

HENRYK KOWALOWSKI

Katedra Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej

RACJONALNA REGULACJA NAPIĘĆ FAZOWYCH TRANSFORMATORÓW
ZASILAJĄCYCH NIESYMETRYCZNE PIECE ELEKTRODOWE
WIELKICH MOCY

Streszczenie: Podstawowe wiadomości o niesymetrycznych obciążeniach transformatorów piecowych. Zależności analityczne i zastosowanie wyprowadzonych wzorów w praktycznych obliczeniach.

Wprawdzie transformatory przeznaczone dla zasilania pieców elektrycznych zasadniczo są podobne do normalnych transformatorów mocy, to jednak specyficzne warunki pracy pieców elektrycznych wpływają w istotny sposób na konstrukcję i pracę niektórych elementów transformatorów piecowych.

Przemysłowe piece elektrodowe, należące do największych odbiorników energii elektrycznej, wprowadziły do elektrotechniki szereg specjalnych zagadnień z których specjalne konstrukcje transformatorów, kwestie łączenia i regulacji napięć, czy technika wielkich prądów, należą chyba do najważniejszych i powinny być dobrze znane zarówno konstruktorom jak i użytkownikom układów piecowych.

Piece elektryczne znalazły szerokie zastosowanie w różnych gałęziach współczesnego przemysłu: w metalurgii, przemyśle ferrostopów, przemyśle chemicznym, ceramicznym itd. Doprowadziło to do dość znacznego zróżnicowania typów, konstrukcji i mocy tych pieców (największe z tych pieców służące produkcji karbidu osiągnęły moce rzędu kilkudziesięciu MVA).

Nie rozpatrując tutaj klasyfikacji pieców elektrodowych pod względem ich przeznaczenia, możemy podzielić je,

z uwagi na sposób zamiany energii elektrycznej na energię cieplną, w najogólniejszym przypadku na dwie grupy:

1) piece elektryczne oporowe, w których energia elektryczna zamienia się na ciepło przy przejściu prądu przez ciała stałe lub ciekłe,

2) piece elektryczne łukowe, gdzie przekształcenie się energii dokonuje się w łuku elektrycznym palącym się w ośrodku gazowym.

Istnieją także piece mieszanych typów, wykorzystujące obie zasady zamiany energii elektrycznej na cieplną. Są to piece łukowo-oporowe, które w zależności od procesu technologicznego dla wytwarzania ciepła wykorzystują oba te sposoby.

Najbardziej charakterystyczne cechy właściwe rodzinie pieców elektrodowych, wpływające istotnie na konstrukcję i pracę transformatora zasilającego piec posiadają piece łukowe.

Analizując ich pracę otrzymujemy dla transformatorów piecowych następujące wymagania odróżniające ich od normalnych transformatorów mocy:

a) Duże natężenie prądu znamionowego po stronie niskiego napięcia, osiągające dziesiątki tysięcy, a nawet ponad sto tysięcy amperów.

b) Wysokie napięcia zwarcia; oporność wewnętrzna transformatora z opornością krótkiej sieci i ewentualnie dławika powinna ograniczyć prąd zwarcia do wartości 1,5 do 4-ro krotnej w stosunku do prądu znamionowego.

c) Duża wytrzymałość mechaniczna uzwojeń i wyprowadzeń, pozwalająca na częste udary prądów oraz zwarcia.

d) Możliwość regulacji napięcia w szerokich granicach i pod obciążeniem. Pozwala ona na regulację obciążenia pieca, osiągnięcie największego wyrównania asymetrii pieca oraz najkorzystniejszego $\cos \varphi$; umożliwia w pewnych przypadkach włączanie i wyłączanie pieca bez wyciągania elektrod z pieca, wreszcie pozwala na dokładne dopasowanie napięcia zasilającego do wielkości pieca i do rodzaju surowców czyli pozwala na prowadzenie właściwego procesu technologicznego.

e) Niższe dopuszczalne przyrosty temperatury uzwojeń, rdzenia i oleju ponad temperaturę powietrza otaczającego transformator.

Jak wiemy z doświadczenia, transformatory piecowe są najbardziej wrażliwą częścią układu pieców elektrodowych. Usunięcie ich uszkodzeń wymaga zwykle dużo czasu i jest bardzo kosztowne.

Do zasilania symetrycznych pieców trójfazowych stosuje się często trzy transformatory jednofazowe, przy czym każdy z nich pracuje na jedną elektrodę.

