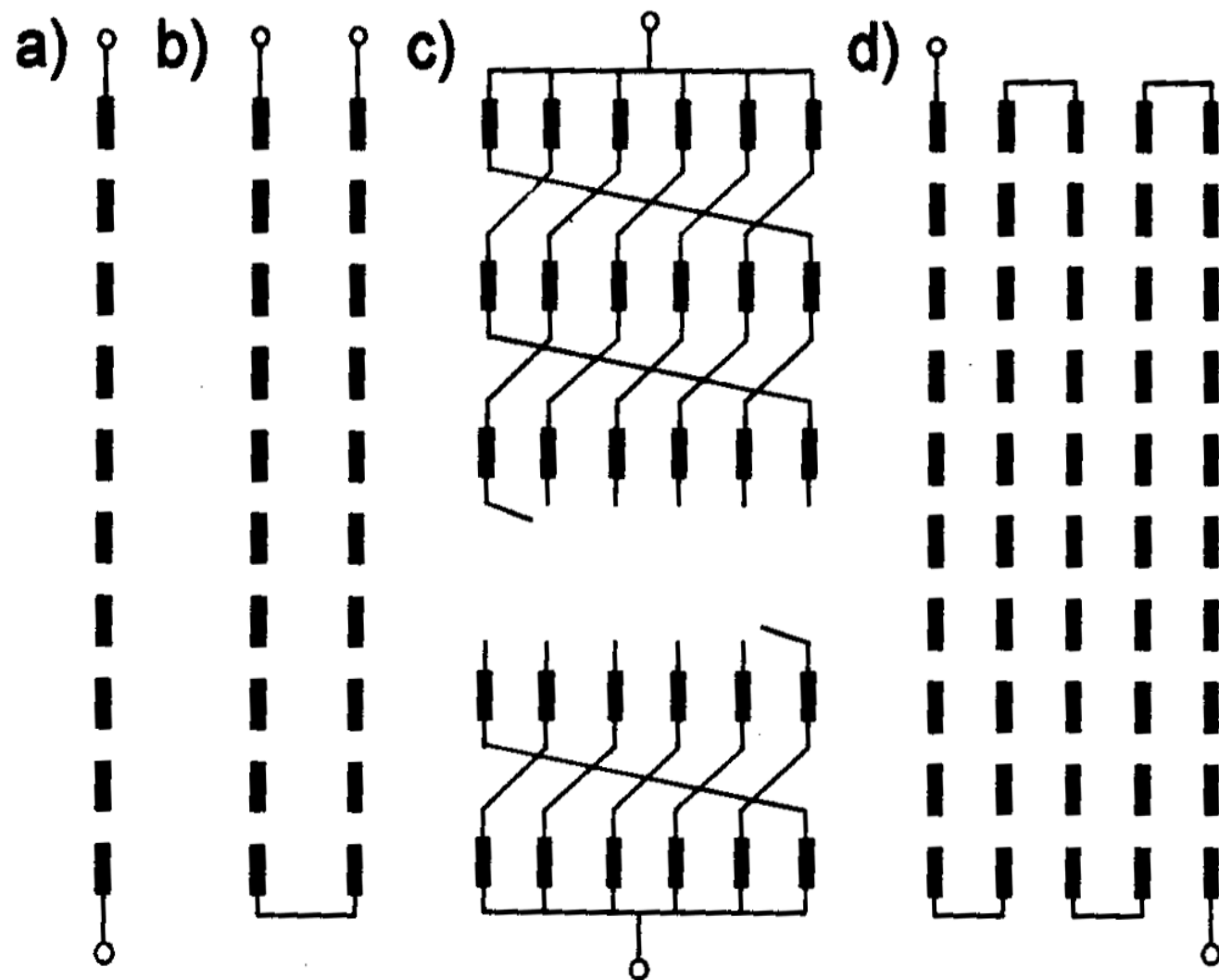


# Izolacja papierowo-olejowa

# Klasyfikacja izolacji wewnętrznej transformatora olejowego

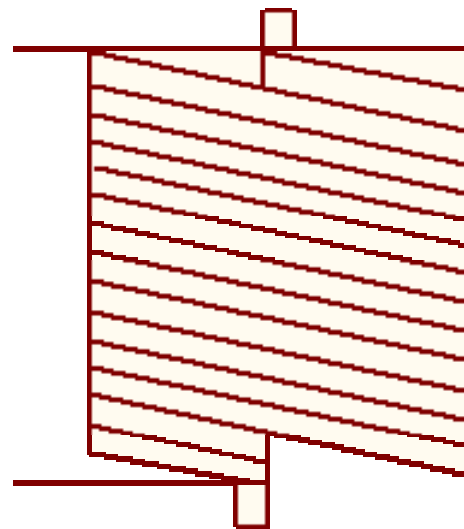
W izolacji wewnętrznej transformatora olejowego można wyróżnić cztery układy o swoistej problematyce izolacyjnej: izolacja uzwojeń, przepustów, połączeń (odpływów) i przełącznika zaczepów. Najważniejsze i najbardziej złożone problemy izolacyjne dotyczą uzwojeń, gdzie z kolei można wyróżnić odstępy izolacji wzdłużnej (międzyzwojowej, międzywarstwowej, międzycewkowej) i głównej (międzyuzwojeniowej i doziemnej - do kadzi lub rdzenia).

W zależności od mocy i napięcia uzwojenia, może ono być konstruowane jako warstwowe (rys. 1) lub cewkowe (rys. 2). Uzwojenia warstwowe - w Polsce - w zasadzie stosuje się w transformatorach rozdzielczych (3 do 30 kV) gdzie problemy izolacyjne są zdominowane przez postulaty technologiczne związane ze standaryzacją i seryjnością produkcji. Poczynając od 110 kV dominują uzwojenia cewkowe choć w niektórych krajach (Francja) buduje się uzwojenia warstwowe również na 220 kV.

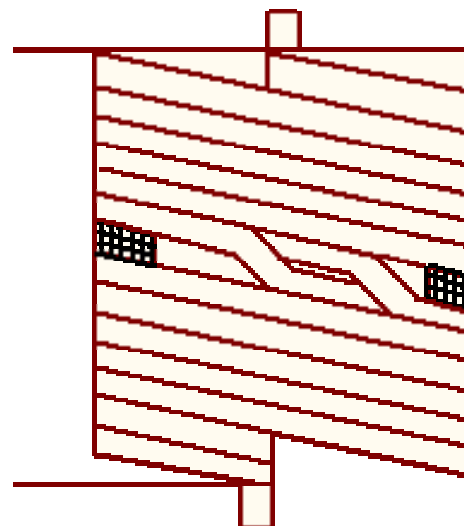


Rys. 3.9. Uzwojenia warstwowe: a) jednowarstwowe, b) dwuwarstwowe, c) jednowarstwowe nawinięte sześcioma przewodami równoległymi, d) pięciwarstwowe

