P_m}{6 A_{pr} + 7 A_k} = \frac{945}{6 \times 1,12 + 7 \times 2,9} \simeq 35^\circ \text{ C} < 40^\circ \text{ C}$$

Widzimy, że chłodzenie transformatora jest zupełnie wystarczające.

c) *Transformator Pichlera* (rys. 70 i 210). Między cewkami uzwojenia krążkowego mamy blachy miedziane, aluminiowe lub cynkowe o kształcie, jak na rys. 219.

Żadnych szczelin powietrznych między cewkami niema. Cewki od blachy są odizolowane warstwą mikanitu lub preszpanu — zależnie od napięcia. Powierzchnie pierścieniowe cewek, przylegających możliwie ściśle do blachy, oddają jej wytworzone w nich ciepło, które jest odprowadzane nazewnątrz za pośrednictwem wystających części blachy (część na rys. 219 zakreskowana pionowo). Główną rolę przy chłodzeniu odgrywa tu konwekcja.

By blachy wzajemnie sobie jaknajmniej przeszkadzały — najlepiej je umieścić pionowo (słupy poziome) oraz nie dawać odległości między blachami mniejszej niż jakieś 20 mm.

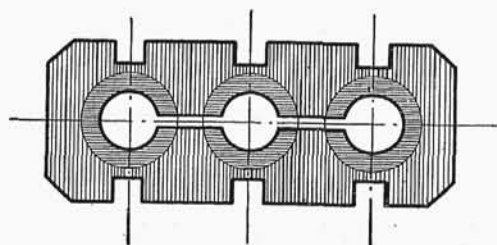
Bliskie sąsiedztwo blach, które są normalnie uziemione, i cewek wysokiego napięcia (przekładka mikanitowa $1 \div 2 \text{ mm.}$ gruba) jest

słabą stroną rozpatrywanej konstrukcji i tłumaczy, dlaczego transformatory te nie są naogół budowane na napięcia wyższe od 6000 V. Minimalną grubość blachy można obliczyć (Vidmar) według wzorów:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Dla miedzi} \quad g_{min} \cong 3 b^2 \text{ mm.} \\ \text{Dla aluminium} \quad g_{min} \cong 5 b^2 \text{ mm.} \\ \text{Dla cynku} \quad g_{min} \cong 9 b^2 \text{ mm.} \end{array} \right\} \dots (2)$$

We wzorach tych b — szerokość cewki w dcm [patrz rys. 220]. Zastosowanie blachy grubszej niż obliczona według wzorów wyżej podanych polepszy tylko, oczywiście, chłodzenie.

Wymiary blachy. Na rys. 219 mamy widok blachy chłodzącej.



Rys. 219.

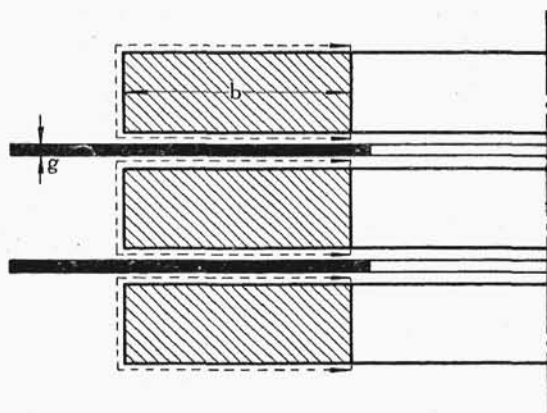
Powierzchnią pierścieniową (poziomo zakreskowaną) cewka przylega do blachy.

Gdyby blacha mogła zupełnie swobodnie odprowadzać ciepło, wystarczyłoby, by powierzchnia odprowadzająca ciepło (kreskowanie pionowe) była równa powierzchni pierścieniowej — przez którą ciepło jest do blachy doprowadzane.

Ponieważ jednakże blachy sobie wzajemnie przeszkadzają w odprowadzaniu ciepła, powierzchnię należy dać większą.

Vidmar proponuje by wystającą powierzchnię blachy brać dwa razy większą od powierzchni przylegania cewek.

Jeżeli blachy otrzymały właściwe wymiary, wtedy można uważać, że powierzchnie cewek, przylegające do blach (aczkolwiek nie w sposób bezpośredni) biorą taki sam udział w od-



Rys. 220.

przewodzeniu ciepła, jak zewnętrzne powierzchnie boczne (cylindryczne) cewek.

Na rysunku 220 mamy fragment uzwojenia z zaznaczeniem powierzchni chłodzących — linie przerywane.

Jeżeli całkowitą powierzchnię chłodzącą uzwojeń transformatora oznaczmy przez A [m²], a straty w miedzi wynoszą ΔP_m [wattów], wtedy na jednostkę powierzchni przypada $\frac{\Delta P_m}{A}$ W/m².