Prostokątne (niesymetryczne) piece trójfazowe z reguły pracują z transformatorami trójfazowymi, które są tańsze i zajmują mniej miejsca. (Układy stosowane dotąd w Kraju).

Pomiędzy piecem symetrycznym "okrągłym", w którym elektrody są umieszczone symetrycznie w rogach trójkąta równobocznego a piecem prostokątnym, gdzie leżą one w szeregu obok siebie zachodzi istotna różnica elektryczna wpływająca na pracę transformatora zasilającego piec.

Gdy trzy elektrody oraz trzy doprowadzenia prądowe leżą obok siebie, wtedy indukcje wzajemne tych trzech gałęzi nie będą równe.

Pomiędzy doprowadzeniem środkowym i każdym z zewnętrznych są one takie same, zaś pomiędzy dwoma zewnętrznymi, z uwagi na ich większą odległość od siebie - mniejsze.

Indukcja wzajemna, w zależności od tego czy prąd obwodu indukującego wyprzedza względnie opóźnia się względem prądu obwodu indukowanego wpływa na oddawanie energii względnie pobieranie jej przez obwód indukujący, pośrednicząc w przekazywaniu energii z jednego obwodu do drugiego.

W sieci trójfazowej różnice w przesunięciach fazowych pomiędzy trzema obwodami prądowymi powodują to, że środkowy obwód pobiera poprzez indukcję wzajemną tyle samo energii co oddaje, podczas gdy w obwodach zewnętrznych ma miejsce jednokierunkowe przenoszenie się energii. W wyniku tego jedna z faz oddaje do pieca mniej energii niż pozostałe (jest to tzw. faza słaba).

A więc w piecach prostokątnych, gdzie rozłożenie elektrod jest niesymetryczne i naruszana jest symetria geometryczna przewodów zasilających (sieci krótkiej) pojawiają się przy prądach fazowych sięgających stukilkudziesięciu tysięcy amperów, duże nierównomierności w rozplywie mocy w poszczególnych fazach znane użytkownikom piecy elektrodowych jako zjawisko "słabej" i "mocnej" fazy.

W piecach "okrągłych" z uwagi na symetryczne rozłożenie elektrod i przy symetrycznym torze wielkoprądowym

nie występuje zjawisko jednostronnego przenoszenia energii pomiędzy trzema obwodami prądowymi. Energia oddawana i pobierana w wyniku indukcji wzajemnej jest taka sama dla wszystkich trzech faz. Każdy obwód prądowy doprowadza więc do pieca taką samą ilość energii, nie ma więc w tym piecu ani "słabej" ani "mocnej" fazy.

Użytkowników pieców karbidowych (w Kraju posiadamy wyłącznie piece niesymetryczne), interesuje szczególnie problem wyrównania niesymetrii mocy spowodowanych zjawiskiem "słabej" i "mocnej" fazy.

Asymetria ta może być wyrównana w bardzo dużym stopniu poprzez regulację napięć fazowych transformatora zasilającego piec.

Związki pomiędzy dowolnymi stopniami regulowanego napięcia transformatora piecowego oraz występującymi przy danych obciążeniach prądami fazowymi można wyprowadzić analizując układ zastępczy 3 fazowego pieca elektrodowego przedstawiony na rys.1.

Oznaczmy współczynniki indukcji własnej poszczególnych faz przez L_{11} , L_{22} , L_{33} , a współczynniki indukcji wzajemnej przez L_{12} , L_{13} ; L_{21} , L_{23} i L_{31} , L_{32} , przy czym $L_{12} = L_{21}$, $L_{13} = L_{31}$, $L_{23} = L_{32}$.

Oporności czynne faz, będące sumą oporności roboczych pieca i oporności sieci krótkiej oznaczmy przez R_1 , R_2 , R_3 .

Napięcia fazowe U_1 , U_2 , U_3 trójfazowego transformatora piecowego posiadają możliwość regulacji swych wartości w granicach od 0 do U_m , przy czym są one związane z ich wartościami maksymalnymi następującymi relacjami:

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha U_{m1} \\ U_2 &= \beta U_{m2} \\ U_3 &= \gamma U_{m3} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: α , β i γ są rzeczywistymi ułamekami, których wartość zależy od stopnia zregulowania napięcia fazowego transformatora.

