

ROZDZIAŁ VII.

WYPADKI SPECJALNE TRANSFORMOWANIA.

1. Transformator trójuzwojeniowy.

W ostatnich czasach pewne rozpowszechnienie znalazły transformatory trójuzwojeniowe, posiadające jedno uzwojenie pierwotne i dwa wtórne, zawdzięczając czemu z jednego transformatora można zasiląć dwie sieci. Np. transformator 110/60/10 kV pracuje jednocześnie na sieć 60 kV i 10 kV.

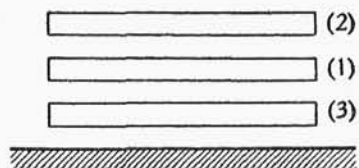
Podział mocy między uzwojeniami może być wykonany rozmaicie. Najprostszym wypadkiem będzie taki, gdy moc uzwojenia pierwotnego jest równa sumie mocy każdego z uzwojeń wtórnych—np. $P_2 = 6000$ kVA, $P_3 = 4000$ kVA, $P_1 = 10000$ kVA. Możliwe są wypadki inne—np. $P_1 = 10000$ kVA; $P_2 = 10000$ kVA; $P_3 = 3000$ kVA.

Przy takim podziale mocy mamy dwie alternatywy: albo przy nieobciążonym uzwojeniu trzecim, obciążyć całkowicie drugie, albo też przy obciążonym całkowicie lub częściowo trzecim, obciążyć drugie tak, żeby w sumie z obciążeniem trzeciego uzwojenia nie przekroczyć mocy uzwojenia pierwotnego.

Podział mocy między uzwojeniami zależy, oczywiście od warunków pracy.

Jeżeli chodzi o układ połączeń uzwojeń przy prądzie trójfazowym, to uzwojenie pierwotne (zazwyczaj najwyższego napięcia) bywa łączone zwykle w Δ , tak samo uzwojenie średniego napięcia uzwojenie zaś napięcia dolnego w Δ . Możliwe są i inne kombinacje—np. przy stosunkowo małych mocach $\Delta/\Delta/\Delta$, trzeba jednak zaznaczyć, że pożądanym jest, żeby jedno z uzwojeń było połączone w trójkąt, nadającą równowagę całemu układowi.

W transformatorze trójuzwojeniowym pierwszorzędne znaczenie ma kolejność umieszczenia uzwojeń na słupie. Według obliczeń Falka najlepszym jest umieszczenie uzwojenia pierwotnego (1) między dwoma wtórnymi (2) i (3), jak na rys. 93.



Rys. 93.

Wtedy uzwojenia wtórne są od siebie pod względem napięcia niemal niezależne i transformator trójuzwojeniowy może być łączony równolegle z transformatorami dwuuzwojeniowymi (np. transf. 110/60 kV i 110/10 kV — patrz początek) — przy spełnieniu oczywiście ogólnych wa-

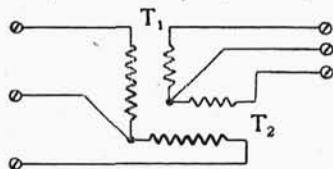
runków pracy równoległej.

Przy nieśrodkowem umieszczeniu uzwojenia pierwotnego, oba wtórne leżą koło siebie i wzajemnie na sobie oddziałują (za pośrednictwem strumieni rozproszenia). Zmiana obciążenia jednego z uzwojeń pociąga za sobą zmiany napięcia w drugim.

Praca równoległa z transformatorem dwuuzwojeniowym naogół jest niemożliwa.

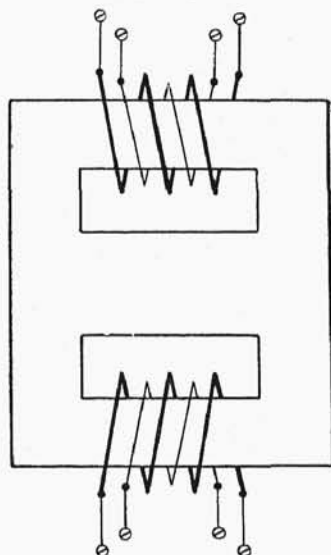
2. Transformowanie prądu dwufazowego.