Vidmar na podstawie przeprowadzonych doświadczeń proponuje dla obliczenia różnicy temperatur między otoczeniem, a powierzchnią cewek pomnożyć otrzymany wynik przez 0,15.

$$\Delta t \simeq 0,15 \frac{\Delta P_m}{A} \text{ } ^\circ \text{C.} \quad \dots (3)$$

Różnica między średnią temperaturą uzwojeń, a temperaturą ich powierzchni w rozpatrywanym wypadku jest nieznaczna — wynosi naogół kilka stopni, gdyż każda z cewek jest ujęta między dwie blachy chłodzące.

d) *Rdzeń żelazny*. Powierzchnie odprowadzające ciepło z rdzenia żelaznego obliczamy podobnie, jak przy uzwojeniach,

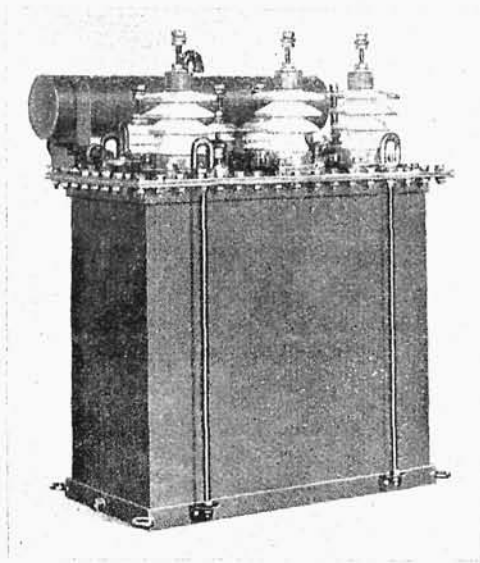
Za powierzchnię promieniowania A_{pr} uważamy wolną powierzchnię zewnętrzną jarzm. Za powierzchnię, odprowadzającą ciepło na drodze konwekcji i przewodnictwa (A_k) — całkowitą powierzchnię rdzenia (jarzma i słupy), z tem jednak zastrzeżeniem, że kanały chłodzące między uzwojeniem a żelazem są dostatecznie szerokie (min. 15 mm.). Ciepło, odprowadzone przez jedną i drugą powierzchnię oraz wzrost temperatury obliczamy na podstawie tych samych wzorów, które stosowaliśmy dla uzwojeń. Niekiedy, w celu lepszego chłodzenia, jarzma otrzymują również blachy chłodzące. Są to normalne blachy żelazne, które wystają poza zarys jarzma.

3. Transformator olejowy.

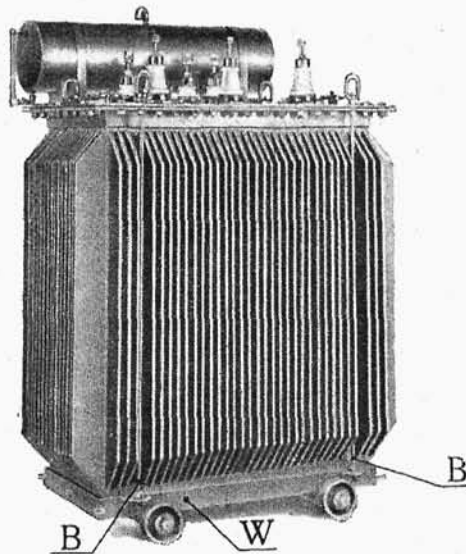
a) *Chłodzenie naturalne*. Naturalne krążenie oleju w pudle powoduje przenoszenie się ciepła od ogrzanego transformatora do ścianek pudła — a stąd do otaczającego powietrza.

Przy mocach małych do ~ 20 kVA wystarcza pudło o ściankach gładkich (rys. 221). Przy mocach większych gładkie ścianki nie dają dostatecznej powierzchni chłodzącej — stosuje się ścianki faliste (rys. 222) lub zaopatruje się je w rury (rys. 223).