Jeżeli gwiazdę napięć fazowych poprowadzimy na wykresie tak, aby wektor U_{m1} pokrywał się z dodatnim kierun-

kiem osi rzeczywistej, to będziemy mogli wyrazić położenie napięć U_{m2} i U_{m3} przy pomocy operatora a :

$$\begin{aligned} U_{m1} &= U_m \\ U_{m2} &= a U_m \\ U_{m3} &= a^2 U_m \end{aligned} \quad (2)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j \frac{1}{2} \sqrt{3} = e^{j \frac{2\pi}{3}}, \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \sqrt{3} = e^{j \frac{4\pi}{3}} = e^{-j \frac{2\pi}{3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

W ogólnym przypadku pomiędzy punktem zerowym obciążenia i zerem trójfazowego układu prądów pojawi się napięcie zerowe U_0 .

Z II prawa Kirchhofa otrzymamy dla układu jak na rys. 1 następujące równania:

$$U_1 + U_0 = j\omega L_{11} I_1 + j\omega L_{12} I_2 + j\omega L_{13} I_3 + I_1 R_1$$

$$U_2 + U_0 = j\omega L_{21} I_1 + j\omega L_{22} I_2 + j\omega L_{23} I_3 + I_2 R_2 \quad (4)$$

$$U_3 + U_0 = j\omega L_{31} I_1 + j\omega L_{32} I_2 + j\omega L_{33} I_3 + I_3 R_3$$

Z I prawa Kirchhofa dostaniemy dla prądów równania:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (5)$$

Z układów równań (1 - 5) otrzymamy po przekształceniach następujące związki:

$$\begin{aligned} & /R_1 + R_3 + j\omega(L_{11} + L_{33} - 2L_{13})/I_1 + \\ & + /R_3 + j\omega(L_{33} + L_{12} - L_{13} - L_{32})/I_2 = (\alpha - \gamma a^2) U_m, \\ & /R_3 + j\omega(L_{33} + L_{21} - L_{23} - L_{31})/I_1 + \\ & + /R_2 + R_3 + j\omega(L_{22} + L_{33} - 2L_{23})/I_2 = (\beta a - \gamma a^2) U_m. \end{aligned}$$

Układ równań (6) przedstawia sobą dwa równania o dwu niewiadomych I_1 i I_2 . Pierwiastkami tych równań są w najogólniejszym przypadku liczby zespolone.

W przypadku gdy oporności czynne faz są takie same, czyli: $R_1 = R_2 = R_3 = R$, a przewody krótkiej sieci są tejże długości oraz posiadają ten sam przekrój i ułożone są obok siebie, możemy napisać, że:

$$\begin{aligned} L_{11} &= L_{22} = L_{33} = L, \\ L_{12} &= L_{23} = M_{12}, \\ L_{13} &= M_{13}. \end{aligned}$$

i układ równań (6) przyjmie postać nieco prostszą:

$$\begin{aligned} 2/R + j\omega(L - M_{13})/I_1 + /R + j\omega(L - M_{13})/I_2 &= (\alpha - \gamma a^2) U_m \\ /R + j\omega(L - M_{13})/I_1 + 2/R + j\omega(L - M_{12})/I_2 &= (\beta a - \gamma a^2) U_m \end{aligned} \quad (6)$$

Niechaj:

$$/R + j\omega(L - M_{13})/ = Z_{13}, \quad (7)$$

$$/R + j\omega(L - M_{12})/ = Z_{12}.$$

Układy (7) i (6a) dają:

$$2 Z_{13} I_1 + Z_{13} I_2 = (\alpha - \gamma a^2) U_m \quad (8)$$

$$Z_{13} I_1 + 2 Z_{12} I_2 = (\beta a - \gamma a^2) U_m$$

Równanie (8) rozwiążemy przy pomocy wyznaczników, wtedy:

$$D = \begin{vmatrix} 2 Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{13} & 2 Z_{12} \end{vmatrix} = Z_{13} (4 Z_{12} - Z_{13}) \quad (9)$$

$$D_{I_1} = \begin{vmatrix} /(\alpha - \gamma a^2) U_m / Z_{13} \\ /(\beta a - \gamma a^2) U_m / 2 Z_{12} \end{vmatrix} =$$

$$= 2 (\alpha - \gamma a^2) U_m Z_{12} - (\beta a - \gamma a^2) U_m Z_{13} \quad (10)$$

