

BADANIE TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO

Cel ćwiczenia: poznanie budowy, zasady działania i własności transformatora oraz zachodzących w nim zjawisk w stanie jałowym, przy próbie zwarcia i obciążeniu

2.1. Podstawy teoretyczne

2.1.1. Budowa i przeznaczenie transformatorów

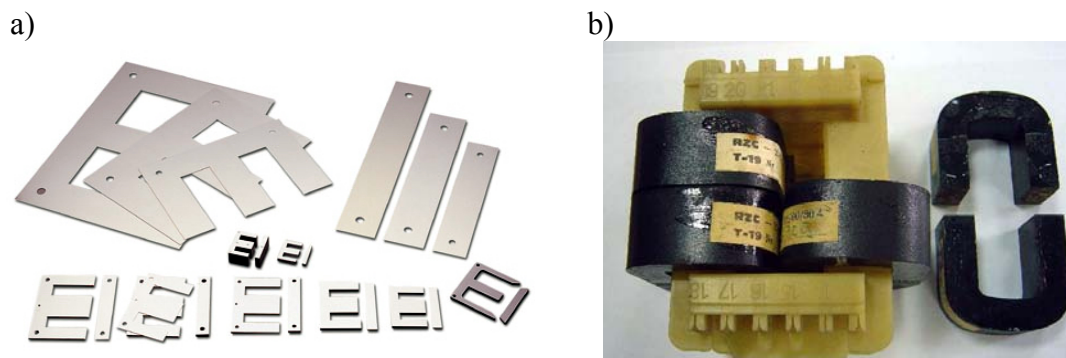
Transformator jest przetwornikiem elektromagnetycznym służącym do przenoszenia energii elektrycznej prądu przemiennego między obwodami elektrycznymi sprzężonymi ze sobą za pomocą pola magnetycznego. Transformator może zwiększać lub zmniejszać napięcie przemienne w zależności od potrzeb. Jego podstawową zaletą jest to, że oddziela on galwanicznie obwód pierwotny od wtórnego oraz nie przenosi na stronę wtórną składowej stałej napięcia. W praktyce wykorzystywane są najczęściej transformatory jednofazowe (zwykle małej mocy) i trójfazowe.

Transformatory trójfazowe dużych mocy stosowane są głównie w energetyce do transformacji napięcia przy przesyłaniu energii elektrycznej na odległość oraz w układach zasilających i przetwornicach energii elektrycznej. W celu zmniejszenia strat energii elektrycznej prądu przemiennego przy jej przesyłaniu na odległość, napięcie jest podwyższane za pomocą transformatorów i przesyłane linią energetyczną. Po przesłaniu napięcie wysokie jest obniżane do wymaganego przez odbiorniki. Podwyższenie napięcia przy zadanej mocy powoduje obniżenie wartości skutecznej prądu pobieranego z sieci, który decyduje o stratach przesyłanej energii.

Jednofazowe transformatory zwykle mniejszych mocy są wykorzystywane w różnego typu przetwornicach i zasilaczach przekształcających napięcie przemienne na napięcie stałe oraz w układach elektronicznych, technice pomiarowej i impulsowej.