Przy pudłach rurowych gorący olej trafia z górnej części pudła do rur, w rurach ochładza się i opada nadół. Przy pudłach rurowych potrzebna ilość oleju jest naogół mniejsza niż przy pud-



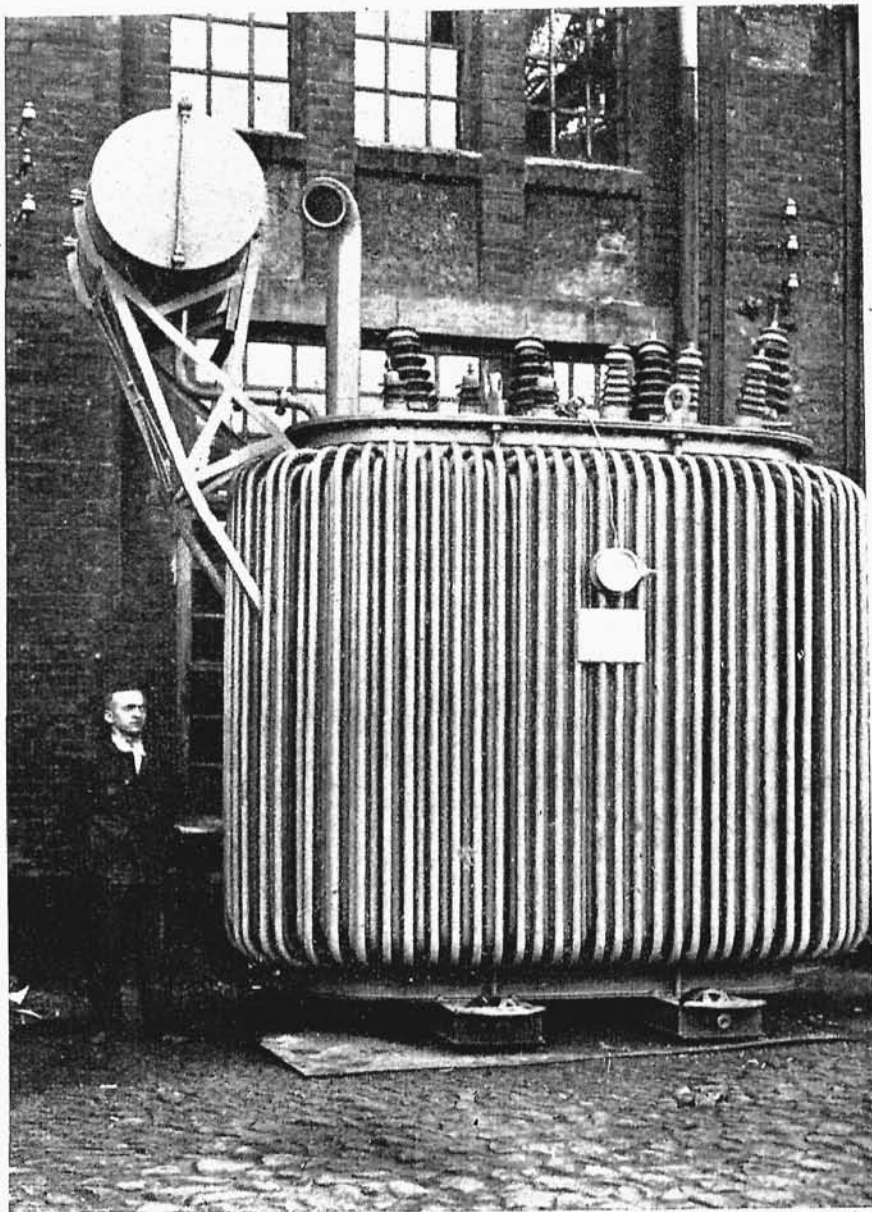
Transformator słupowy 10 kVA. 600/400/231 V. Δ/\sim P. T. E.
Rys. 221.



Transformator trójfaz, olejowy 250 kVA. $6000 \pm 4\%/0/400$ V. \sim/\sim P.T.E.
Rys. 222.

łach falowanych. Zarówno pudła falowane jak i rurowe są wykonywane z cienkiej blachy. Używa się obecnie pudeł spawanych (coraz częściej elektrycznie).