## Installation of the cylinder coil



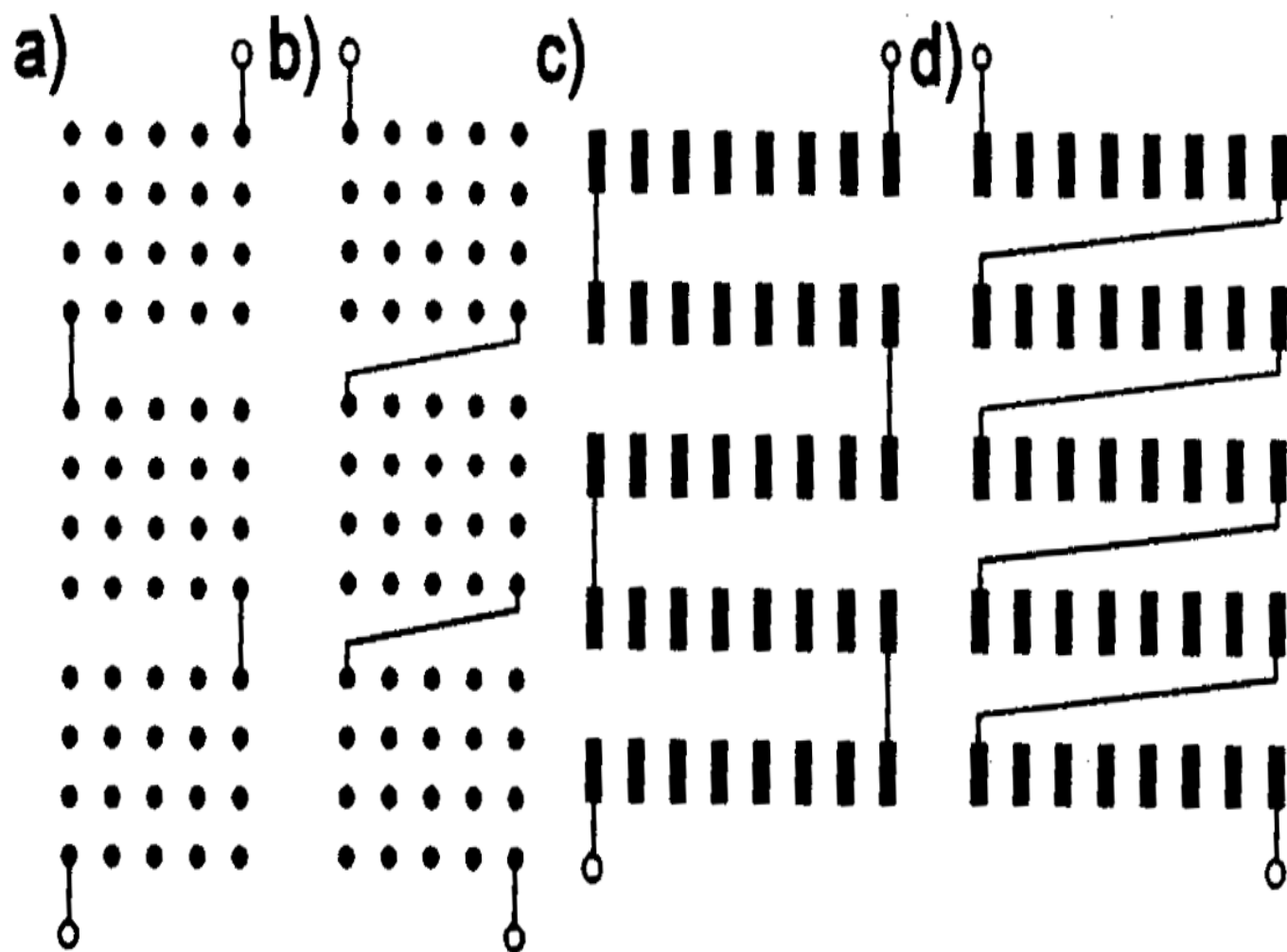
**a radial layer**



**two radial layers  
two copper wires side  
by side**

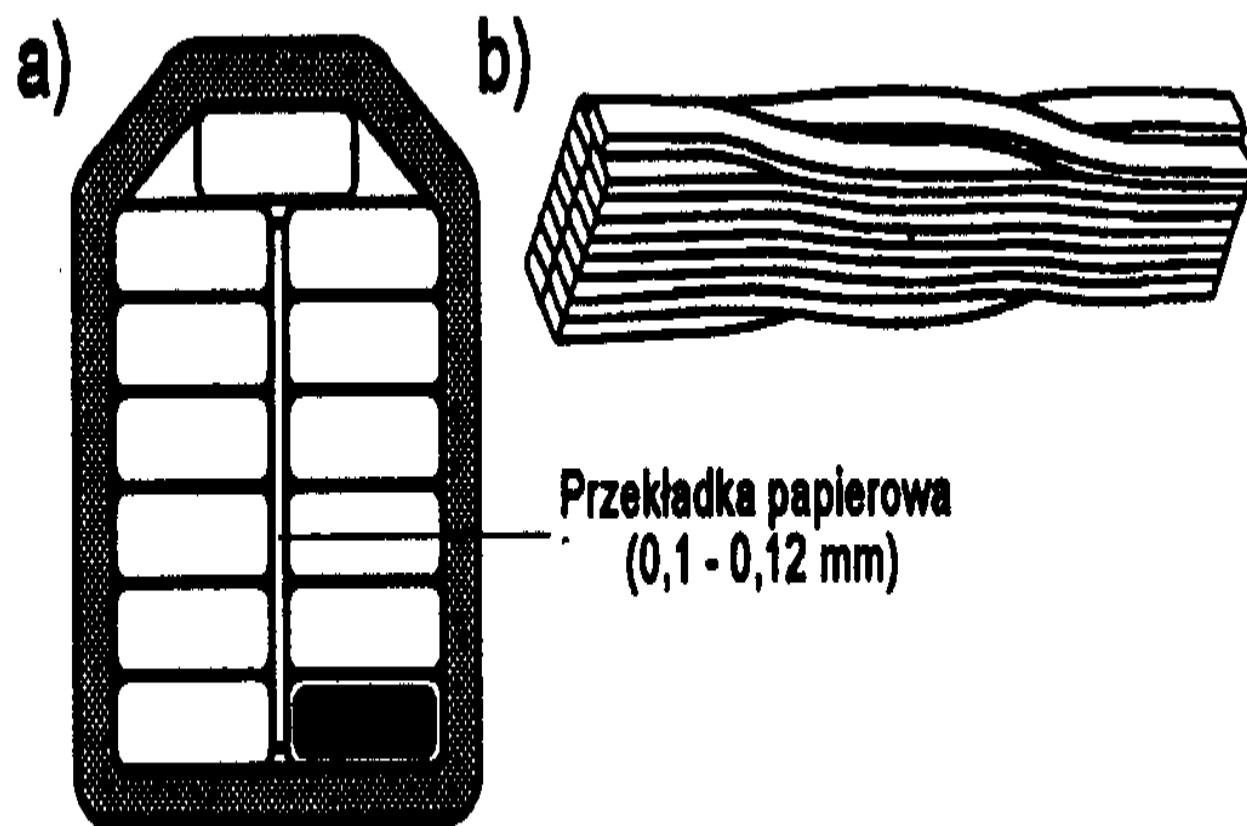


**overlapping of lines**



Rys. 3.10. Uzwojenia cewkowe z cewkami połączonymi szeregowo: a-d) różne typy połączenia cewek

Coraz częściej do budowy uzwojeń wysokiego napięcia dużych transformatorów (przy uzwojeniach warstwowych jest to regułą) używa się specjalnych przewodów o ciągłej transpozycji (przeplataniu) żył. Przewody te w skrócie zwane przewodami transponowanymi są wykonane z dużej liczby (do 29) przewodów prostokątnych o niedużym przekroju (5 do 30 mm<sup>2</sup>), grubości 1.4 do 3.2 mm i wysokości 3.5 do 12 mm. Przewody są izolowane emalią odporną na działanie gorącego oleju (dwustronna grubość izolacji 0.1 do 0.15 mm) i są ze sobą przeplecione w sposób ciągły, przy odległości między przepleceniami 110 do 240 mm. Całość przewodu jest izolowana przez owinięcie taśmą papierową. Przykład przewodu transponowanego złożonego z 13 przewodów składowych pokazano na rysunku 2.2.3. Przekroje przewodów transponowanych dochodzą do 800 mm<sup>2</sup>. Przewód ten jest stosunkowo elastyczny. Przeplecenia i podział na przewody składowe pozwalają zmniejszyć straty dodatkowe od prądów wirowych. Zmniejsza się pracochłonność wykonania uzwojeń (brak operacji przeplatania) i zwiększa się współczynnik zapełnienia uzwojeń.

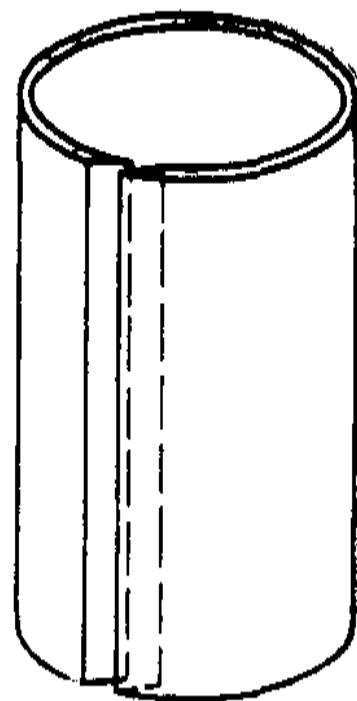


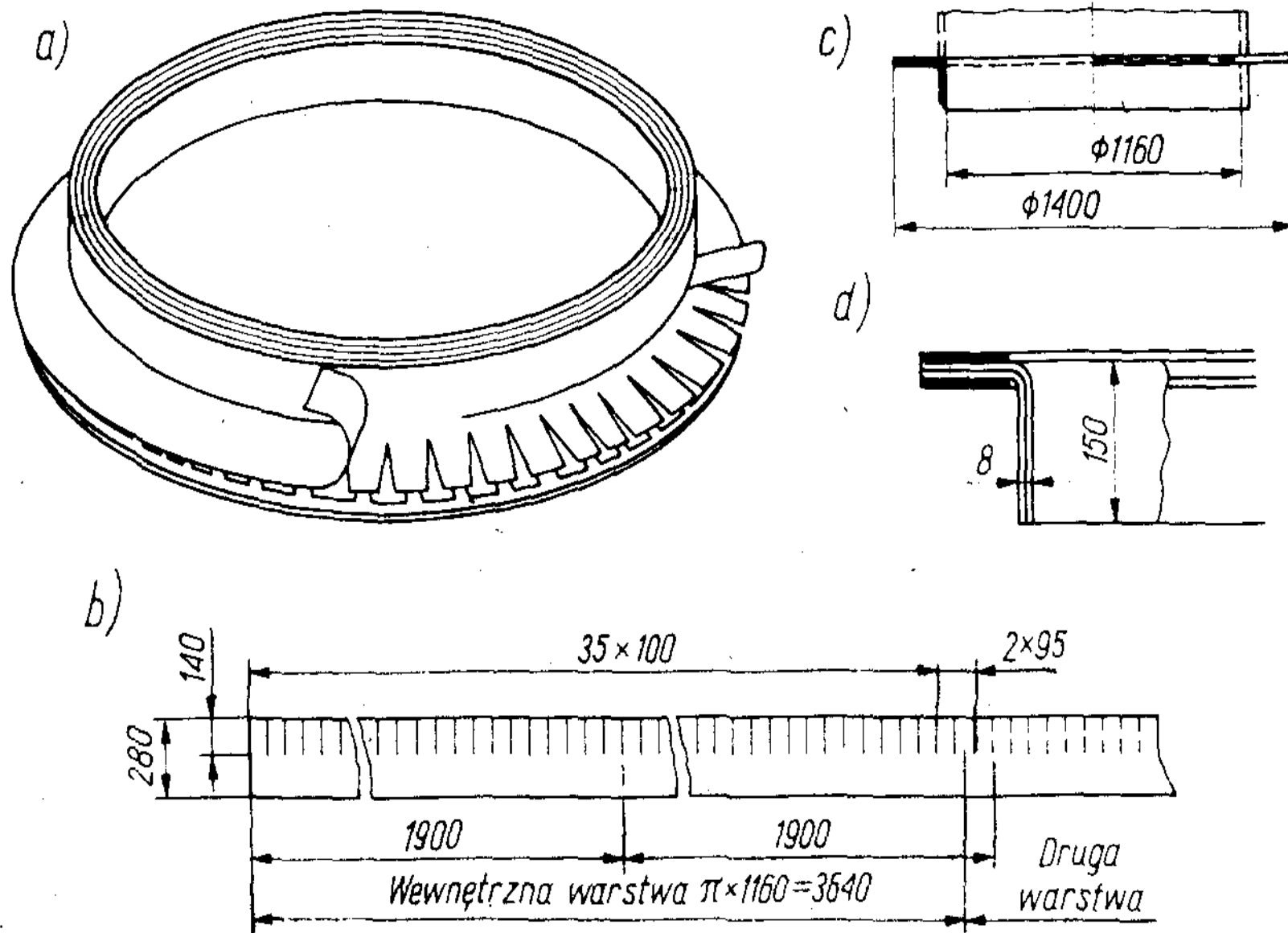
*Rys. 3.11. Przekrój przewodu transponowanego (a) i sposób wykonania przepleceń przewodów składowych (b)*