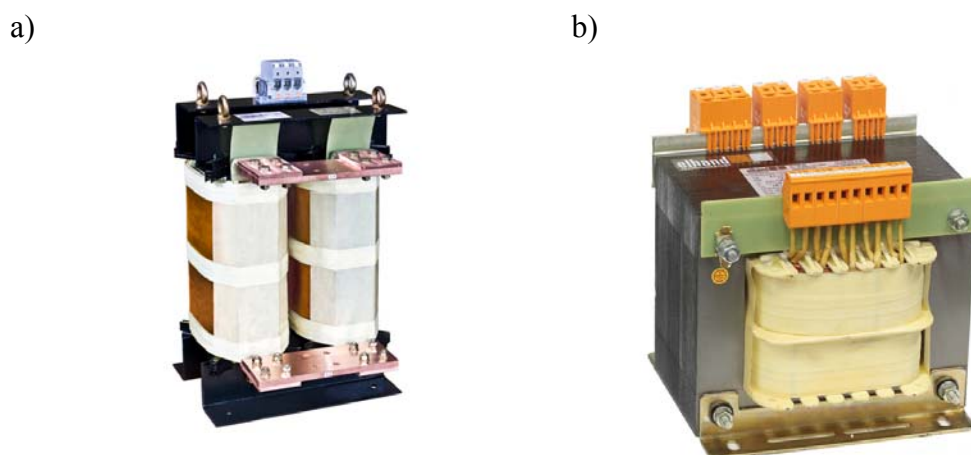
Transformator składa się z obwodu magnetycznego oraz obwodów elektrycznych. Obwód magnetyczny wykonuje się z materiału ferromagnetycznego o możliwie dużej przenikalności magnetycznej w celu ograniczenia strat napięcia magnetycznego. Obwody magnetyczne przetworników, w których występuje zmienne pole magnetyczne, wykonuje się z cienkich blach ze stali elektrotechnicznej w celu ograniczenia strat na prądy wirowe. Blachy te o odpowiednich kształtach przed spakowaniem są pokrywane cienką warstwą lakieru izolacyjnego. Przykładowe kształty blach typu E, U, i I, z których pakietuje się rdzenie

magnetyczne dla małych transformatorów przedstawia rys.2.1.a, a obwody z blach walcowanych na zimno typu zwijanego rys.2.1.b.



Rys.2.1. Przykładowy kształt blach dla małych transformatorów zwykłych a) i zwijanych z blach walcowanych na zimno b)

Na rdzeniu magnetycznym umieszczone są uzwojenia: jedno pobierające energię elektryczną ze źródła, zwane uzwojeniem pierwotnym i drugie uzwojenie wtórne przekazujące energię do odbiorników (uzwojeń wtórnych może być kilka). Uzwojenia nawinięte są na karkasach izolowanym drutem miedzianym, którego kształt i średnica jest zależna od typu transformatora i dopuszczalnego prądu. Między warstwami uzwojeń stosuje się dodatkowe przekładki izolacyjne. Technologia wykonywania transformatorów energetycznych oraz wysokonapięciowych jest bardziej skomplikowana i nie będzie przedmiotem rozważań.

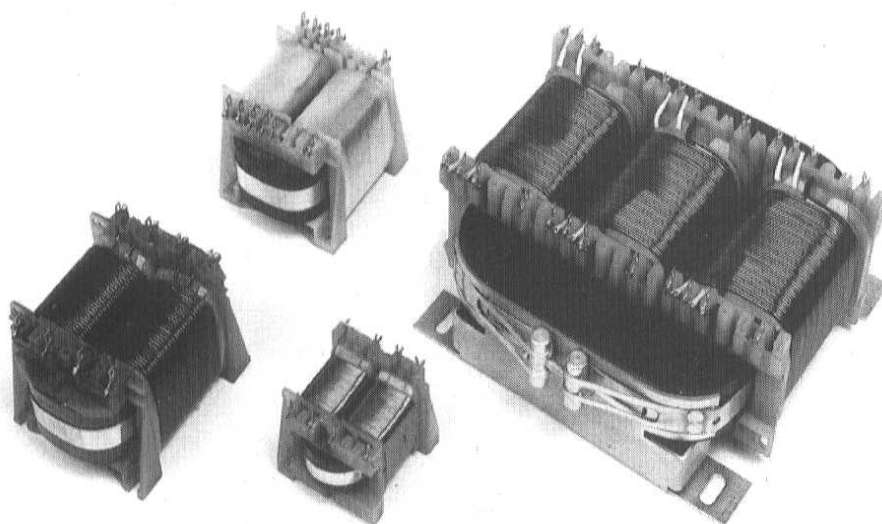


Rys.2.2 Widok transformatora małej mocy typu rdzeniowego a) i typu płaszczonego b)

Widok transformatora małej mocy typu rdzeniowego pokazano na rys.2.2a. Na obydwu kolumnach, o takim samym przekroju poprzecznym, umieszczone są karkasy z uzwojeniami.