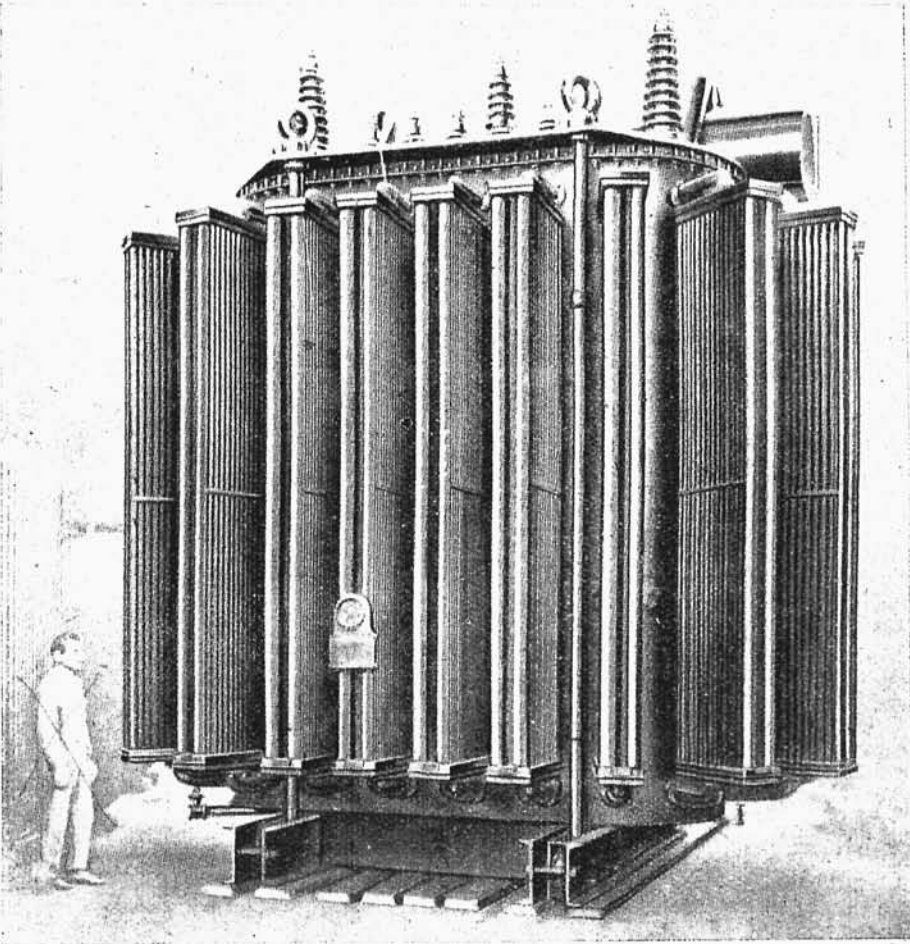
Im większa jest moc, a zatem im większe ilości ciepła należy



Transformator trójfazowy 3200 kVA, 30 kV, „Elektrobudowa”
Rys. 223.

z transformatora odprowadzić, tem głębsze należy dać falowanie, względnie tem więcej rur (więcej rzędów) otrzymuje ścianka pudła.

Przy chłodzeniu naturalnem, stosując pudła z blachy falowanej (odpowiednio głęboko) można budować transformatory do jakich 4000—6000 kVA, przy pudle rurowym do 20000 kVA. Dla jeszcze większych mocy, o ile chcemy utrzymać się przy chłodzeniu naturalnem, należy stosować t. zw. *radjatory* (rys. 224), które

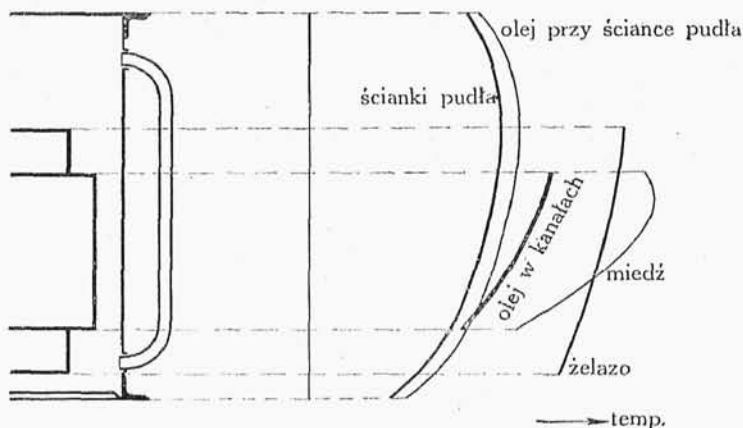


Transf. 12500 kVA 60000/12000 V. 50~/sek. Cie Française Thomson — Houston
Rys. 224.

mogą być wykonane z blachy falowanej, lub większej liczby rur. Radjatory są często odejmowalne od pudła, co ułatwia transport.

Przy pracy transformatora poszczególne jego części rozgrzewają się, oczywiście, niejednakowo, najwyższe temperatury panują w części górnej.

Rys. 225 pozwala nam zorientować się, jak się nagrzewają części składowe transformatora olejowego.



Rys. 225.

Według przepisów niemieckich (również i projektu norm polskich) dopuszczalna różnica między średnią temperaturą uzwojeń, a temperaturą otoczenia wynosi dla transformatora olejowego 70°C . Ciekawą jest rzeczą, w jaki sposób rozkłada się ta różnica w transformatorze olejowym. Richter na podstawie szeregu pomiarów daje następującą tabelę:

Między średnią temperaturą miedzi a powierzchnią uzwojeń	8 ⁰
Między powierzchnią uzwojeń i olejem	19 ⁰
Między olejem i ścianką zewnętrzną pudła	3 ⁰
Między ścianką pudła i powietrzem otaczającym	40 ⁰
Razem ponad otoczenie	70 ⁰