Sieci dwufazowe należą obecnie do rzadkości — jednakże niekiedy można je spotkać. Przy prądzie dwufazowym przeważnie są stosowane dwa transformatory jednofazowe w układzie jak np. na rys. 94 (mamy tutaj skojarzenie faz). Niekiedy są budowane



Rys. 94.

specjalne transformatory dwufazowe (rys. 95) o rdzeniu trójsłupowym. Każdy ze słupów skrajnych niesie uzwojenie pierwotne i wtórne jednej fazy. Słup środkowy służy jako droga powrotna dla strumieni obu faz. Ponieważ strumienie te są przesunięte w stosunku do siebie o 90° , więc strumień wypadkowy w słupie środkowym jest $\sqrt{2}$ razy większy od strumienia w słupach skrajnych — przekrój tego słupa winien być odpowiednio większy.



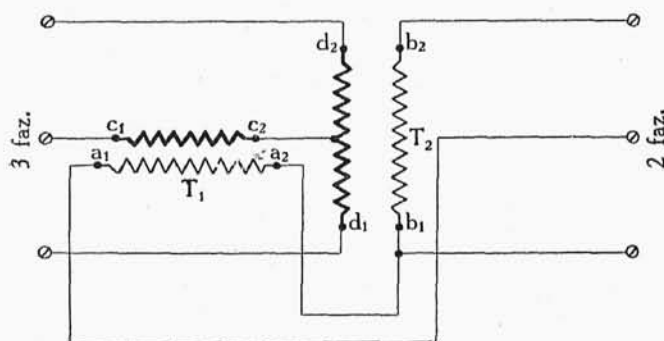
Rys. 95.

3. Zmiana liczby faz.

a) Przekształcenie prądu dwufazowego na trójfazowy.

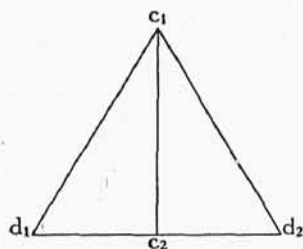
Konieczność takiego przekształcenia zachodzi np. wtedy, gdy stara elektrownia na prąd dwufazowy jest zastąpiona przez nowoczesną

trójfazową, a instalacja dwufazowa u odbiorców jest jeszcze w stanie używalności. Istnieje kilka sposobów przekształcenia prądu trójfazowego na dwufazowy. Rozpatrzmy jeden, który znalazł duże rozpowszechnienie — układ Scott'a (rys. 96).



Rys. 96.

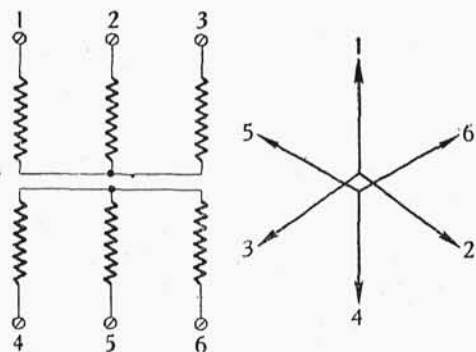
Przy tym układzie używa się dwóch transformatorów jedno-fazowych T_1 i T_2 . W obu transformatorach uzwojenia, na które jest załączona sieć dwufazowa ($a_1 - a_2$ oraz $b_1 - b_2$) posiadają jednakową liczbę zwojów. Po stronie wtórnej uzwojenia $d_1 - d_2$ i $c_1 - c_2$ mają różną liczbę zwojów. Końcówka c_2 uzwojenia $c_1 - c_2$ jest połączona elektrycznie ze środkiem uzwojenia $d_1 - d_2$.



Rys. 97.

By punkty d_1, c_1, d_2 stanowiły wierzchołki równobocznego trójkąta napięcie, musi istnieć zależność (rys. 97):

$$c_1 c_2 = \frac{d_1 d_2}{2} \sqrt{3} \approx 0,865 d_1 d_2$$



Rys. 98.

a ponieważ napięcia tak się mają do siebie, jak liczby zwojów, więc uzwojenie $c_1 - c_2$ będzie posiadało 0,865 liczby zwojów uzwojenia $d_1 - d_2$.

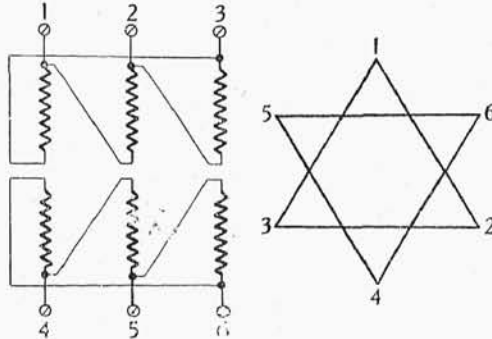
b) Przekształcenie prądu trójfazowego na sześciofazowy.