Na rys.2.2b pokazano transformator typu płaszczonego. Karkasy z uzwojeniami w tym przypadku znajdują się na środkowej kolumnie, która ma dwa razy większy przekrój niż kolumny zewnętrzne otaczające jakby płaszczem uzwojenia. Różne przekroje kolumn zapewniają jednakową indukcję w obwodzie magnetycznym, gdyż strumień magnetyczny

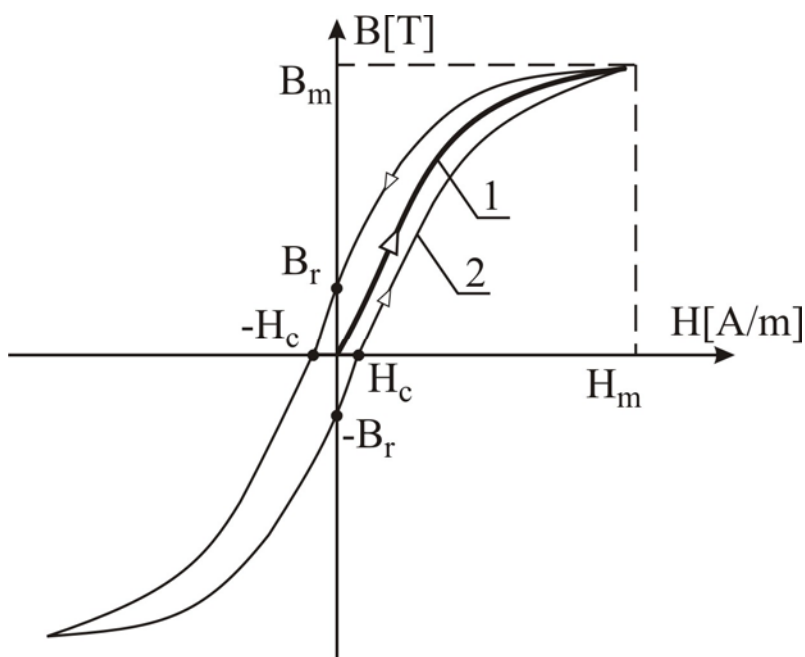
wytworzony w kolumnie środkowej rozdziela się na dwie drogi zamykając się przez kolumny zewnętrzne. Na rys.2.3 pokazane zostały widoki przykładowych transformatorów małej mocy z rdzeniami zwijanymi wykonanymi z blach prasowanych na zimno. Rdzenie te charakteryzują się nieco większą wartością indukcji nasycenia.



Rys.2.3. Widok transformatorów z rdzeniami zwijanymi

Obwody magnetyczne, ze względu na nieliniową charakterystykę magnesowania materiału ferromagnetycznego, są obwodami nieliniowymi. Wraz ze wzrostem przepływu magnesującego strumień magnetyczny przyrasta na początku prawie liniowo, a następnie jego przyrost jest coraz wolniejszy. Zjawisko to opisuje tak zwana krzywa magnesowania, to jest zależność indukcji magnetycznej B od natężenia pola magnetycznego H . Przykładowy przebieg pierwotnej charakterystyki magnesowania przedstawia krzywa 1 z rys. 2.4. Jak wynika z rys.2.4 pierwsze magnesowanie obwodu magnetycznego odbywa się po krzywej 1 (tzw. krzywej pierwotnego magnesowania). W tym przypadku wzrost natężenia pola (co odpowiada zwiększaniu przepływu uzwojenia pierwotnego w transformatorze) powoduje przyrost indukcji magnetycznej do wartości B_m (aż do nasycenia się obwodu magnetycznego). Zmniejszanie natężenia pola powoduje zmniejszanie się indukcji po nowej krzywej położonej nieco wyżej od krzywej pierwotnego magnesowania. Przy zerowym natężeniu pola indukcja magnetyczna osiąga wartość B_r i sprowadzenie jej do zera wymaga wytworzenia natężenia pola o przeciwnym zwrocie i wartości H_c . Przemagnesowywanie obwodu magnetycznego powoduje, że charakterystyka $B = f(H)$ utworzy pętlę histerezy (pętla 2 z rys.2.4). Pole powierzchni tej pętli zależy od właściwości magnetycznych obwodu i decyduje o wielkości strat energii potrzebnej na jego przemagnesowanie. Wynika z tego, że