Z tego zestawienia widzimy, że różnica między średnią temperaturą uzwojeń (mierzoną metodą opornościową) a temperaturą powierzchni cewek wynosi około 8° . Jaką będzie temperatura najgorętszego punktu uzwojenia — dokładnie powiedzieć trudno, gdyż punkt taki mieści się wewnątrz cewki i dotrzeć do niego termometrem naogół nie można. Zgrubsza jednakże można uważać, że temperatura najgorętszego punktu uzwojenia jest o tyle wyższa od temperatury średniej, o ile średnia jest wyższa od temperatury powierzchni uzwojeń — czyli, opierając się na danych ostatniej tabeli, różnica temperatur między olejem i najgorętszym punktem uzwojeń wyniosłaby około 35°C .

Obliczenie pudła olejowego. Ciepło, wytworzone w transformatorze olejowym jest przenoszone przez olej do ścianek pudła, od

których za pośrednictwem z jednej strony promieniowania, z drugiej konwekcji wraz z przewodnictwem bywa odprowadzane na zewnątrz.

Chodzi nam o to, by powierzchnia ścianek pudła była wystarczająca dla odprowadzenia tego ciepła.

W odprowadzeniu ciepła biorą udział ścianki boczne, dno i pokrywa. Ponieważ jednakże dno i pokrywa odgrywają rolę nieznaczną, będziemy przy rachunku uważali, że odprowadzenie całego ciepła przypada na ścianki boczne.

Korzystać będziemy z tych samych doświadczalnych liczb, co przy transformatorach suchych.

$$h_{pr} \simeq 6 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2, \quad h_k \simeq 7 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2.$$

Jeżeli A_{pr} [m^2] oznacza powierzchnię odprowadzającą ciepło przez promieniowanie, a A_k [m^2] przez konwekcję i przewodnictwo, wtedy możemy napisać:

$$\Delta P = [6 A_{pr} + 7 A_k] \Delta t \text{ watów} \quad \dots (4)$$

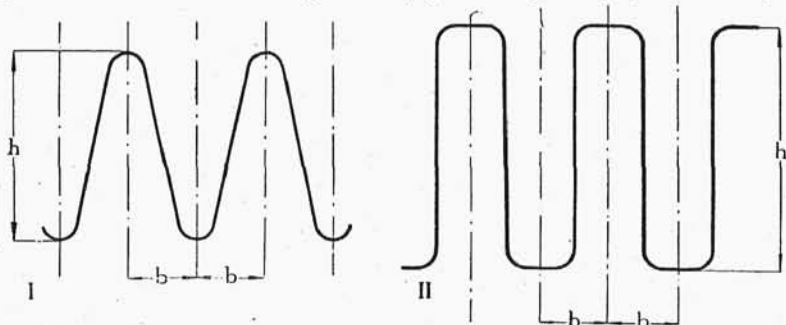
gdzie $\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_z$ — są to łączne straty w żelazie i miedzi transformatora; Δt — różnica temperatur między otoczeniem a powierzchnią pudła. Zgodnie z tabelą poprzednią można dopuścić przy chłodzeniu naturalnem $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$.

Chodzi teraz o wyznaczenie powierzchni A_{pr} i A_k .

Pudło o ściankach gładkich (do ~ 20 kVA). Tutaj powierzchnia promieniowania A_{pr} jest równa powierzchni konwekcyjnej A_k , a każda z nich jest równa rzeczywistej powierzchni bocznej pudła A .

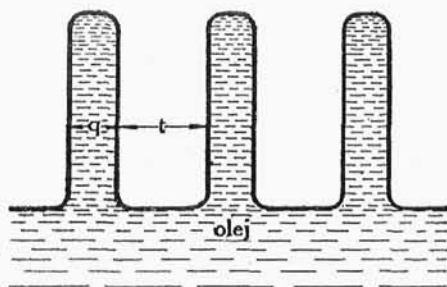
$$A_{pr} = A_k = A \quad \dots (5)$$

Pudło o ściankach falowanych, względnie zaopatrzonych w rury chłodzące. Rozróżniamy zasadniczo dwa rodzaje falowania — jak na rys. 226 I i II. Pierwszy rodzaj jest używany przy mniejszych,



Rys. 226.

drugi przy większych mocach. Im moc transformatora jest większa, tem falowanie staje się głębsze — jednocześnie zwiększa się ilość



Rys. 227.

oleju do wypełnienia załamań ścian pudła. By na oleju nieco oszczędzić, można nadać falowaniu kształt niesymetryczny, jak na rys. 227.

Oczywiście nie można dawać zbyt wąskich kanałów olejowych (q) i powietrznych (t), jak również zbyt wysokiego falowania, gdyż jedno i drugie zmniejsza skuteczność odprowa-

dzania ciepła.