# Elementy składowe układu izolacyjnego

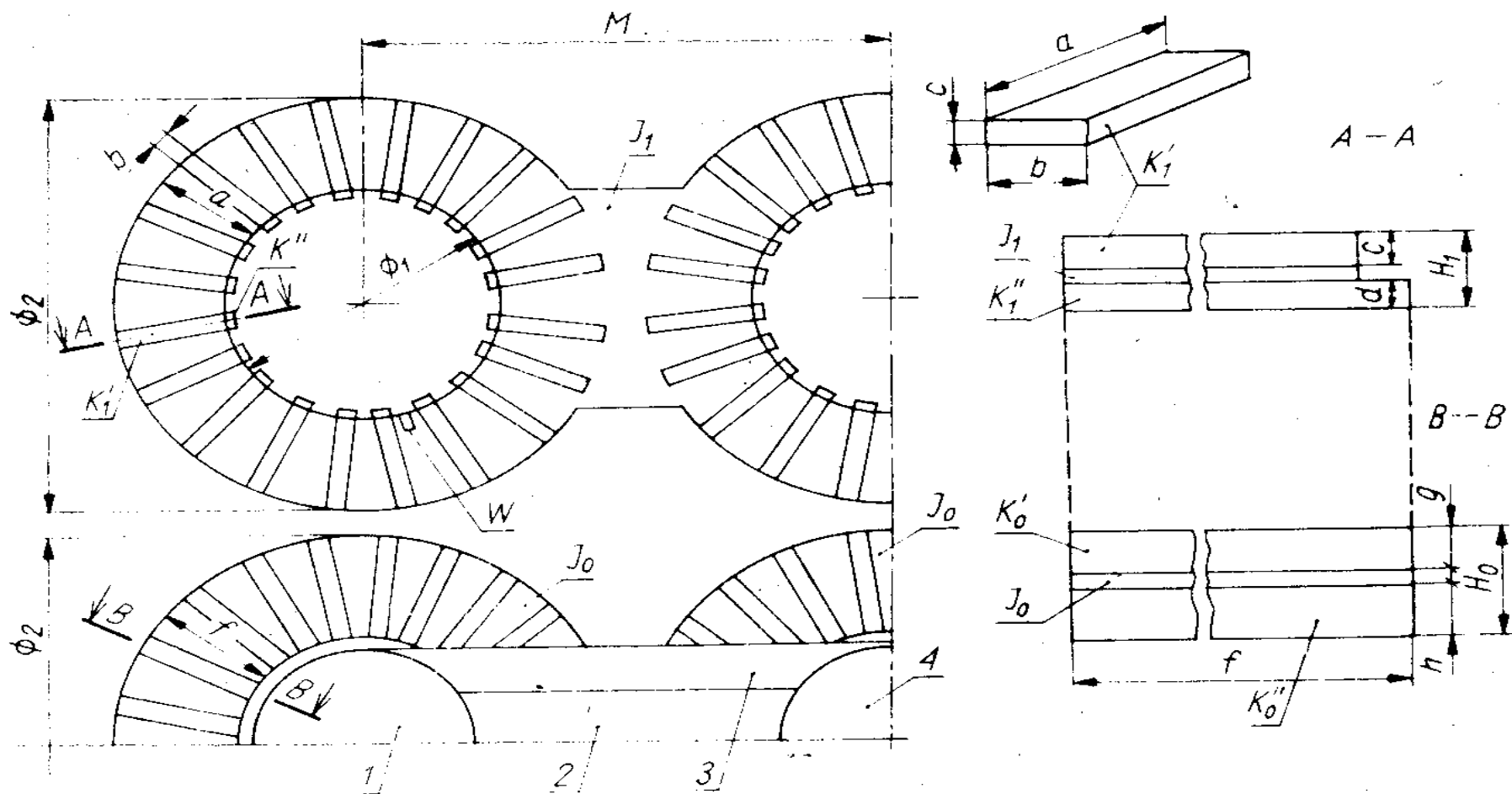
Podstawowe materiały, z których wykonane są elementy układu izolacyjnego transformatora to papier nawojowy i preszpan impregnowane olejem mineralnym transformatorowym i pogrążone w kąpeli olejowej. Wszelkie elementy dystansujące (listwy, przekładki, tuleje, pierścienie, klocki) wykonywane są zwykle ze specjalnego, twardego preszpanu noszącego nazwę transformerboardu. Podstawą izolacji zwojów i cewek jest obwój papierowy.

Rys. 4.11. Tuleja z transformerboardu (zaczerpnięto z pracy [203])





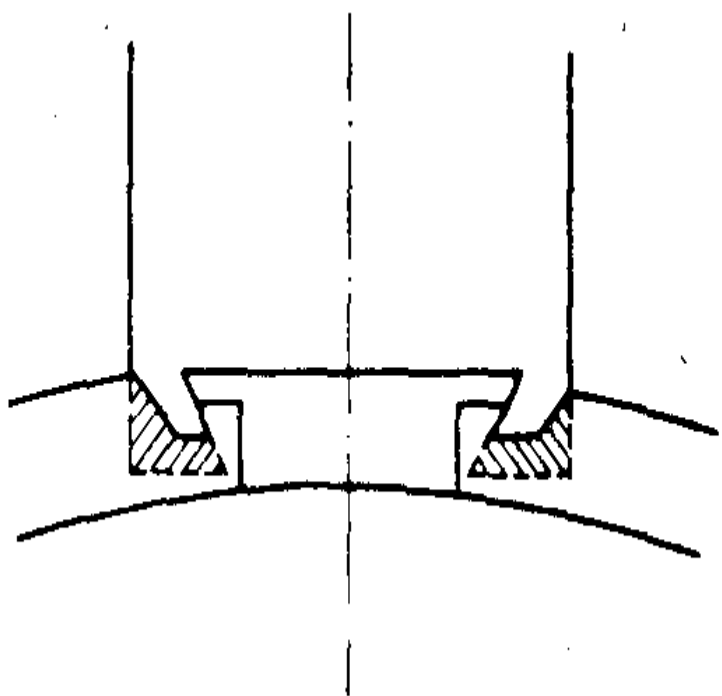
Rys. 4.12. Pierścień kątowy z preszpanu (opis w tekście)



Rys. 4.5. Izolacja wyrównawcza i jarzmowa

$J_1$  — preszpanowa płyta izolacji jarzmowej (z naklejonymi klockami);  
 $J_0$  — preszpanowa płyta izolacji wyrównawczej (z naklejonymi klockami);  
 $K'_1, K''_1, K'_0, K''_0$  — klocki (górne i dolne) dystansujące izolację jarzmową i wyrównawczą;  $W$  — wycięcie na odpływ  $d_2$  uzwojenia DN (patrz rys. 4.3a), 1 — skrajna kolumna rdzenia, 2 — górna powierzchnia dolnego jarzma, 3 — wypełnienie schodków jarzma, 4 — środkowa kolumna rdzenia,  $M$  — odległość między kolumnami

Poszczególne cewki uzwojenia są dystansowane za pomocą przekładek międzycewkowych zamocowanych do listw dystansujących pierwszy kanał olejowy od strony GN w odstępach  $DN - GN$ .



Rys. 4.14. Przekładka międzycewkowa dostosowana do listwy teowej. Powierzchnia zakreskowana oznacza powierzchnię kanału „odzyskaną” dla oleju chłodzącego (w porównaniu z listwą trapezową)