$$D_{I_2} = \begin{vmatrix} 2 Z_{13} /(\alpha - \gamma a^2) U_m / \\ Z_{13} /(\beta a - \gamma a^2) U_m / \end{vmatrix} =$$

$$= Z_{13} / 2 (\beta a - \gamma a^2) - (\alpha - \gamma a^2) / U_m \quad (11)$$

Rozwiązanie równania (8) otrzymamy jako:

$$I_1 = \frac{D_{I_1}}{D} = U_m \frac{2(\alpha - \gamma a^2) Z_{12} - (\beta a - \gamma a^2) Z_{13}}{Z_{13} (4 Z_{12} - Z_{13})} \quad (12)$$

$$I_2 = \frac{D_{I_2}}{D} = U_m \frac{2(\beta a - \gamma a^2) - (\alpha - \gamma a^2)}{4 Z_{12} - Z_{13}} \quad (13)$$

Z równania (5), z pomocą (12) i (13) znajdujemy dla prądu I_3 wyrażenie:

$$I_3 = - U_m \frac{2(\alpha - \gamma a^2) Z_{12} + (\beta a - \alpha) Z_{13}}{Z_{13} (4 Z_{12} - Z_{13})} \quad (14)$$

Równanie (12) (13) i (14) są równaniami regulacji i charakteryzują zmiany prądów fazowych układu piecowego przy stałych wartościach oporności czynnych w funkcji odpowiednich regulowanych napięć fazowych.

Zagadnienie dopuszczalnych asymetrii w zasilaniu napięciami fazowymi, tj. przy $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ rozwiązuje się bez trudności dla każdego konkretnego schematu połączeń transformatora piecowego lub zespołu transformatorów, stanowi jednak odrębny temat, który nie został włączony do niniejszego referatu.

W przypadku gdy napięcia poszczególnych faz są sobie równe i wynoszą np. U_m , czyli gdy: $\alpha = \beta = \gamma = 1$, wtedy:

$$I_1 = U_m \frac{2(1 - a^2) Z_{12} - (a - a^2) Z_{13}}{Z_{13} (4 Z_{12} - Z_{13})} \quad (15)$$

$$I_2 = U_m \frac{2(a - a^2) - (1 - a^2)}{4 Z_{12} - Z_{13}} \quad (16)$$

$$I_3 = - U_m \frac{2(1 - a^2) Z_{12} - (a - 1) Z_{13}}{Z_{13} (4 Z_{12} - Z_{13})} \quad (17)$$

Jak wynika z równań (15), (16) i (17) przy tych samych wartościach oporności obciążenia i takich samych napięciach fazowych ($\alpha = \beta = \gamma = 1$), prądy obciążeniowe poszczególnych faz różnią się zarówno co do wartości jak i co do fazy. Otrzymaliśmy tu analityczne potwierdzenie i uzasadnienie powstania zjawiska "słabej" i "mocnej" fazy. Poprzez odpowiednią regulację napięć poszczególnych faz ($\alpha \neq \beta \neq \gamma$) możemy jednak wpłynąć na rozptył prądów w poszczególnych fazach, uzyskując w efekcie symetryczne obciążenie faz.

W przypadku pieca i toru wielkoprądowego symetrycznego o równych współczynnikach indukcji wzajemnej z równań (7) otrzymamy:

$$Z_{12} = Z_{13} = Z$$

po wprowadzeniu tej wielkości do równań (15) (16) i (17) dostaniemy dla prądów obciążeniowych wyrażenia:

$$I_1 = U_m \frac{2(1 - a^2) - (a - a^2)}{3Z} = \frac{U_m}{Z} \quad (18)$$

$$I_2 = U_m \frac{2(a - a^2) - (1 - a^2)}{3Z} = a \frac{U_m}{Z} \quad (19)$$

$$I_3 = -U_m \frac{2(1 - a^2) + (a - 1)}{3Z} = a^2 \frac{U_m}{Z} \quad (20)$$

Jak było do przewidzenia otrzymaliśmy teraz pełną symetrię prądów obciążeniowych, ich wartości są sobie równe i przesunięte względem siebie w fazie o 120° .

Rozpatrzone w referacie zagadnienie racjonalnej regulacji napięcia transformatora piecowego w czasie pracy pieca nabiera dużej wagi przy eksploatacji krajowych pieców karbidowych, które są dzisiaj największymi odbiornikami energii elektrycznej.