Doświadczenia nad szeregiem transformatorów wykazały, że przy wysokości fali w granicach $h = 100 \div 400$ mm, szerokości kanału powietrznego $t = 28 \div 67$ mm oraz olejowego $q = 5 \div 28$ mm, odprowadzenie ciepła przez konwekcję jest zupełnie dobre (jest zachowana wartość współczynnika $h_k \cong 7 \text{ W / } ^\circ\text{C m}^2$). Naogół można powiedzieć, że kanał powietrzny (t) nie może być węższy od 25 mm, a olejowy (q) od 6 mm. Biorąc pod uwagę te zastrzeżenia, będziemy uważali za powierzchnię A_k rzeczywistą powierzchnię falowaną pudła transformatorowego.

Powierzchnią promieniowania A_{pr} będzie powierzchnia obwiedni dookoła pudła (równa wysokości pudła razy obwód pudła, pomierzony np. sznurkiem). Na podstawie wzoru (4) możemy tylko sprawdzić, czy dane pudło jest wystarczające dla odprowadzenia wywiązującego się ciepła. Postaramy się teraz podać przebieg przybliżonego rachunku dla zaprojektowania pudła.

Przy ściankach gładkich jest to bardzo proste. Ponieważ $A_{pr} = A_k = A$, więc równanie (4) przekształci się:

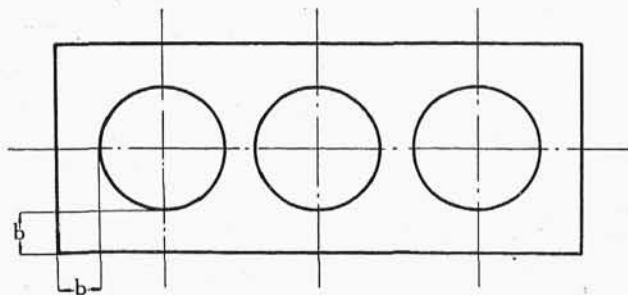
$$\Delta P = 13 A \Delta t,$$

skąd

$$A = \frac{\Delta P}{13 \Delta t} \text{ m}^2 \quad \dots (6)$$

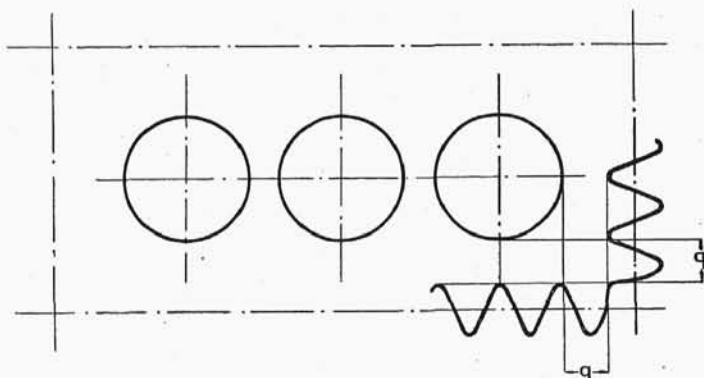
(A — powierzchnia boczna rzeczywista pudła).

Rysujemy widok naszego transformatora z góry (rys. 228) i przyjmujemy odstęp między uzwojeniami a ścianką pudła (b). Minimalny odstęp ze względów wytrzymałości elektrycznej można wyznaczyć (Richter) z zależności $b \geq 2,5 \delta$, gdzie δ — jest to szczelina między uzwojeniami wysokiego i niskiego napięcia. Odległość b niekiedy bywa obliczana według wzoru empirycznego: $b = 2 + 0,2 V \text{ cm}$,



Rys. 228.

gdzie V — napięcie robocze w kV. Obliczone wartości na b często są przekraczane—ze względu na umożliwienie olejowi swobodniejszego krążenia. Dalej obliczamy obwód pudła i, dzieląc obliczoną ze wzoru (6) powierzchnię A przez obwód, otrzymujemy niezbędną ze względu na chłodzenie wysokość pudła H_p . Jeżeli ta wysokość wypadnie mniejsza, niż to wynikałoby ze względów kon-



Rys. 229.

strukcyjnych (patrz rys. 256), decydują te ostatnie. Jeżeli będzie przeciwnie, zadecydują względy chłodzenia.