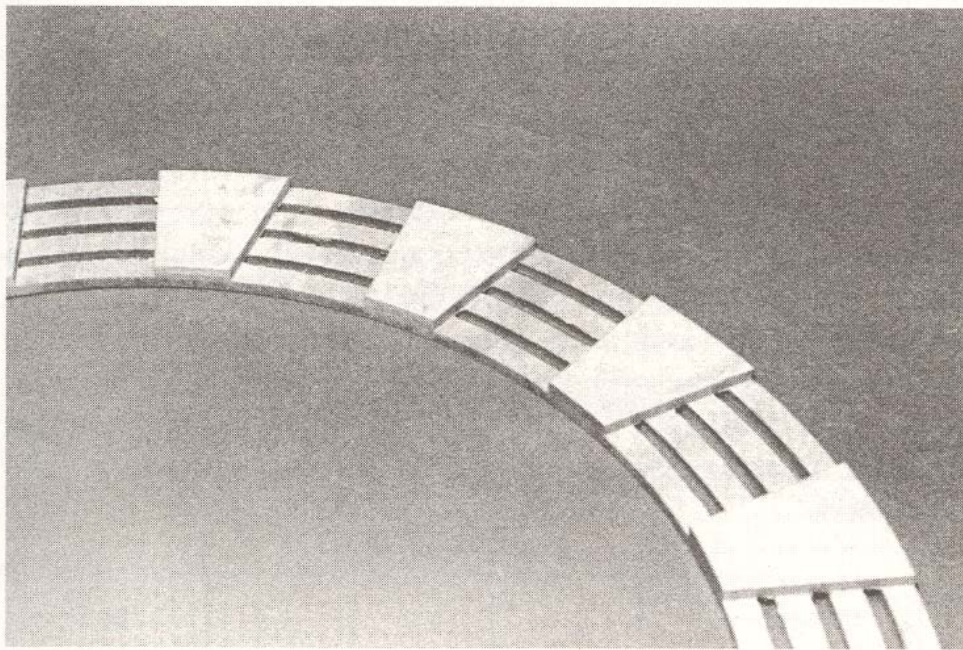


Fig. P.8  
Clamping ring

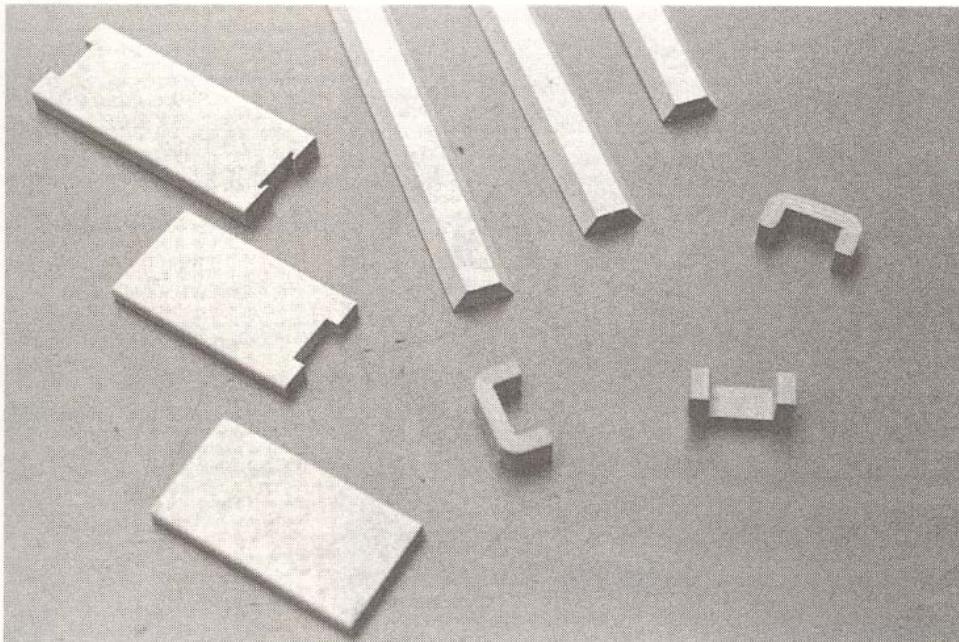


Fig. P.9  
Bars,  
Spacers

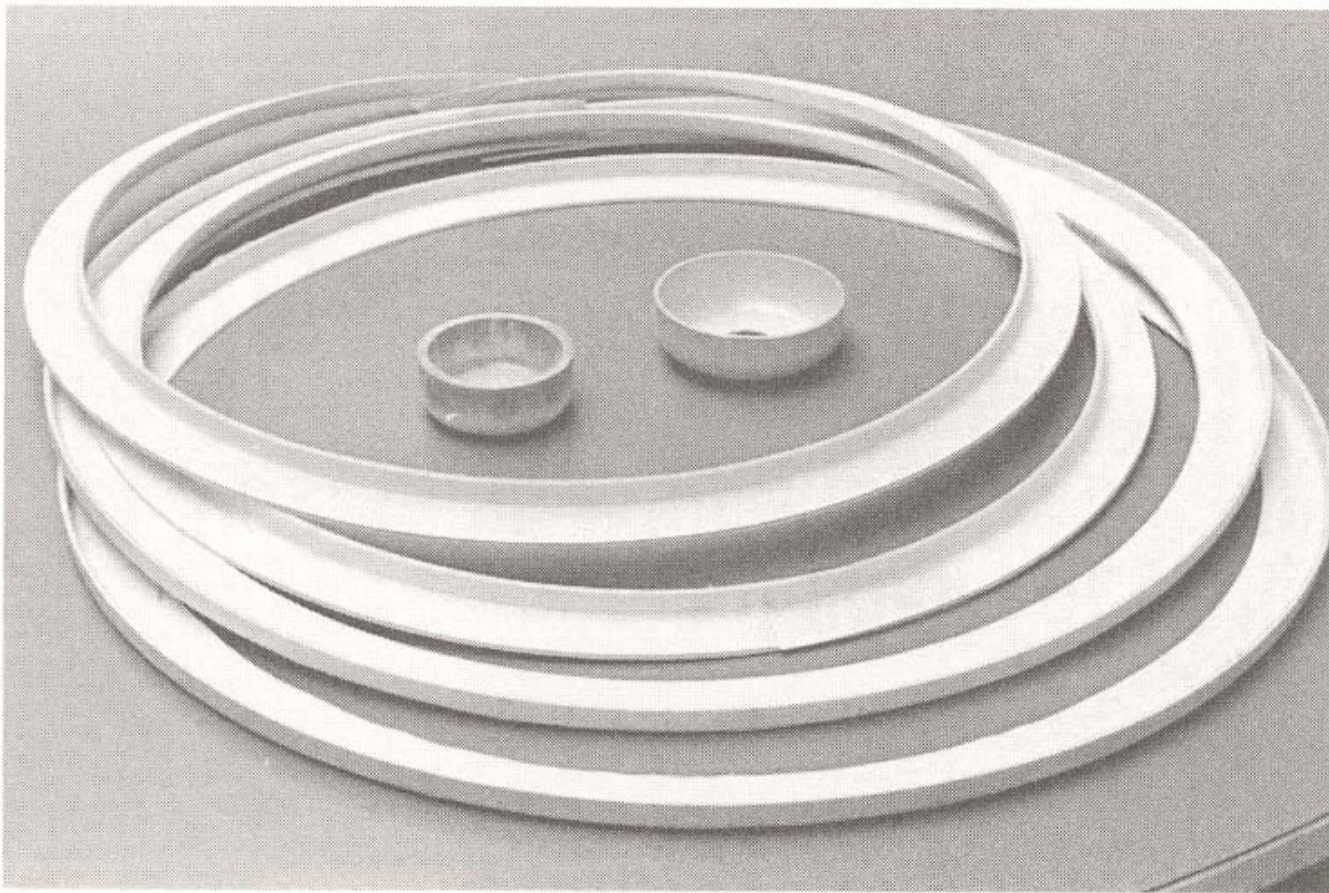


Fig. P.10  
Angle rings and caps

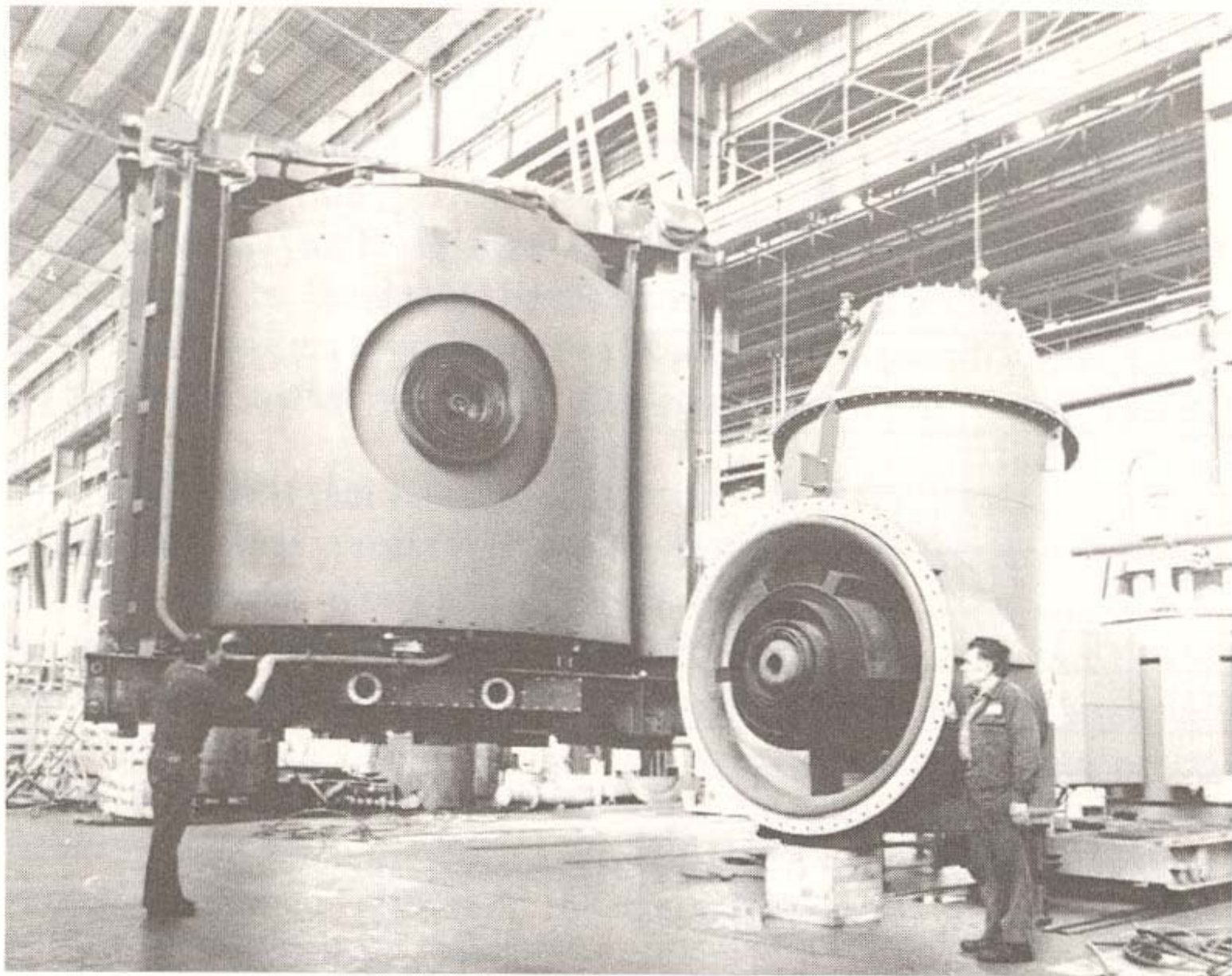


Fig. Q.1  
1000 kV end line in course of assembly (Photograph ANSALDO)

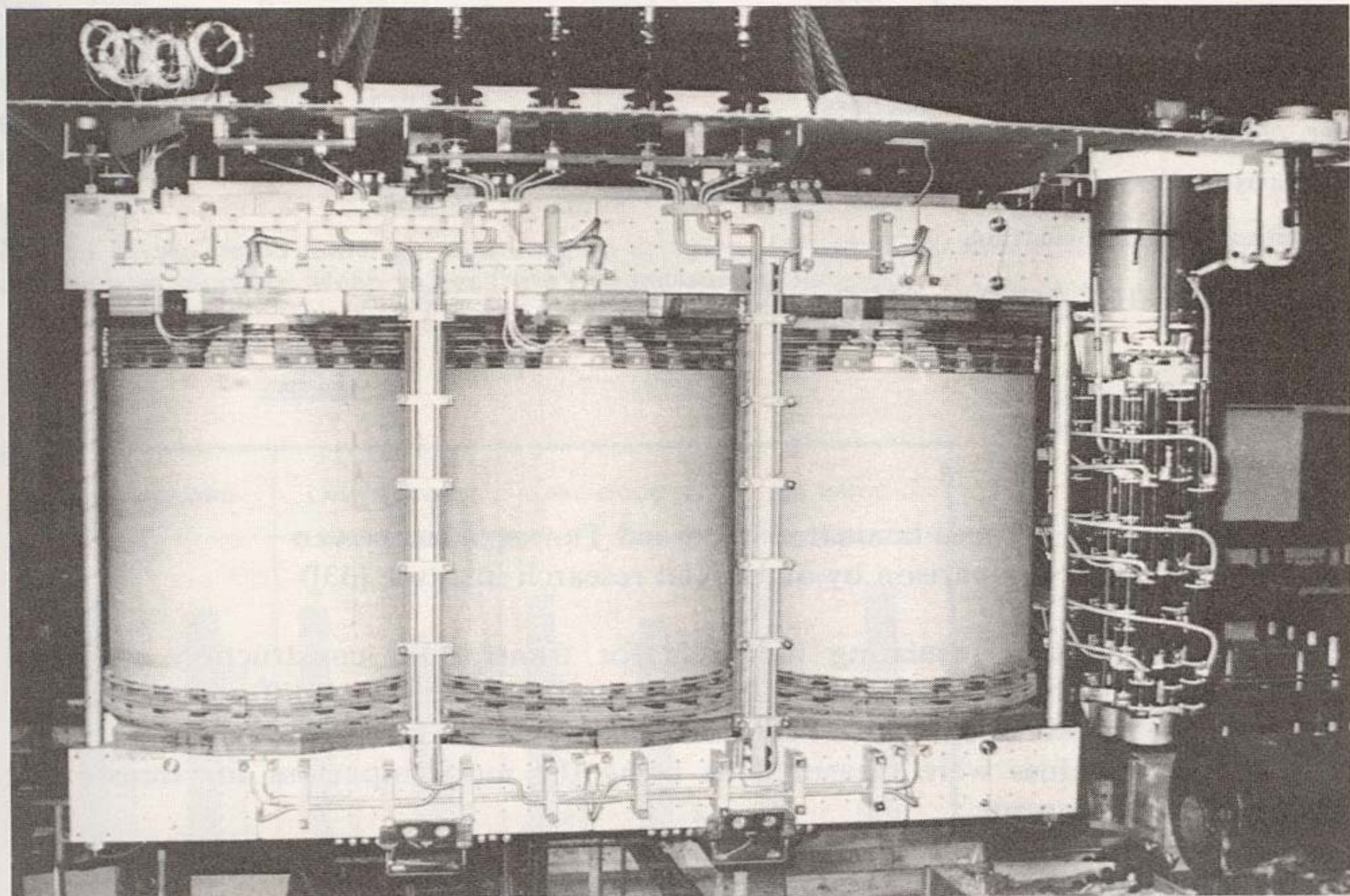
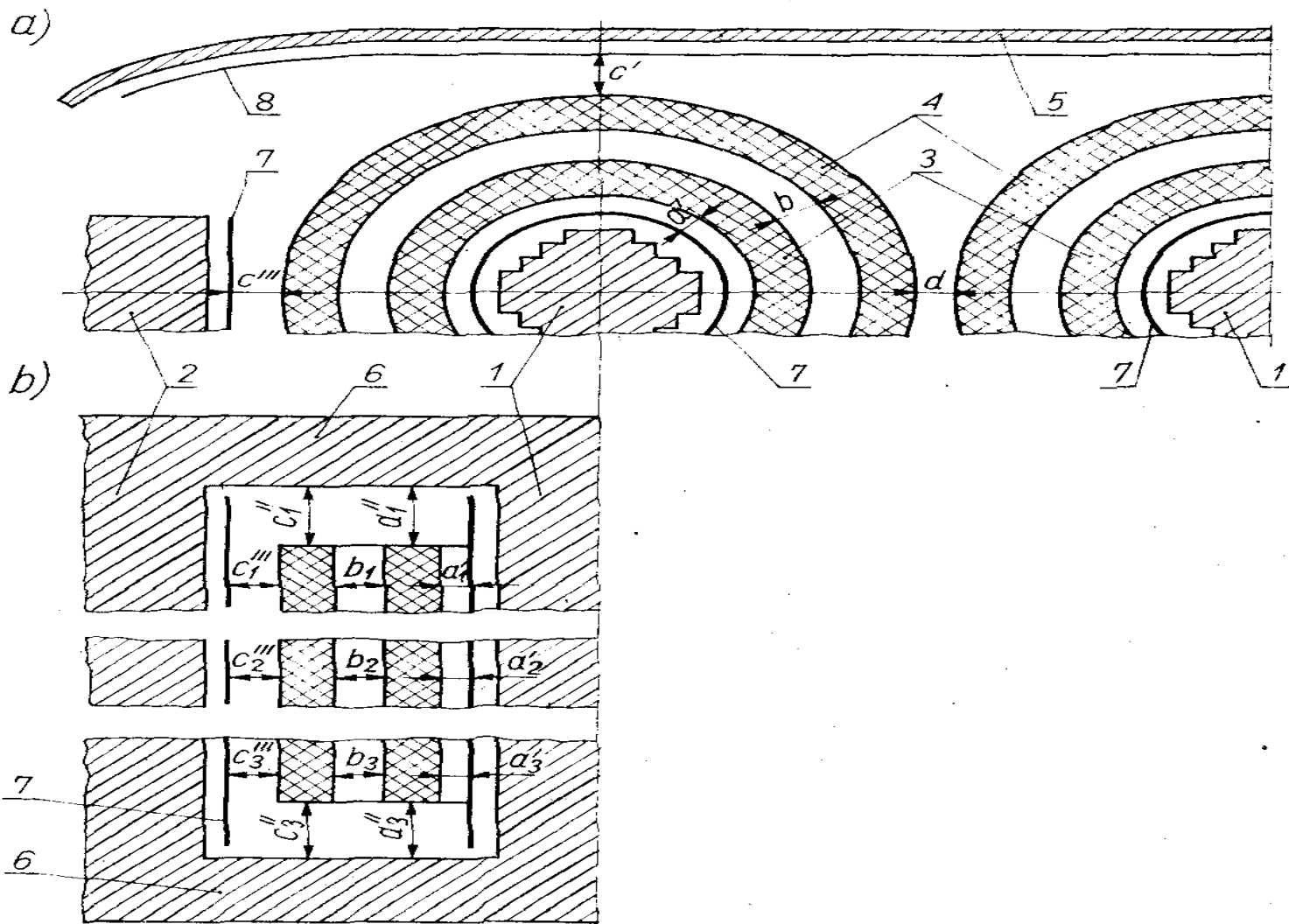