Do zasilania prostowników rtęciowych i przetwornic jednotwornikowych często jest używany prąd sześciofazowy. Możemy go otrzymać, korzystając z transformatora trójfazowego

po uskutecznięciu pewnych przełączeń po stronie wtórnej (strona pierwotna ma połączenie normalne — najczęściej trójkąt).

Po stronie wtórnej uzwojenie każdego słupa jest podzielone na dwie połowy (jak przy Δ — patrz rys. 55).

Z otrzymanych w ten sposób 6-ciu cewek można utworzyć albo 2 gwiazdy (rys. 98), przesunięte w stosunku do siebie o 180° albo 2 trójkąty (rys. 99) również przesunięte o 180° .



Rys. 99.

Często zachodzi potrzeba (np. przy prostowniku rtęciowym) posiadania punktu zerowego po stronie prądu sześciofazowego.

Uzyskujemy to w ten sposób, że punkty zerowe obu gwiazd z rys. 98 łączymy elektrycznie ze sobą.

4. Autotransformator.

Autotransformator różni się od zwyczajnego transformatora obwodem elektrycznym, gdyż posiada zasadniczo tylko jedno uzwojenie, rdzeń żelazny jest natomiast taki sam, jak u zwyczajnego.

Przed przystąpieniem do omawiania autotransformatora weźmy transformator zwyczajny (rys. 100).

Dla takiego transformatora amperozwoje pierwotne i wtórne są, jak wiemy, równe:

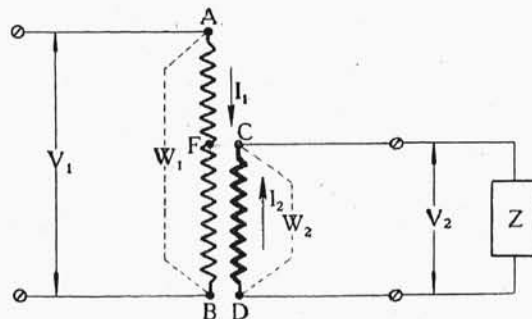
$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

skąd

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{\mathfrak{D}}$$

gdzie

$$\mathfrak{D} = \frac{w_1}{w_2}$$

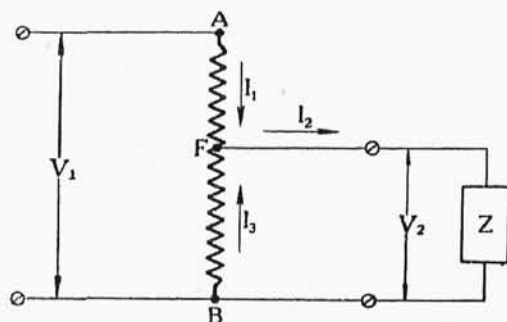


Rys. 100.

jest przekładnią transformatora (w naszym wypadku $\mathfrak{D} > 1$).

Przypomnieć należy, że kierunki prądów I_1 i I_2 są wprost przeciwnie. Odliczmy teraz od punktu B ku górze w_2 zwojów

(punkt F). Między punktami B i F panuje takie same napięcie, jak między punktami C i D (gdyż napięcie jednego zwoju w każdym z uzwojeń jest jednakowe). Odbiornik Z , zamiast załączać na zaciski specjalnego uzwojenia wtórnego CD , możemy włączyć między punkty F i B . Prąd płynący w odbiorniku przez to się nie zmienia. Otrzymaliśmy autotransformator (rys. 101).



Rys. 101.

Na odcinku BF płyną obecnie dwa prądy:

1) prąd pierwotny $\downarrow I_1$,

2) prąd wtórny $\uparrow I_2$, dając wypadkową $\uparrow I_3 = I_2 - I_1$

$$I_3 = I_2 - I_2 \frac{1}{\vartheta} = I_2 \frac{\vartheta - 1}{\vartheta} \quad (1)$$

Jeżeli odcinek FB traktować, jako uzwojenie wtórne autotransformatora, to można powiedzieć, że

ono tem się różni od uzwojenia wtórnego normalnego, że, posiadając taką samą liczbę zwojów jak w normalnym, będzie miało mniejszy przekrój przewodów, gdyż prąd

$$I_3 = I_2 \frac{\vartheta - 1}{\vartheta} < I_2.$$

(zakładamy jednakową gęstość prądu).