Pudło z blachy falowanej. Przyjmujemy kształt fali (rys. 230) i obliczamy stosunek

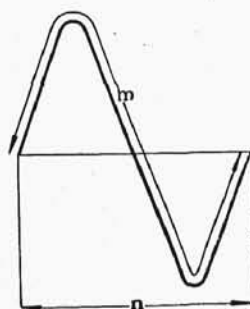
$$c = \frac{m}{n}$$

Możemy z pewnem przybliżeniem napisać:

$$\frac{A_k}{A_{pr}} \simeq \frac{m}{n} = c.$$

Z równania (4): $\Delta P = A_{pr} (6 + 7c) \Delta t$, skąd

$$A_{pr} = \frac{\Delta P}{(6 + 7c) \Delta t} \quad \dots (7)$$



Rys. 230.

Powierzchnia A_{pr} równa się obwodowi pudła, mierzonemu w linii prostej, pomnożonemu przez wysokość pudła. Długość prostoliniowego pudła można łatwo obliczyć, poczem wyznaczamy wysokość falowanej części pudła H_p , jak przy ściankach gładkich.

By wymiary pudła wypadły jaknajkorzystniej, należy zazwyczaj rachunek przeprowadzić parę razy, dopasowując odpowiednio kształt fali.

Przy *pudłach rurowych* powierzchnię promieniowania A_{pr} stanowi, jak przy pudłach falowanych, powierzchnia obwiedni.

Na powierzchnię zaś A_k składa się powierzchnia samego pudła oraz pełne zewnętrzne powierzchnie rur — o ile te ostatnie nie są tak gęsto umieszczone, że ruch powietrza jest utrudniony.

Podamy jeszcze wzory na obliczenie minimalnej *grubości ścianki pudła* ze względu na wytrzymałość mechaniczną:

1. Pudło o ściankach gładkich.

$$g = 0,003 \sqrt{H_p^3} \text{ mm} \quad \dots (8)$$

2. Pudło o ściankach falowanych według rys. 226^{II}.

$$g = \frac{H_p^3 10^{-4}}{45 h \left(1 + \frac{h}{3b}\right)} \text{ mm.} \quad \dots (9)$$

3. Pudło o ściankach falowanych według rys. 226^I.

$$g = \frac{H_p^3 10^{-4}}{23 h \left(1 + \frac{h}{3b}\right)} \text{ mm.} \quad \dots (10)$$

W powyższych wzorach H_p oznacza wysokość pudła w cm. h i b wymiary według rys. 226 w cm.

Przebieg rachunku stanie się zupełnie jasny po przerobieniu przykładu liczbowego — patrz X—4.

b) Chłodzenie sztuczne. Warunki chłodzenia transformatorów olejowych można nieco poprawić, jeżeli zastosujemy pompę, która będzie zasysała olej w części górnej pudła i przetłaczała go do części dolnej — uzyskamy w ten sposób bardziej równomierny rozkład temperatury na wysokości pudła, jak to widzimy na rys. 231.

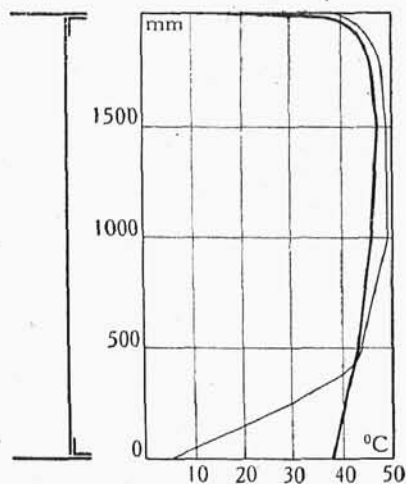
Linją cienką jest oznaczona różnica temperatur między ścianką pudła a otoczeniem przy naturalnem krążeniu oleju, linją grubsza przy zastosowaniu pompy.

Intensywność chłodzenia można również znacznie powiększyć, jeżeli zastosujemy wentylator, jak na rys. 232.

Gdy chodzi o odprowadzenie bardzo dużych ilości ciepła (granice mocy były podane wyżej), stosuje się t. zw. chłodzenie wodne, przy którym olej oddaje ciepło wodzie.

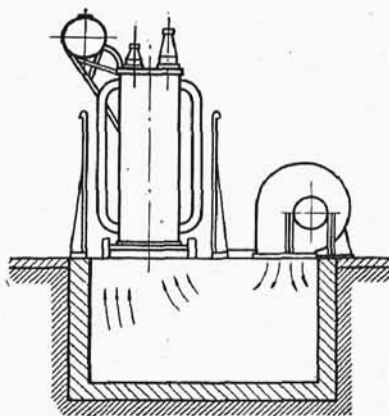
Możliwe są przytem dwa rozwiązania.