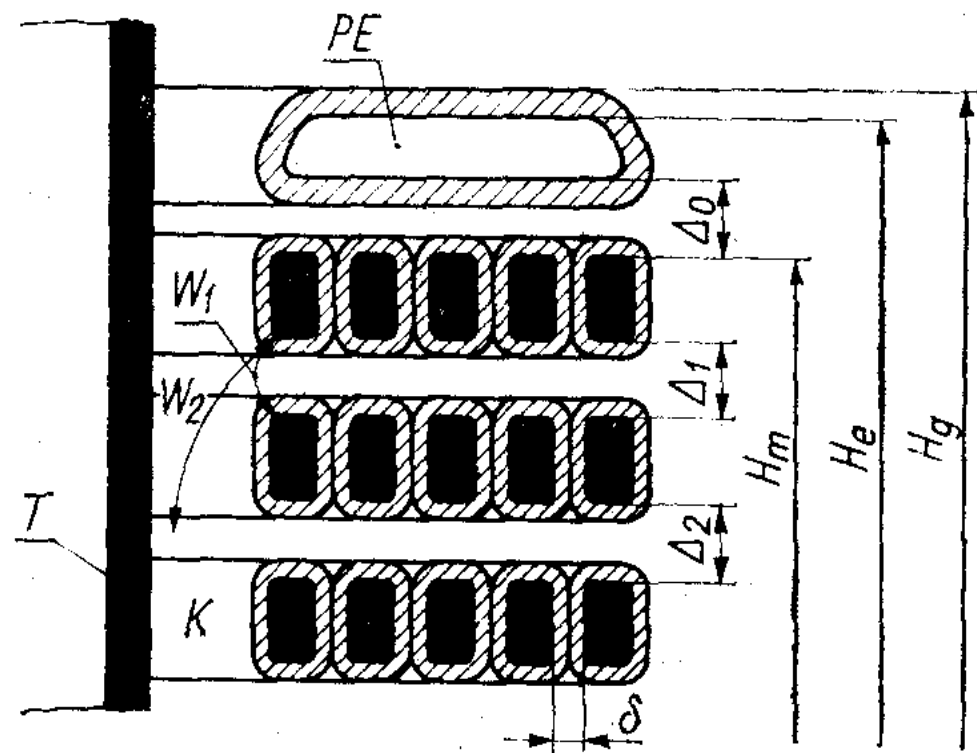
Fig. R.4  
PLYBOARD yoke clamp  
(Photograph ELIN)

Zestawienie elementów izolacyjnych pokazano na przykładach fragmentów uzwojeń pokazanych na rysunkach. Jak widać na rysunku odstępy uzwojenie DN (dolnego napięcia) - rdzeń, uzwojenia DN - GN (górnego napięcia), między uzwojeniami GN sąsiednich faz są podzielone kanałami olejowymi utworzonymi za pomocą tulei preszpanowych dystansowanych listwami lub segmentów izolacyjnych (w odstępie międzyfazowym). Również odstęp kraniec uzwojenia GN - jarzmo rdzenia podzielony jest na części za pomocą odpowiednich pierścieni kątowych (K) i pierścieni dystansujących (J).



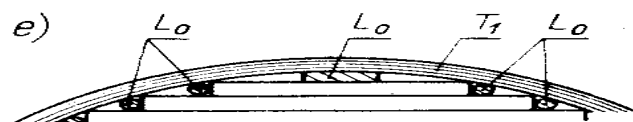
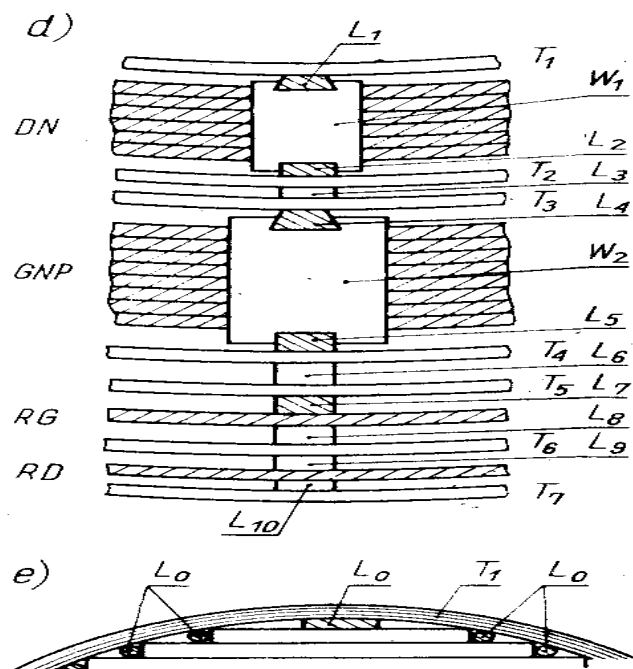
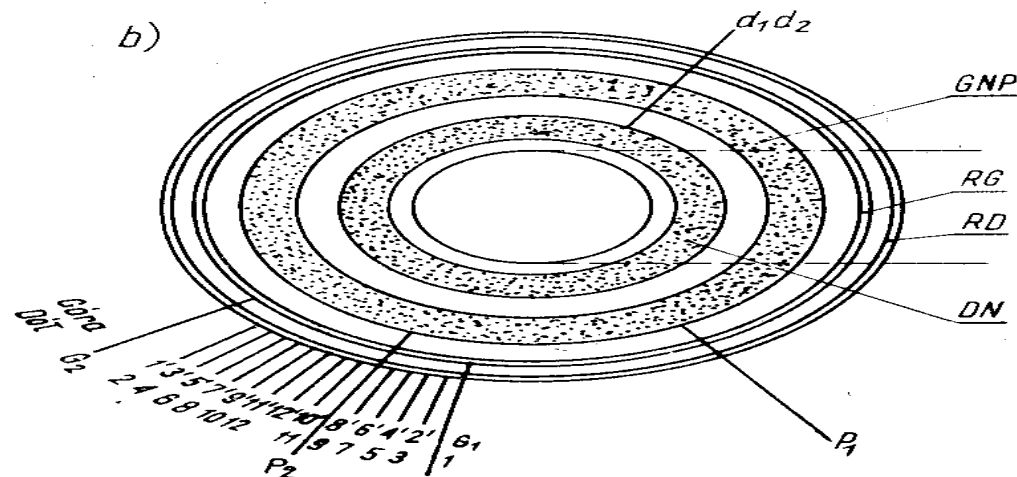
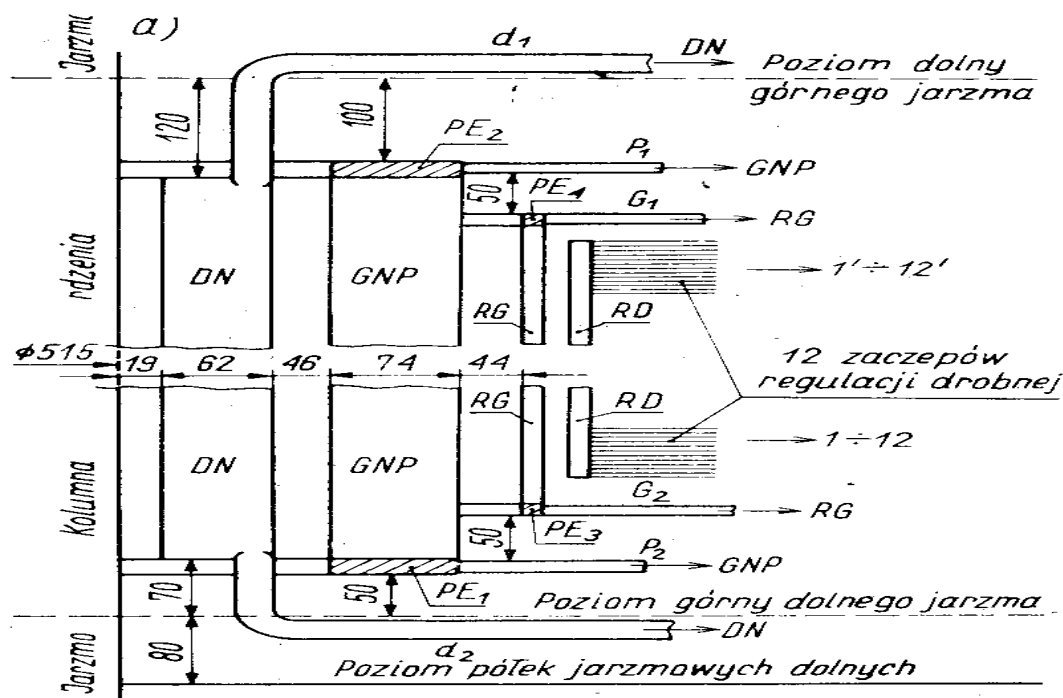
Rys. 1.4. Usytuowanie uzwojeń w 5-kolumnowym transformatorze blokowym o mocy kilkuset megawoltoamperów: a) przekrój poziomy (środkowy), b) przekrój pionowy podzielony na trzy pasy