Pozostałą część uzwojenia AF można traktować (czysto formalnie!) jako uzwojenie pierwotne. Zwoje tutaj będą posiadały przekrój taki sam, jak w transformatorze normalnym (płynie ten sam prąd I_1), jednakże ich będzie mniej, gdyż zamiast w_1 tylko $w_1 - w_2$.

Widzimy zatem, że w autotransformatorze w stosunku do transformatora normalnego mamy oszczędność na miedzi zarówno po stronie pierwotnej (mniej zwojów), jak i wtórnej (mniejszy przekrój przewodów). Z tego powodu (jak również i z tego, że straty wypadają mniejsze) autotransformator nosi często nazwę *transformatora oszczędnościowego*. Nietrudno się przekonać, że ta oszczędność jest tem większa, im przekładnia transformatora więcej się zbliża do jedności. Moc oddawana przez transformator po stronie wtórnej:

$$P = I_2 V_2 \quad \dots (2)$$

Z równania (1)

$$I_2 = I_3 \frac{\vartheta}{\vartheta - 1}$$

Podstawiając tę wartość do równania (2), otrzymamy:

$$P = V_2 I_2 = V_2 I_3 \frac{\vartheta}{\vartheta - 1} \quad \dots (3).$$

Wyrażenie $V_2 I_3$, jako iloczyn napięcia wtórnego przez prąd płynący w uzwojeniu wtórnym nosi nazwę *mocy własnej* autotransformatora. Oznaczmy ją przez P' . $P' = V_2 I_3$.

Podstawiając do zależności (3), otrzymamy:

$$P = P' \frac{\vartheta}{\vartheta - 1}$$

skąd

$$P' = \frac{\vartheta - 1}{\vartheta} P \quad \dots (4)$$

Ponieważ ułamek $\frac{\vartheta - 1}{\vartheta}$ jest mniejszy od jedności ($\vartheta > 1$), więc można powiedzieć, że w autotransformatorze moc własna (P') jest mniejsza od mocy $P = V_2 I_2$, oddawanej przez autotransformator po stronie wtórnej. Ta ostatnia moc nosi nazwę *mocy przechodniej*. W jakim stopniu moc własna jest mniejsza od przechodniej — zależy to od przekładni.

Jeżeli np. $\vartheta = 1,1$; $P' = \frac{1,1 - 1}{1,1} P = \frac{1}{11} P$ — czyli tutaj moc własna autotransformatora wynosi tylko jedenastą część mocy przechodniej, a ponieważ wymiary autotransformatora zależą od jego mocy własnej, więc będą takie, jak wymiary transformatora normalnego na moc zaledwie $\frac{1}{11} P$.

Przy przekładni większej np. $\vartheta = 5$, korzyść ze stosowania autotransformatora jest znacznie mniejsza,

$$P' = \frac{5 - 1}{5} P = \frac{4}{5} P,$$

czyli oszczędność wynosi tylko 20%.

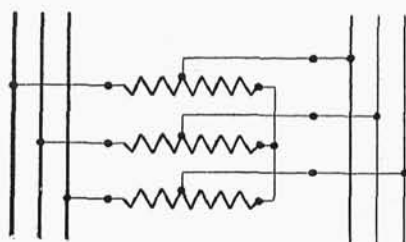
Rys. 102 daje nam schemat autotransformatora trójfazowego.

Dotychczas była mowa o obniżaniu napięcia. Gdybyśmy napięcie pierwotne przyłożyli do zacisków FB , to na zaciskach AB , uzyskalibyśmy napięcie wtórne wyższe — mamy podwyższenie napięcia.

Zastosowanie autotransformatora — naogół ograniczone — wszędzie tam, gdzie przekładnia mało odbiega od jedności. Przy wysokich napięciach przekładnia nie może przekraczać 1,25 ze względu na bezpieczeństwo — gdyż strony wyższego i niższego napięcia są połączone elektrycznie.



Czasami używa się autotransformatora do rozruchu silników asynchronicznych, synchronicznych, oraz niektórych komutatorowych;



Rys. 102.

do regulowania napięcia w nieznacznych granicach (w tym wypadku autotransformator winien być zaopatrzony w zaczepy), oraz często przy budowie zupełnie małych jednostek na nieznaczne napięcie — i w pewnych innych wypadkach specjalnych.