Pierwsze polega na zastosowaniu węzownicy, umieszczonej w górnej części pudła — rys. 233 (tam olej jest najgorętszy). Przez węzownicę przepływa woda, powodując intensywne chłodzenie oleju. Przy tym sposobie chłodzenia można się obyć bez żadnej pompy, korzystając wprost z wodociągu, co jest, niewątpliwie, zaletą; wadą natomiast jest ta okoliczność, że w węzownicy woda jest pod wyższym nieco ciśnieniem, niż olej w pudle, tak że w razie nieszczelności (wypadek, zresztą, obecnie przy konstrukcjach spawanych bardzo rzadki) woda dostaje się do pudła; drugą wadą jest niebezpieczeństwo zanieczyszczeń wewnątrz rur węzownicy, co w większym, lub mniejszym stopniu zmniejsza skuteczność chłodzenia.



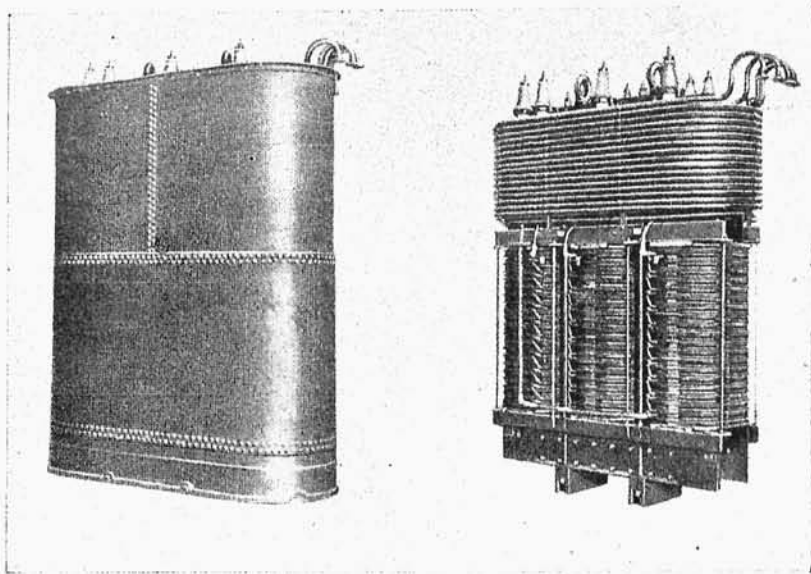
Rys. 231.

Wad tych możemy uniknąć, stosując rozwiązanie drugie, gdy mamy węzownicę, zanurzoną w zbiorniku z bieżącą wodą — rys. 234. Specjalna pompa zasysa olej z najgorętszych warstw górnych, przepędza przez węzownicę i tłoczy oziębiony olej zpowrotem do pudła. Przy ustawieniu pompy przed węzownicą mamy wyższe ciśnienie oleju w węzownicy, niż wody chłodzącej w zbiorniku. Wadą tego sposobu jest konieczność posiadania specjalnego urządzenia chłodzącego (zbiornik na wodę, pompa i t. p.). Pudło olejowe przy tym rodzaju chłodzenia jest niższe i potrzebuje mniej oleju, niż w wypadku pierwszym, gdzie w samym pudle musi się zmieścić węzownica.

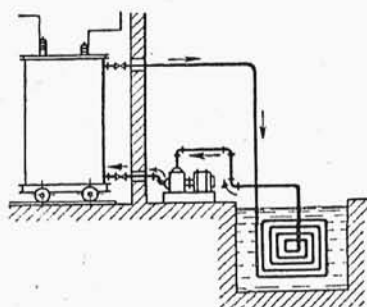


Rys. 232.

Z tych wszystkich względów rozwiązanie drugie znajduje obecnie coraz szersze zastosowanie.



Rys. 233.



Rys. 234.

Obliczenia chłodzenia wodnego nie podajemy, wykraczałoby to bowiem poza ramy, zakreślone dla niniejszej książki, której głównym zadaniem jest zapoznanie czytelnika z transformatorem takiej mocy przy której jeszcze wystarczy chłodzenie naturalne. Tych, których ta sprawa interesuje — kierujemy do książki prof. Vidmara „Transformatory”.

4. Konserwator.

Często pudło transformatora bywa zaopatrywane w dodatkowy zbiornik — t. zw. konserwator, umieszczony ponad pudłem i z nim połączony (rys. 235). Przez stosowanie konserwatora: 1) zapewniamy sobie zawsze całkowite wypełnienie pudła olejem; 2) nie dopuszczamy by wilgotne powietrze stykało się bezpośrednio z gorącym olejem w samym pudle. Powietrze styka się z olejem tylko w konserwatorze na nieznacznej powierzchni, olej w dodatku jest zimniejszy niż w pudle, co razem wpływa na wydatne zmniejszenie zawilgocenia oleju w pudle. Część wilgoci, wchłanianej przez olej konserwatora, jak również rozmaite zanieczyszczenia, osiadają na dnie konserwatora,