1 — kolumny rdzenia, 2 — jarzmo powrotne, 3 — uzwojenia DN, 4 — uzwojenia GN, 5 — ścianka kadzi, 6 — jarzmo, 7 — uziemiony ekran, 8 — ekran magnetyczny; poszczególne odstępki  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  reprezentują trzy układy izolacji głównej  $a$  — ziemia/DN,  $b$  — DN/GN,  $c$  — GN/ziemia,  $d$  — międzyfazowa izolacja GN; odstępki w pasach, górnym, środkowym i dolnym oznaczone są kolejno indeksami 1, 2, 3

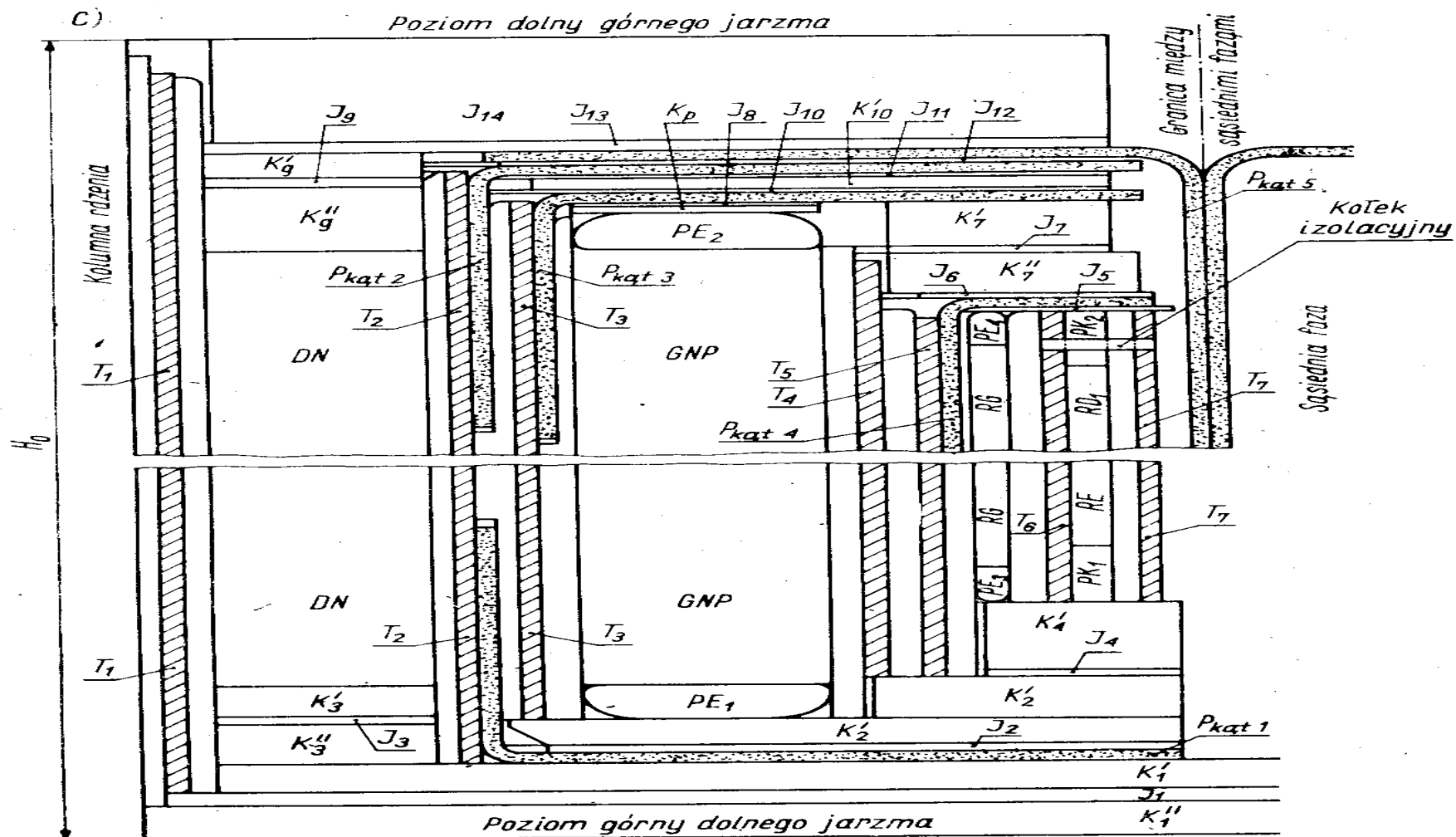


Rys. 1.5. Uproszczony szkic izolacji wzdłużnej uzwojenia cewkowego (pominięto elementy dystansujące — por. rozdz. 4)

PE — pierścień ekwipotencjalny,  $\delta$  — odstęp elektrod reprezentujący izolację międzyzwojową,  $\Delta_i$  — odstęp elektrod reprezentujący izolację międzycewkową ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ),  $T$  — pierwsza tuleja (przegroda) izolacji głównej,  $W_1$ — $W_2$  możliwe tory wyładowań na granicy układu izolacji wzdłużnej i głównej,  $H_m$  — „magnetyczna” wysokość uzwojeń,  $H_e$  — „elektryczna” wysokość uzwojeń,  $H_g$  — „geometryczna” wysokość uzwojeń,  $K$  — kanał chłodzący uzwojenie (kanał osiowy przyuzwojeniowy)

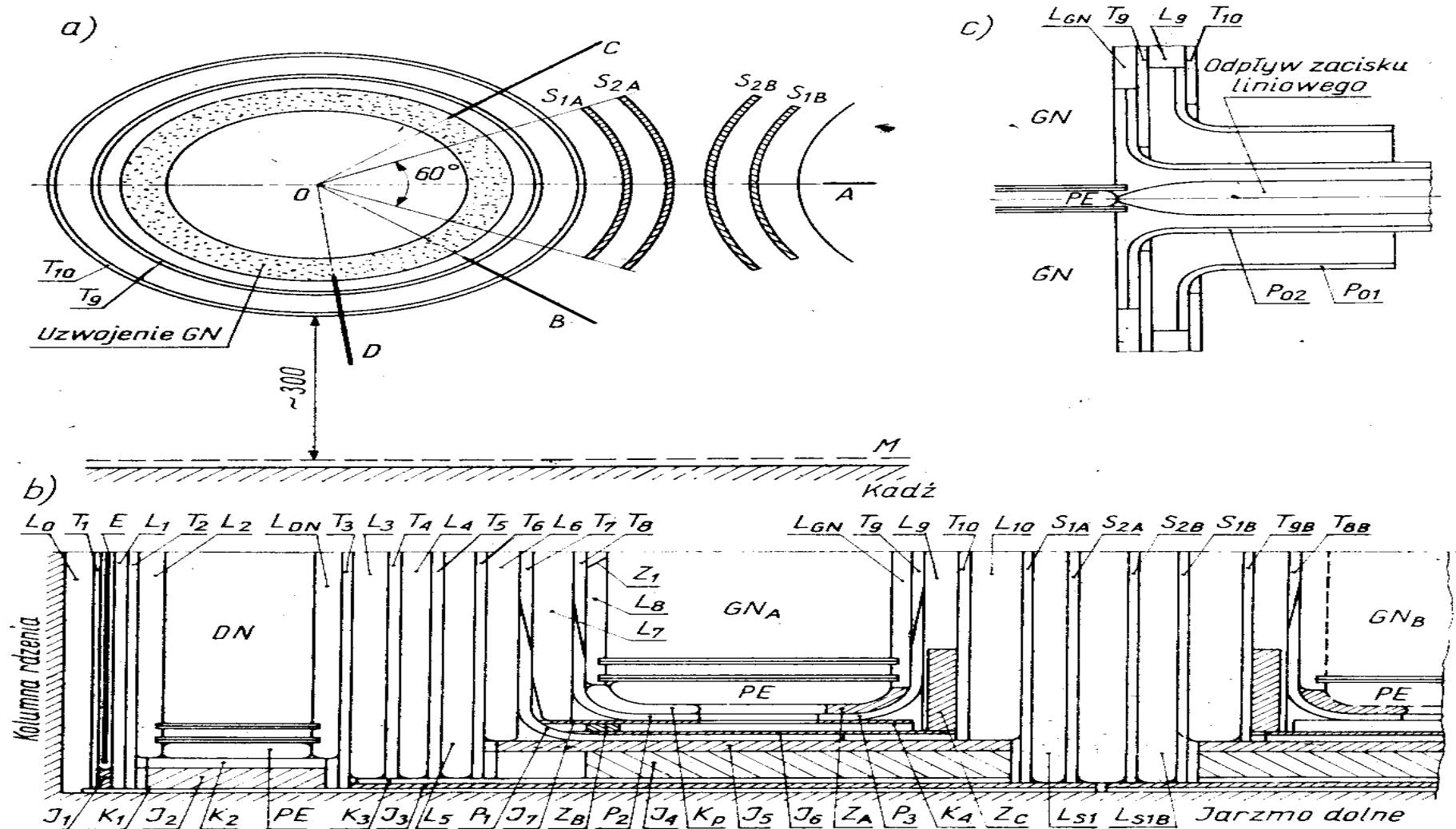


Rys. 4.3. Układ izolacji głównej transformatora 25 MV · A o przekładni 115 kV ± 16% (12 stopni)/16,5 kV: a) przekrój pionowy uzwojeń i odpływów, (zgodnie z przyjętym w rysunkach konstrukcyjnych zwyczajem wszystkie odpływy są sprowadzone do płaszczyzny rysunku), b) usytuowanie odpływów na obwodzie uzwojeń (schemat połączeń odpływów uzwojenia RD do przełącznika — por. rys. 8.3), c) pionowy przekrój układu izolacyjnego



górnej i dolnej części okna, d) fragment przekroju poziomego uzwojeń (DN, GNP, RG, RD) i układu izolacyjnego uwidaczniający wzajemne powiązania listew  $L$  i przekładek międzycewkowych  $W$ , e) sposób dystansowania pierwszej tulei od kolumny rdzenia