Autotransformatory bywają niekiedy stosowane przy liniach dalekonośnych, jako t. zw. *transformatory dodawcze* (Booster—Transformer) celem skompensowania spadku napięcia, występującego w linii. — (patrz VII—6-a).

5. Transformatorki miernicze.

a) *Transformatorek napięciowy* — budową swą i działaniem nie różni się zasadniczo od normalnego transformatora. Charakteryzuje go bardzo słabe obciążenie wtórne — gdyż po stronie wtórnej załączony jest na dużą oporność (woltomierz, cewka napięciowa watomierza, licznika). Można uważać, że transformatorek ten pracuje niemal jałowo. Moc pobierana z obwodu, jest naogół rzędu kilkudziesięciu woltamperów.

Wykres wektorowy transformatora napięciowego niczem się nie różni od wykresu wektorowego transformatora normalnego, obciążonego omowo.

Stosunek zwojów najczęściej jest tak dobrany, aby uzyskać na zaciskach wtórnych 100V. Jak wspomnieliśmy, transformator pracuje prawie jałowo, więc

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \vartheta$$

stąd

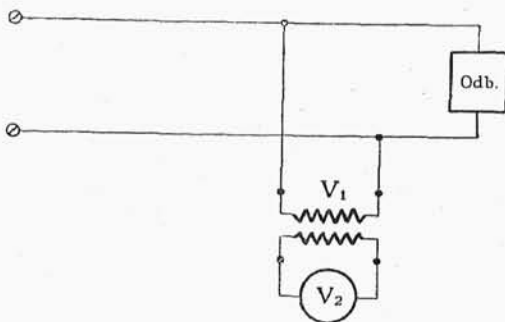
$$V_1 \approx V_2 \vartheta,$$

a zatem, mierząc napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego V_2

i znając przekładnię Φ , możemy obliczyć napięcie V_1 na zaciskach uzwojenia pierwotnego. Można zresztą woltomierz tak wyskalować, że będziemy od razu odczytywali wysokie napięcie.

Dokładność pomiaru jest zależna od stałości przekładni Φ . Stosunek zatem napięć winien być możliwie równy stosunkowi SEM-ych.

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2}.$$



Rys. 103.

To będzie wtedy, gdy spadki napięć w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym będą małe. W uzwojeniu wtórnym spadek napięcia będzie mały wtedy, gdy prąd i oporność pozorna uzwojenia wtórnego będą małe. Prąd jest zależny od oporności obwodu zewnętrznego — pożądanem jest przeto, by ta oporność była jaknajwiększa.

Oporność pozorna uzwojenia wtórnego będzie tem mniejsza, im mniejsze będą oporności omowa i indukcyjna. Oporność indukcyjną można zmniejszyć przy uzwojeniach krążkowych przez powiększenie liczby krążków, przy uzwojeniach cylindrycznych przez umieszczenie możliwie bliskie uzwojenia pierwotnego i wtórnego (mała szczelina powietrza).

Przyjmując nieznaczne gęstości prądu, możemy również zmniejszyć oporność omową.

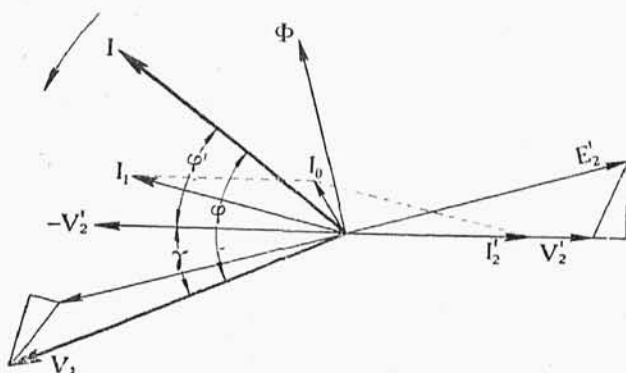
Spadek napięcia w uzwojeniu pierwotnym zależy od oporności pozornej tego uzwojenia oraz od prądu I_1 . O oporności można powiedzieć to samo, co przy uzwojeniu wtórnym. Jeżeli chodzi o prąd, to jest on sumą geometryczną prądu wtórnego, sprowadzonego na stronę pierwotną I'_2 i prądu biegu jałowego I_0 ; $\hat{I}_1 = \hat{I}'_2 + \hat{I}_0$.

By prąd I_1 był mały, prąd biegu jałowego I_0 winien być możliwie mały. Prąd I_0 zależny jest od nasycenia żelaza, a więc należy stosować niskie indukcje w obwodzie magnetycznym transformatora — 7 ÷ 9 tysięcy Gaussów — wobec 12 ÷ 14 tysięcy G. przy transformatorach normalnych.