im węższa pętla histerezy materiałów magnetycznie miękkich, tym mniejsze straty wynikające z przemagnesowania obwodu magnetycznego.

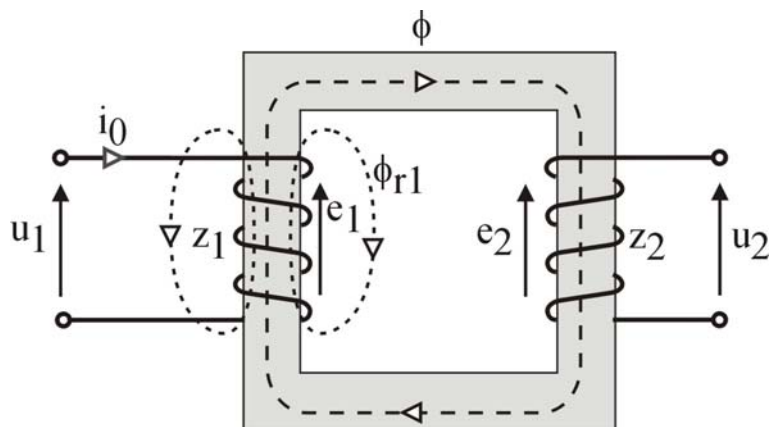


Rys.2.4. Przykładowy przebieg charakterystyki magnesowania (krzywa 1), pętli histerezy materiału ferromagnetycznego (pętla 2) i magnesu trwałego (pętla 3)

Ze względu na nieliniową zależność strumienia od przepływu do obliczania obwodów magnetycznych konieczna jest znajomość charakterystyki magnesowania blach, z których wykonany ma być obwód magnetyczny.

2.1.2. Stan jałowy transformatora

Transformator znajduje się w stanie jałowym wówczas, gdy prąd w uzwojeniu wtórnym jest równy zero. Schemat ideowy dwuuzwojeniowego transformatora w stanie jałowym przedstawia rys.2.5. Prąd jałowy i_0 w uzwojeniu pierwotnym wytworzy strumień magnetyczny, którego przeważająca część zamyka się w rdzeniu i sprzęga się ze wszystkimi zwojami obu uzwojeń. Tę część strumienia nazywamy strumieniem głównym ϕ . Stosunkowo niewielka część strumienia sprzężona jest tylko ze zwojami uzwojenia zasilanego i tę jego część nazywamy strumieniem rozproszenia ϕ_{r1} . W transformatorze z rdzeniem ferromagnetycznym strumień główny zamyka się w rdzeniu, tj. w obwodzie o dużej przewodności magnetycznej, a strumień rozproszenia zamyka się w powietrzu tj. w obwodzie o małej przewodności (praktycznie stałej) i niezależnej od stanu nasycenia rdzenia.