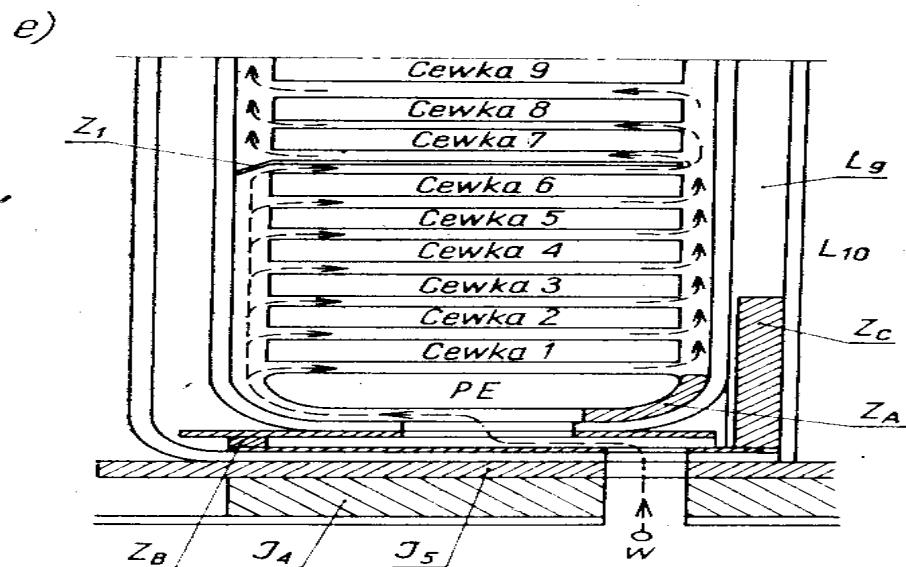
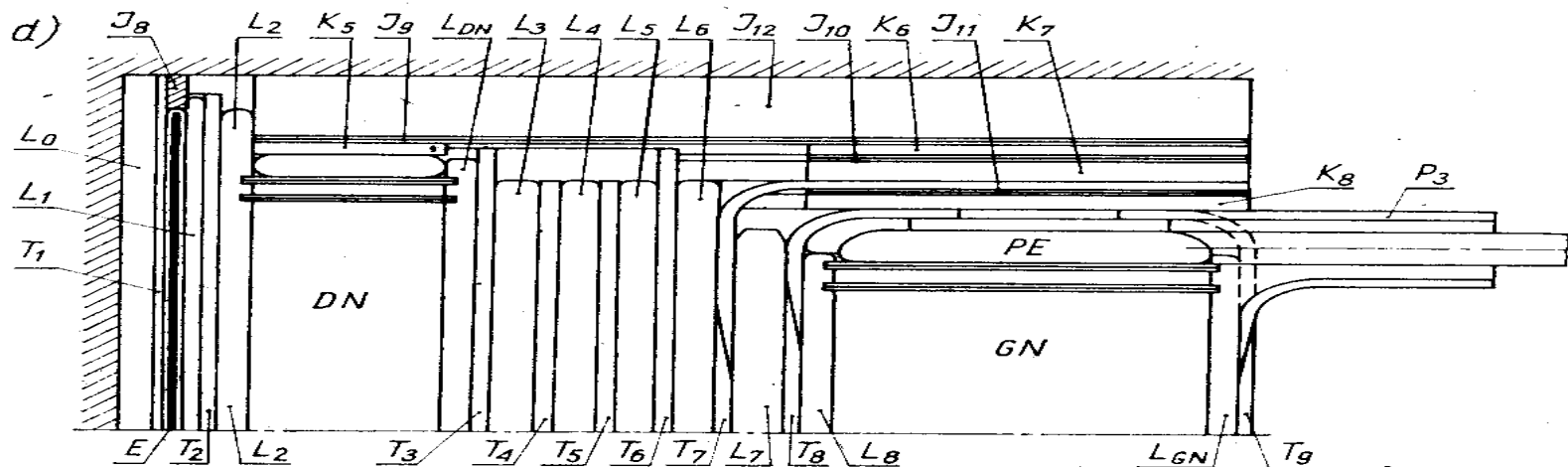
PE — pierścienie ekwipotencjalne;  $d_1$ ,  $d_2$  — górny i dolny odpływ uzwojenia DN;  $P_1$ ,  $P_2$  — górny i dolny odpływ uzwojenia GNP;  $G_1$ ,  $G_2$  — górny i dolny odpływ uzwojenia RG;  $1' \div 12'$  — górne odpływy uzwojenia RD;  $1 \div 12$  — dolne odpływy uzwojenia RD;  $T$  — tuleje;  $P_{kat}$  — pierścienie katowe ( $P_{kat 5}$  obejmuje tylko część obwodu w przestrzeni międzyfazowej);  $J$  — pierścienie;  $K$  — klocki dystansujące izolację jarzmową;  $K_p$  — klocki dystansujące kanał olejowy między pierścieniem ekwipotencjalnym i kątowym  $P_{kat 3}$ ;  $PK$  — pierścienie końcowe



Rys. 4.17. Układ izolacyjny transformatora blokowego 20/420 kV:

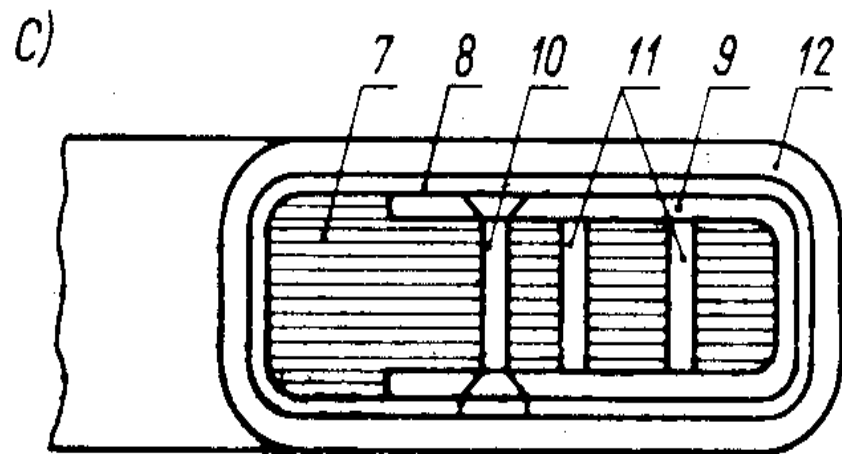
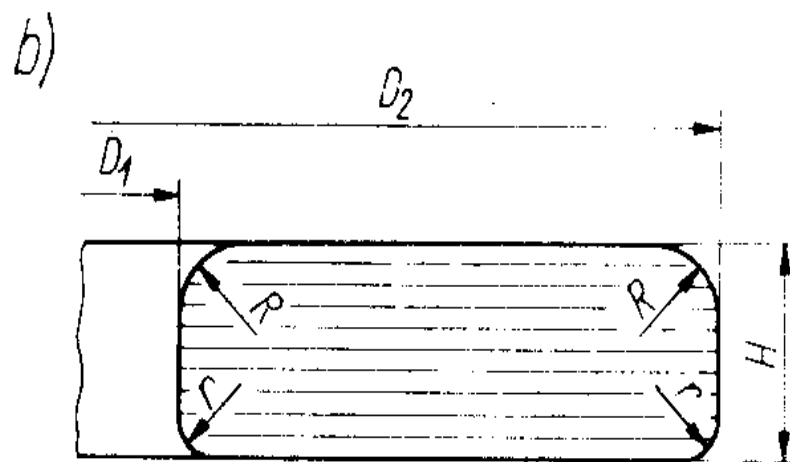
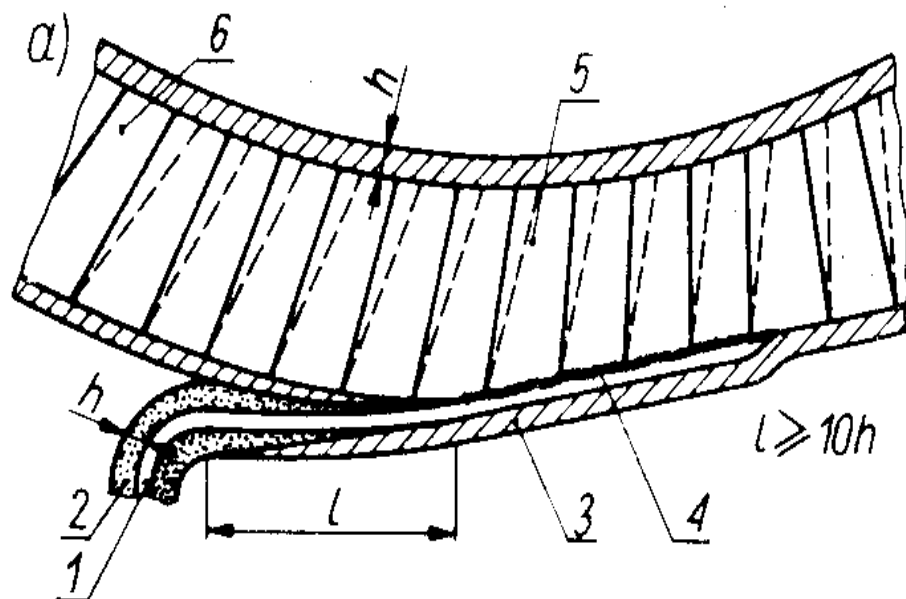
a) usytuowanie odpływów na obwodzie i szkic izolacji międzyfazowej (OB, OC — płaszczyzny usytuowania odpływów uzwojenia GN: OB — odpływu liniowego, OC — odpływu gwiazdowego), b) przekrój w płaszczyźnie OA dolnej części układu izolacyjnego, c) fragment przekroju w płaszczyźnie OB w pasie środkowym, d) przekrój w płaszczyźnie OC górnej części układu izolacyjnego, e) schemat wymuszonego obiegu oleju (linie przerywane) w uzwojeniu GN — przekrój OD

GN, DN — uzwojenia górnego i dolnego napięcia; E — ekran osłaniający rdzeń (por. rys. 7.15);  $T_1 \div T_6$  i  $T_{10}$  tuleje;  $T_7 - T_9$  tuleje skośnie ścinane do zespolenia z pierścieniami kątowymi (por. rys. 7.6);  $L_0 \div L_{10}$ ,  $L_{DN}$ ,  $L_{GN}$ ,  $L_{S1}$  — listwy dystansujące, przy czym  $L_2$  i  $L_8$  o przekroju trapezowym, a pozostałe