Przekładnia transformatora napięciowego jest czuła na zmiany napięcia, a zwłaszcza na jego wzrost. Ze wzrostem napięcia wzrasta prąd biegu jałowego I_0 , a wraz z nim i prąd pierwotny I_1 , co pociąga za sobą wzrost spadku napięcia w uzwojeniu pierwotnym, skutkiem czego stosunek napięć $\frac{V_1}{V_2}$ przestanie być

równym stosunkowi SEM-ych — przekładnia przestaje być stałą. Często się zdarza, że jeden transformator napięciowy pracuje na zasilanie kilku cewek napięciowych rozmaitych przyrządów (woltomierze, watomierze, liczniki, przekaźniki).

Wtedy należy się liczyć z obciążeniem transformatora i wynikającą z tego powodu mniejszą dokładnością. Niekiedy zespół „transformator — cewki napięciowe” bywa traktowany jako jedna całość, wywzorcowana specjalnie dla siebie.



Rys. 104.

Jeżeli transformator napięciowy będzie zasiliał cewkę napięciową watomierza lub licznika, to wtedy we wskazaniach tych przyrządów wystąpi pewien błąd. Weźmy wykres wektorowy transformatora (rys. 104). Transformator zasilą cewkę napięciową watomierza. Załóżmy, że chcemy zmierzyć moc, czerpaną przez pewien odbiornik.

Prąd w tym odbiorniku I spóźnia się o kąt φ w stosunku do napięcia V_1 (patrz wykres wektorowy); moc odbiornika wynosi:

$$P = I V_1 \cos \varphi.$$

Stosując transformator, zmienimy kąt przesunięcia fazowego między prądem a napięciem — gdyż zamiast kąta φ , jak jest w rzeczywistości, będziemy mieli kąt mniejszy φ' (właściwie jest to kąt między prądem a odwróconym wektorem V_2').

Po użyciu transformatora moc, którą zarejestruje watomierz, wyniesie:

$$P' = I (\vartheta V_2') \cos \varphi'$$

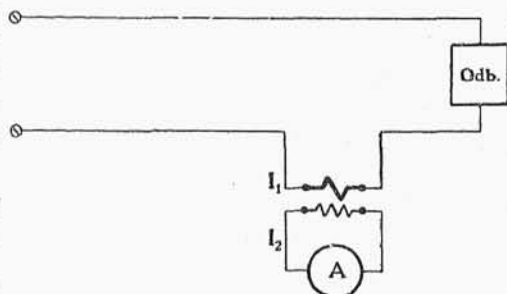
Ponieważ $\varphi \neq \varphi'$, więc $P \neq P'$.

Niedokładność ta będzie, oczywiście, występowała zawsze i, jak wynika z rysunku, będzie tem większa, im większy jest prąd magnesujący i spadki napięć w uzwojeniu transformatora.

Różnica kątów $\gamma = \varphi - \varphi'$ nosi nazwę uchybu kąowego. Wielkość uchybu kąowego wynosi kilkanaście — do kilkudziesięciu minut — zależnie od dokładności transformatora.

b) *Transformator prądowy.* Jest to transformator szeregowy o zmiennym wzbudzeniu, przez pierwotne uzwojenie którego przepływa prąd pobierany przez odbiornik. Uzwojenie wtórne jest zwarte przez amperomierz o małej oporności, lub jakąś cewkę prądową innego przyrządu.

Stosunek zwojów jest najczęściej tak dobrany, żeby przy normalnym prądzie po stronie pierwotnej, po stronie wtórnej otrzymać 5 A.



Rys. 105.

Uzwojenie wtórne jest zwarte „na krótko” — prąd magnesujący przeto jest bardzo słaby, można powiedzieć, że amperozwoje pierwotne i wtórne w tym wypadku niemal zupełnie są równe:

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 \text{ skąd } I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{\vartheta}$$

Przekładnia ϑ , zwłaszcza przy większych prądach, jest znacznie mniejsza od jedności.

Mając prąd I_2 i dzieląc go przez wiadomą przekładnię ϑ , otrzymamy prąd I_1 . Można amperomierz tak wyskalować, że będziemy odczytywali od razu prąd strony pierwotnej.

Transformator prądowy, w odróżnieniu od napięciowego, swoim wyglądem często mało przypomina transformator normalny.