Rys. 2.5. Schemat idealny transformatora w stanie jałowym

Strumień magnetyczny główny sprzężony z uzwojeniami transformatora indukuje w nich siły elektromotoryczne, których wartości chwilowe są proporcjonalne do liczby zwojów z i szybkości zmian strumienia ϕ zgodnie z zależnością

$$e = -z \frac{d\phi}{dt} . \quad (2.1)$$

Dla napięcia zasilającego o przebiegu sinusoidalnym wyrażenie na prąd i_0 , a w pierwszym przybliżeniu na strumień magnetyczny może przyjąć postać

$$i_0 = I_{0m} \sin \omega t , \quad \phi = \phi_m \sin \omega t . \quad (2.2)$$

Korzystając z zależności (2.1) i (2.2) można wyznaczyć wyrażenia na wartości skuteczne napięć indukowanych w uzwojeniu pierwotnym i w uzwojeniu wtórnym transformatora, które po przekształceniach przyjmują postać:

$$E_1 = 4,44 f \phi z_1 , \quad E_2 = 4,44 f \phi z_2 \quad (2.3)$$

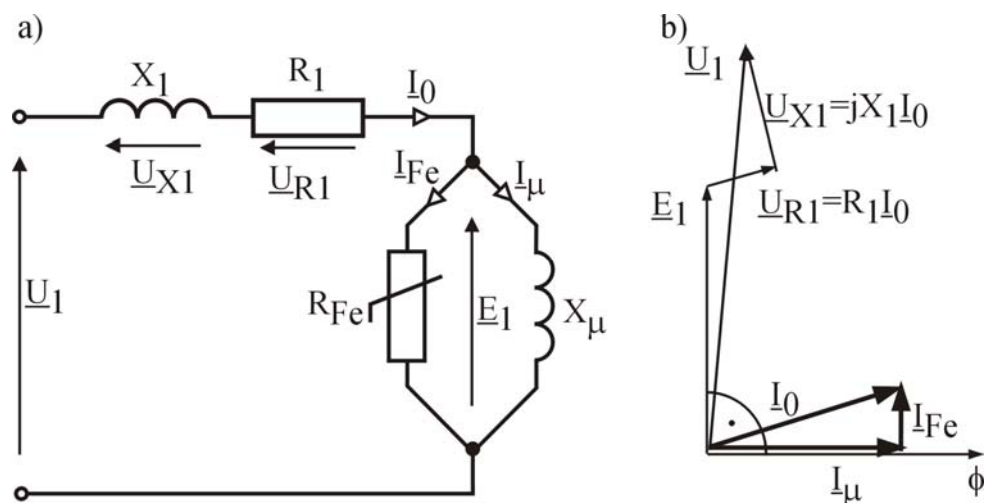
Ze wzorów (2.3) wynika, że przy stałej częstotliwości i praktycznie stałym strumieniu napięcia indukowane w uzwojeniach transformatora zależą tylko od liczby zwojów. Stosunek liczby zwojów uzwojenia wyższego napięcia do niższego napięcia nazywa się przekładnią zwojową transformatora. Dla transformatora obniżającego napięcie możemy zapisać

$$g = \frac{z_1}{z_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (2.4)$$

gdzie U_1 i U_2 są napięciami na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym transformatora w stanie jałowym.

Analizę pracy transformatora można przeprowadzać w oparciu o jego schemat zastępczy. Istota tej metody polega na poglądowym wyodrębnieniu elementów dominujących obwodu elektrycznego, które bądź w sposób bezpośredni bądź w sposób zastępczy

przedstawiają zjawiska, występujące w rzeczywistym transformatorze. Schemat zastępczy jest dokładny wówczas, gdy uwzględnia wszystkie zjawiska występujące przy pracy transformatora. Najczęściej jednak pomijamy cały szereg zjawisk niemających istotnego wpływu na pracę rozpatrywanego przetwornika. Powstają w ten sposób schematy zastępcze uproszczone. Zakres uproszczeń zależy oczywiście od wymaganej dokładności. Rzecz tylko w tym, aby właściwie ocenić, które spośród zjawisk mają znaczenie decydujące, a które w określonych warunkach mogą być pominięte.