W Kraju posiadamy bowiem jedynie piece szeregowe, niesymetryczne, w których problemy zmniejszenia znacznych asymetrii obciążeń poprzez regulację ich napięć fazowych

pod obciążeniem są niezmiernie aktualne. Piece krajowe posiadają ponadto bardzo niekorzystnie ukształtowane to-ry wielkoprądowe o dużej oporności indukcyjnej, dającej znaczne indukcyjne spadki napięć i powodujące pomniejszenie ich współczynników mocy.

Na rysunku 2 przedstawione są osiągnięcia techniki budowy układów pieców elektrodowych w rozwoju chronologicznym (lit.3).

Z tego przeglądu wynika, że najmniejszą oporność indukcyjną mają konstrukcje z bifilarnym prowadzeniem torów wielkoprądowych co umożliwiają jedynie transformatory jednofazowe.

W rozwijaniu konstrukcji układów pieców karbidowych należy się więc nastawiać na piece okrągłe, symetryczne z bifilarnym torem wielkoprądowym i transformatorami jednofazowymi.

LITERATURA

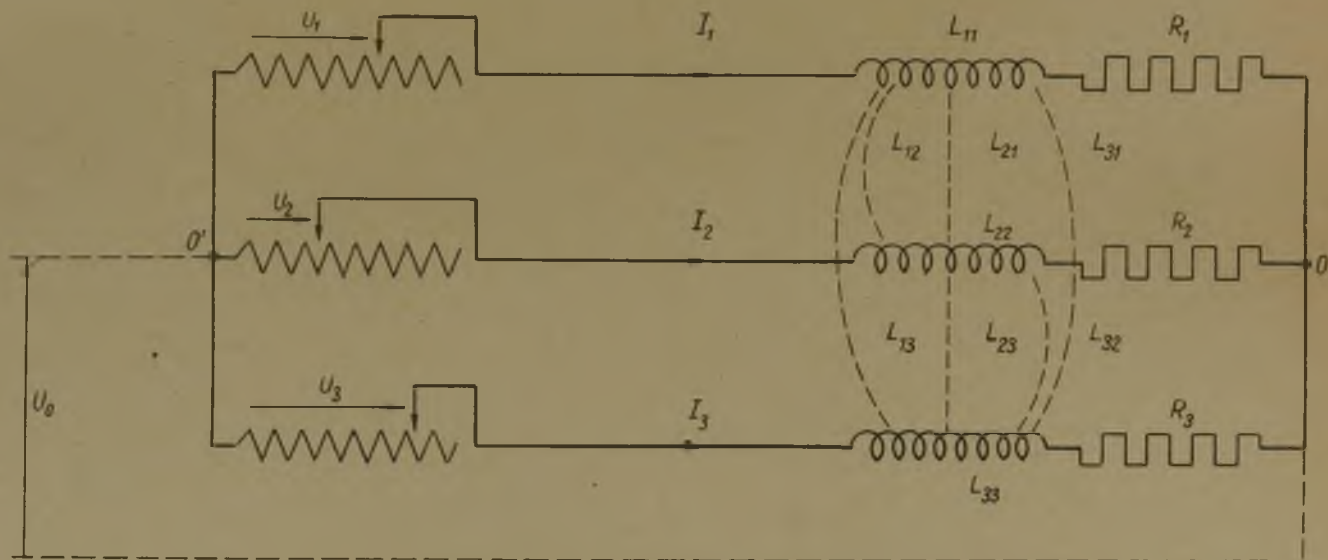
1. Z.Gogolewski i J.Schmidt - Kilka zagadnień z transformatorów piecowych. P.El.Zeszyty 2/3 1955 r.
2. E.Kluss - Elektrische Unsymetrie in Hochstromleitungen grosser Drehstrom-Schmelzöfen ETZ 1951 H.4.
3. E.Mokrosz - Perspektywy rozwoju produkcji karbidu. P.El. Nr 4 1960 r.
4. G.Eger - Handbuch d.Techn.Elektrochemie B.V. A.V.G. 1953
5. P.M.Tichomirow - Rasczot transformatorów dla dugo-wych el. peczej. GEI, 1959.
6. L.A.Cejtlin - Induktivnosti przewodow i konturow. GEI, 1950.
7. T.Wotschke - Die Leistung des Drehstromofens. Springer 1925 r.