Przy prądach średnich (do jakichś 250 A) uzwojenie pierwotne składa się z kilku, lub kilkunastu grubych zwojów. Na rys. 106 widzimy taki transformator. Pierścień dolny (1) jest rdzeniem żelaznym, na którym jest nawinięte uzwojenie wtórne. Pierścień górny (2) stanowi uzwojenie pierwotne. Przewody doprowadzające i odprowadzające prąd tego uzwojenia przechodzą przez wspólny izolator.

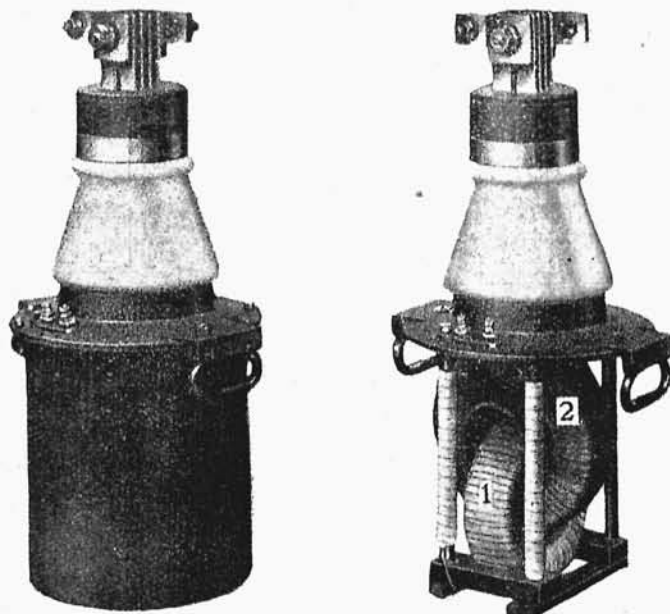
Na pokrywie widzimy dwa małe zaciski uzwojenia wtórnego.

Przy prądach ponad 500 ÷ 1000 A całe uzwojenie pierwotne sprowadza się do jednego grubego pręta.

Bardzo często prętem tym jest szyna urządzenia rozdzielczego.

Taki transformator prądowy widzimy na rys. 107.

Czasami na jednym pręcie są dwa rdzenie z dwoma uzwojeniami wtórnymi, przeznaczonemi do zasilania dwóch niezależnych obwodów prądowych.



Rys. 106.

Równość $I_1 w_1 = I_2 w_2$ będzie tem ściślejsza, im mniejszy będzie prąd biegu jałowego, czyli im słabiej będzie nasycony obwód żelazny transformatora. Z tego względu dopuszczamy indukcje w żelazie bardzo niskie (zaledwie $500 \div 1000$ G).

Gdy transformatorek prądowy zasila cewki prądowe watomierza lub licznika, wtedy we wskazaniach tych przyrządów wystąpi pewien błąd — podobnie jak to miało miejsce przy transformatorach napięciowych.

Na rys. 108 mamy wykres wektorowy pracy transformatora zwartego — takim jest bowiem transformatorek prądowy. Wykres wykonano zupełnie podobnie, jak na rys. 38 (ΔV_1 — jest napięciem na zaciskach uzwojenia pierwotnego przy zaciskach wtórnych zwartych). Prąd uzwojenia pierwotnego I_1 jest prądem, czerpanym przez

odbiornik. Napięcie sieci V w zależności od charakteru odbiornika może być w fazie — może wyprzedzać, lub spóźniać się względem prądu I_1 . Założmy, że napięcie V wyprzedza prąd I_1 o kąt φ . Moc pobierana przez odbiornik:

$$P = V I_1 \cos \varphi$$

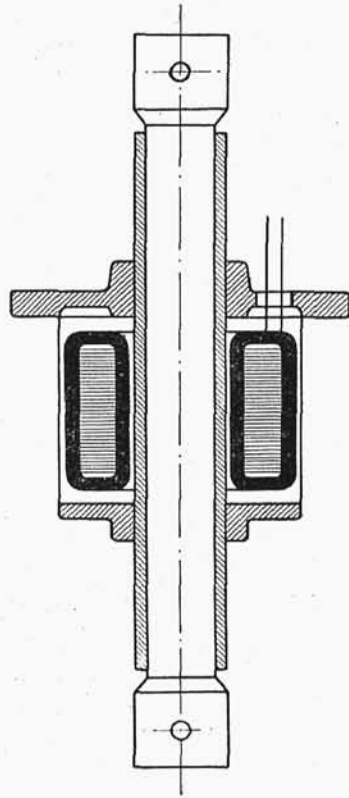
Gdy zasilimy cewkę prądową watomierza z transformatora, moc wskazywana przez watomierz wyrazi się wzorem:

$$P' = V \left(I_2 \frac{1}{\vartheta} \right) \cos \varphi'.$$

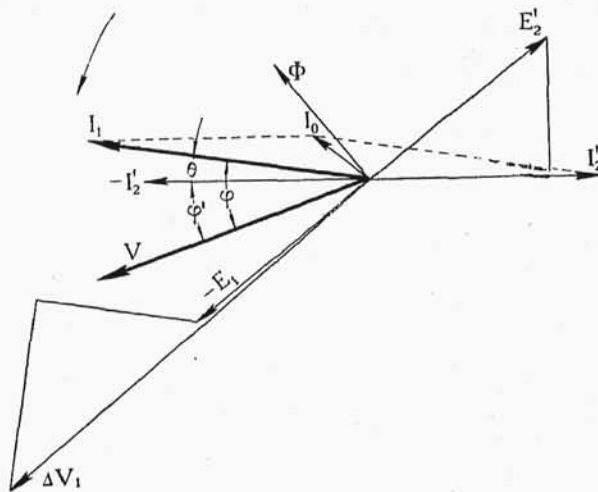
Ponieważ $\varphi \neq \varphi'$ więc $P \neq P'$.

Różnica $\varphi - \varphi' = \theta$ nosi nazwę uchybu kątowego.

Jak z wykresu wektorowego można wywnioskować, uchyb ten będzie tem mniejszy, im mniejszą będzie oporność omowa obwodu wtórnego w stosunku do jego oporności indukcyjnej.



Rys. 107.



Rys. 108.

Rząd wielkości uchybu — jak przy transformatorach napięciowych.

Transformator prądowy ma jedną ciekawą właściwość — nie można go zostawić po stronie wtórnej rozwartym, wtedy bowiem znikną amperozwoje wtórne, które kompensowały amperozwoje pierwotne. Amperozwoje pierwotne nieskompensowane wytworzą nadmierny strumień magnetyczny, skutkiem czego żelazo może się tak rozgrzać, że uszkodzi się izolacja między blachami, oraz mogą się trwale zmienić jego właściwości magnetyczne.

Pozatem w uzwojeniu wtórnym wznieci się SEM tego rzędu, że czasami może nastąpić przebicie izolacji.

6. Regulacja napięcia.

Napięcie możemy regulować w sposób ciągły lub skokami. Regulację ciągłą uzyskujemy, stosując regulatory indukcyjne, silniki synchroniczne (na biegu jałowym), względnie transformatory przesuwnie. Sposoby te omówimy niżej.

a) *Regulacja skokami (zaczepowa)*. Polega na zmianie przekładni transformatora — w tym celu jego uzwojenie jest zaopatrzone w zaczepy.

Zmieniać przekładnię można przy transformatorze odłączonym, lub pod obciążeniem. Większość nowoczesnych transformatorów rozdzielczych posiada zaczepy, umożliwiające regulację w małych granicach (około $4 \div 5\%$). Regulacja odbywa się zwykle po uprzednim odłączeniu transformatora od sieci. O sposobach wyprowadzenia tych zaczepów — patrz VIII—2—d.

Przy przenoszeniu energii elektrycznej na dalekie odległości występują w przewodach znaczne spadki napięcia, zależne od wielkości i charakteru ($\cos \varphi$) obciążenia. Ponieważ zarówno jedno, jak i drugie ulega ciągłym zmianom, — powstaje konieczność regulowania pod obciążeniem. Najidealniejszym bodaj rozwiązaniem pod względem technicznym jest zastosowanie silników synchronicznych, zmieniając wzbudzenie których, możemy utrzymać na całej linii stałe napięcie. Pozatem przewzbudzony silnik synchroniczny poprawia $\cos \varphi$ linii. Stosowanie silników synchronicznych wypada jednakże drogo (koszt kapitału, straty energii biegu jałowego) — i z tego powodu nie znajdują one szerokiego rozpowszechnienia. Coraz większe zastosowanie mają transformatory z zaczepami. Jeżeli chodzi o granice regulacji — to rzadko zachodzi potrzeba regulacji w granicach szerszych niż $\pm 20\%$.