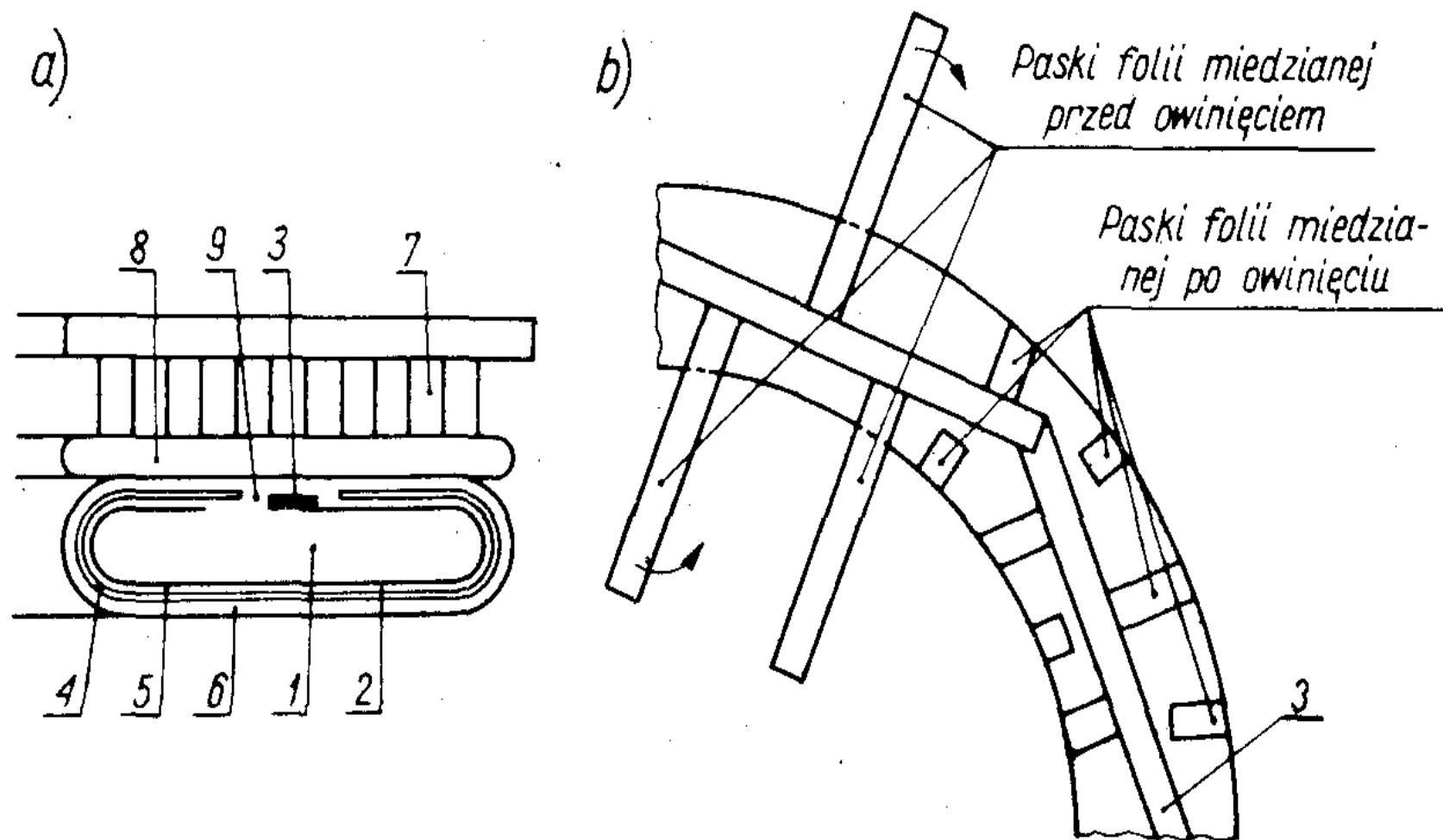


o przekroju prostokątnym;  $S_{1A}$ ,  $S_{2A}$ ,  $S_{2B}$ ,  $S_{1B}$  — segmenty izolacji międzyfazowej z TRB;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  — ścinane ukośnie pierścienie kątowe do zespolenia z tulejami; PE — pierścienie ekwipotencjalne;  $K_p$  — wygięte klocki dystansujące kanał olejowy między pierścieniem ekwipotencjalnym a pierścieniem kątowym GN;  $Z_A$ ,  $Z_B$ , ...,  $Z_1$ ,  $Z_2$  — zastawki zmieniające kierunek przepływu oleju;  $J_1 \div J_{11}$  — pierścienie izolacyjne z TRB (elementy izolacji jarzmowej);  $J_{12}$  — pierścień prasujący z elkonu;  $K_1 \div K_8$  — klocki dystansujące z TRB (elementy izolacji jarzmowej);  $P_{01}$ ,  $P_{02}$  — kształtki formowalne izolujące odpływ liniowy GN;  $w$  — wlot oleju pod ciśnieniem z kanałów izolacji wyrównawczej;  $M$  — elektromagnetyczny ekran chroniący kadź od wnikania strumieni rozproszenia

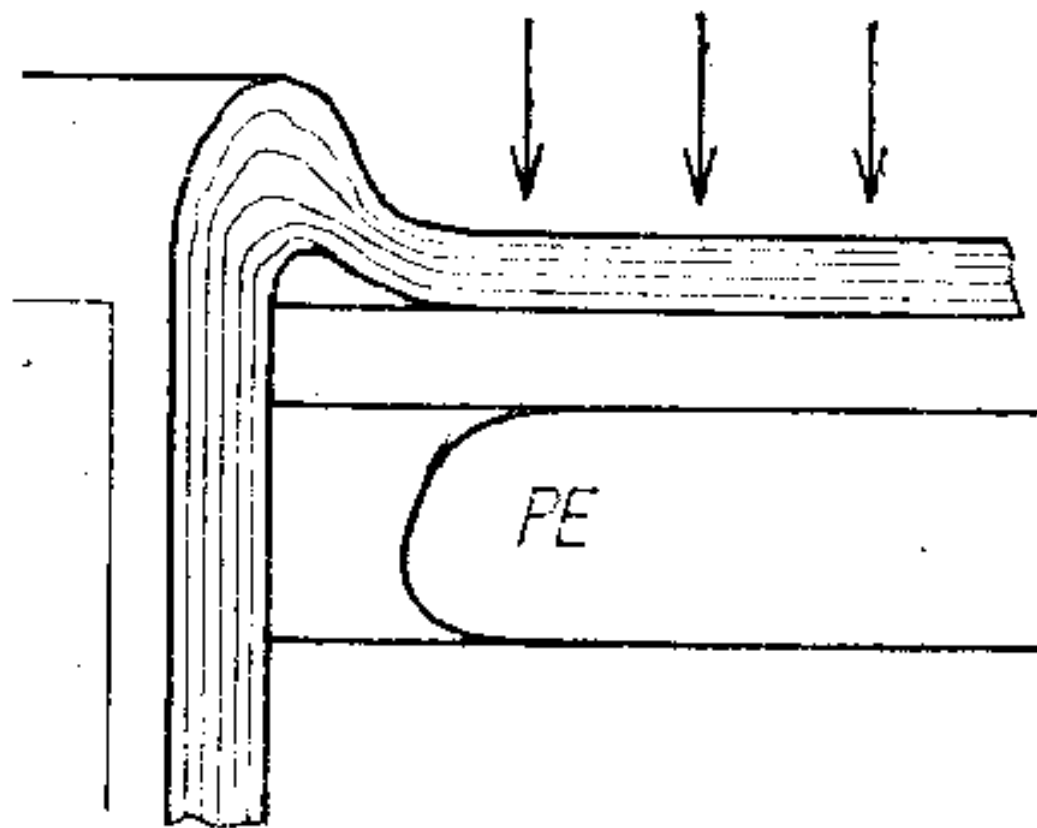
Pierścień ekwipotencjalny PE ma za zadanie wyrównać rozkład napięć udarowych w początkowych fragmentach uzwojenia i zmniejszyć nierównomierność pola elektrycznego na krańcu uzwojenia.



Rys. 4.9. Pierścień ekwipotencjalny: a) tradycyjny sposób nawijania i łączenia ekranu, b) przekrój rdzenia, c) zmodernizowany sposób dołączania dopływu do ekranu



Rys. 4.10. Pierścień o podwójnym ekranowaniu (zaczepnięto z pracy [138])  
 1 — rdzeń, 2 — elektroda przewodząca, zlutowana z pasków folii w sposób pokazany na rys. b, 3 — pierścień zasilający (miedziany), 4 — warstwa półprzewodzącego lakieru 5, 6 — papier kablowy, 7 — cewka pierwsza, 8 — przekładki, 9 — luka w warstwie półprzewodzącej



# Proces suszenia i impregnacji

Istotnym ogniwem w procesie produkcji transformatora, stanowiącym o jakości izolacji, jest etap suszenia i impregnacji izolacji. Współcześnie większość wytwórców stosuje ewaporacyjną metodę suszenia izolacji transformatorów. Nie wchodząc w szczegóły można powiedzieć, że metoda ta polega na wykorzystaniu do suszenia ciepła skraplania pary cieczy (o składzie zbliżonym do benzyny lotniczej) zwanej solwentem. Wpuszczając do chłodnej suszarni, z ciśnieniem około 7 hPa, parę solwentu o temperaturze około 130 °C, uzyskuje się natychmiastowe jej skroplenie na powierzchni elementów zimnego uzwojenia. Para solwentu dociera do wszystkich zakamarków uzwojenia, zapewniając szybkie i równomierne nagrzanie. Procesowi nagrzewania towarzyszy parowanie wody, ze wzrastającą wraz z temperaturą intensywnością. Para wodna jest porywana przez nieskroplone pary solwentu i odprowadzana do skraplacza. W końcowej fazie suszenia, po nagrzaniu do 110 - 120 °C, następuje suszenie w wysokiej próżni, już bez udziału solwentu.

Proces suszenia jest zakończony gdy pomiary współczynnika strat dielektrycznych wykażą  $\text{tg}\delta \leq 0.5\%$ , rezystancję izolacji  $R_{iz} = 10^9 \div 10^{10} \text{ } \Omega\text{m}$ , współczynnik  $R_{60}/R_{15} \geq 1.5$  oraz nie ma przyrostu ilości wody w zbiorniku skraplacza.

Metoda ewaporacyjna pozwala uzyskać wysoką jakość wysuszenia izolacji przy minimalnym czasie suszenia (rzędu kilku godzin) i małym wydatku energii na nagrzewanie.

Po wysuszeniu następuje proces nasycania (impregnacji) izolacji olejem o odpowiednich parametrach dotyczących zanieczyszczeń, zawilgocenia i odgazowania. W tym celu, w próżni poniżej 0.1 hPa, zalewa się transformator olejem. Napełnianie olejem gorącym przyspiesza proces nasycania i polepsza jego jakość.

Impregnacja wyrobów z celulozy jest procesem powolnym o asymptotycznie malejącej intensywności. Szczególnie trudno nasycić elementy preszpanowe, do których olej wnika wzdłuż warstw. Zatem szerokość elementów preszpanowych determinuje czas nasycania. Elementy o dużej szerokości zaleca się perforować dla ułatwienia impregnacji.

O jakości izolacji transformatora decyduje więc dobre wysuszenie i nasycenie twardych przekładek międzycewkowych, listew, tulei i pierścieni izolacyjnych.

Klasyczny papierowo-olejowy układ izolacyjny transformatora olejowego ma stuletnią historię. Podstawowe problemy opanowano do początku lat 50-tych. Poczynając od lat 60-tych udoskonalanie izolacji dotyczyło:

- wyładowań niezupełnych,
- izolacji krańców uzwojeń,
- polepszania właściwości mechanicznych i impregnacyjnych materiałów izolacyjnych,
- wytrzymałości przy udarach piorunowych,
- wytrzymałości przy udarach łączeniowych.

Od połowy lat 60-tych główną uwagę skupiono na problematyce wyładowań niezupełnych (wnz). Postęp w obliczaniu dopuszczalnych natężeń pola elektrycznego w oparciu o numeryczną analizę pola i pomiary na modelach izolacji, polepszanie właściwości materiałów izolacyjnych, ulepszanie procesu suszenia i impregnacji oraz wprowadzenie pomiaru wnz do norm odbiorczych zaowocowały obniżeniem rozrzutu rejestrowanych przy próbach intensywności wnz.

# Awaryjność izolacji transformatorów

W zakresie do 110 kV udział uszkodzeń izolacji transformatorów w ogólnej statystyce uszkodzeń jest niewielki. Przykładowo w [12] podano, że tylko 0.6% uszkodzeń związanych jest bezpośrednio z uszkodzeniem izolacji uzwojeń. Nieco więcej bo 1.2 % to uszkodzenia izolacji odpływów GN. Jednakże dla transformatorów na wyższe napięcia udział uszkodzeń izolacji wykazuje tendencję rosnącą.