Печные трансформаторы

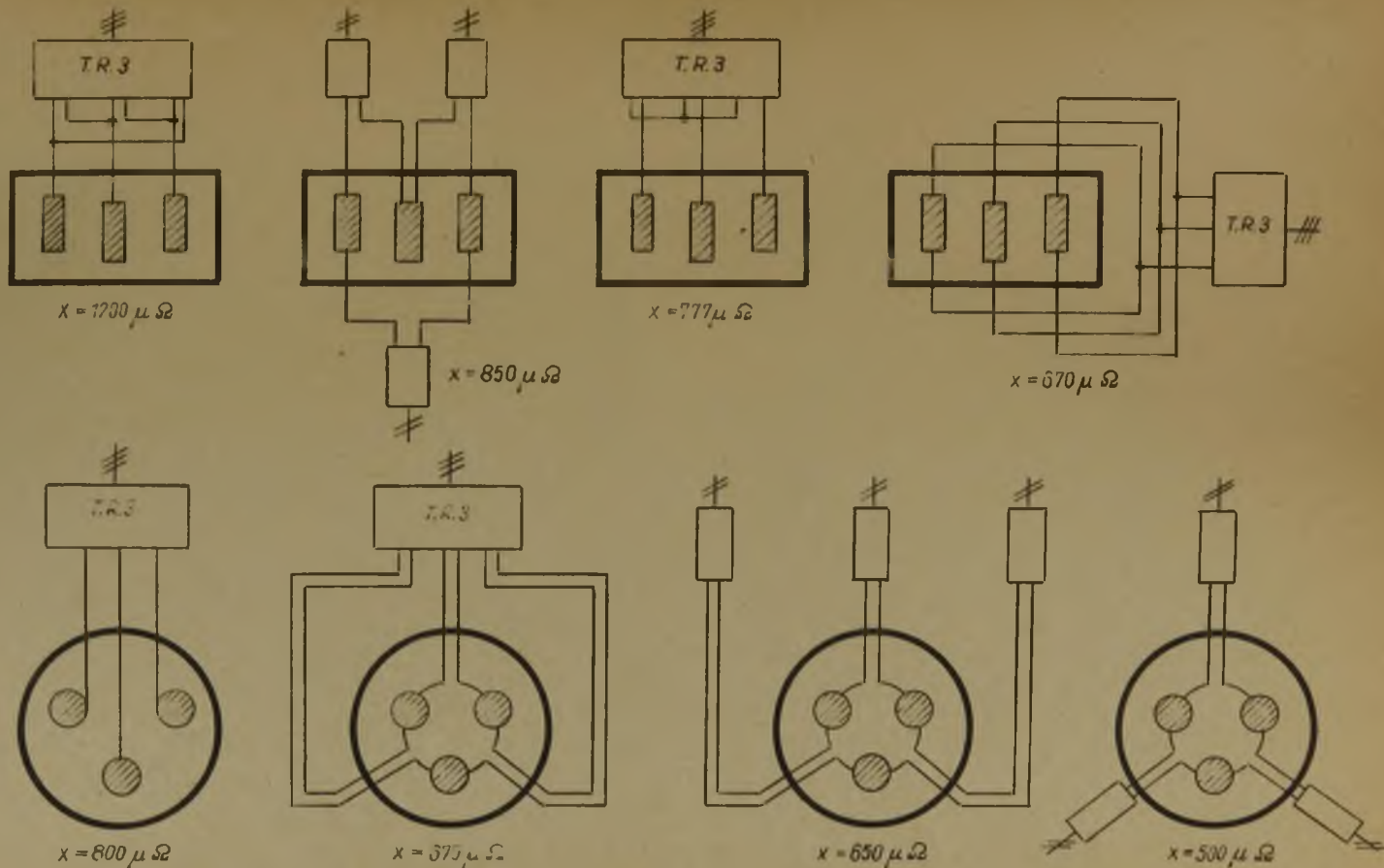
Автор дает сжатую сводку основных сведений о асимметриях нагрузки и представляет аналитические зависимости, которыми можно руководятся в практических случаях.

Les transformateurs pour les grands fours électriques

L'auteur donne les équations fondamentales pour les cas des charges asymetriques des transformateurs pour les fours électriques.



Rys.1. Układ zastępczy 3 fazowego pieca elektrodowego zasilanego niesymetrycznymi napięciami



Rys. 2. Układy niesymetrycznych i symetrycznych pieców elektrodowych oraz wartości ich reaktancji ruchowych