Rys. 2.6. Schemat zastępczy transformatora w stanie jałowym a) i odpowiadający mu wykres wskazowy b)

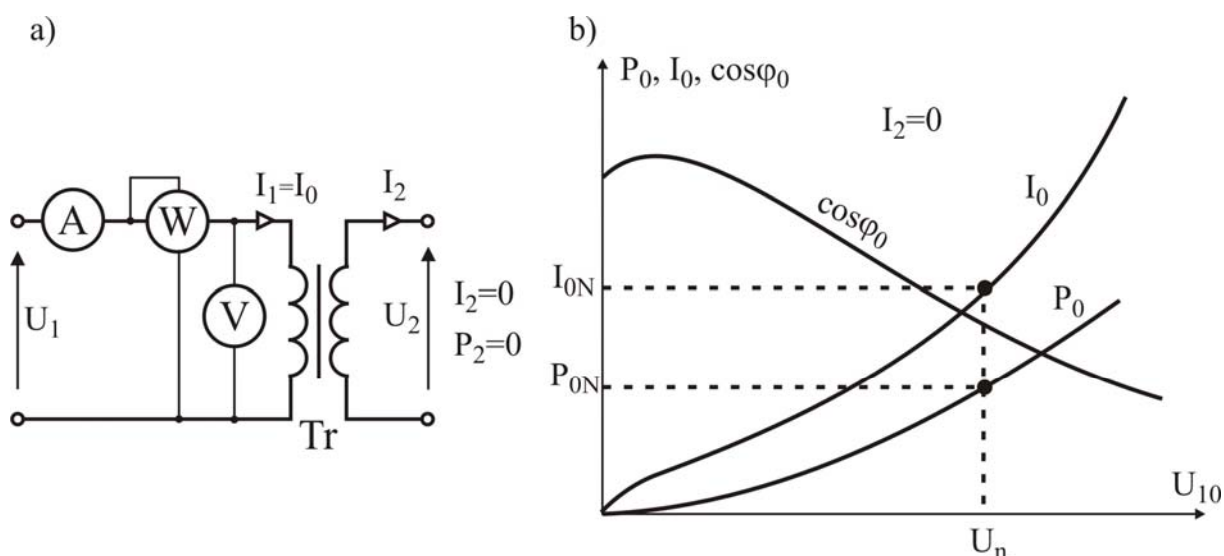
Uproszczony schemat zastępczy i wykres wektorowy transformatora w stanie jałowym przedstawia rys.2.6. W schemacie zastępczym uwzględniono reaktancję indukcyjną X_μ związaną ze strumieniem głównym ϕ , reaktancję X_1 związaną ze strumieniem rozproszenia ϕ_{r1} oraz rezystancję uzwojenia pierwotnego R_1 i rezystancję zastępczą R_{Fe} reprezentującą straty w obwodzie magnetycznym wynikające z histerezy i prądów wirowych. Rezystancja ta musi być tak dobrana i włączona do schematu, aby ciepło wydzielające się w niej wskutek przepływu prądu było równe ciepłu wydzielającemu się rzeczywiście w rdzeniu podczas pracy transformatora w stanie jałowym. Prąd I_{Fe} jest prądem czynnym, zaś prąd magnesujący I_μ jest prądem biernym.

Przy sporządzaniu schematu zastępczego pominięto straty w materiałach izolacyjnych powstające pod wpływem działania zmiennego pola elektrycznego oraz prądy pojemnościowe i prądy upływu występujące głównie pomiędzy zwojami uzwojenia. Zjawiska te należy uwzględniać w transformatorach budowanych na wysokie napięcia a także na wysokie częstotliwości.

Dla schematu zastępczego z rys. 2.6a, zgodnie z prawami Kirchhoffa możemy zapisać w postaci symbolicznej następujące zależności:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe} \quad \text{ i } \quad \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{U}_{X1} + \underline{U}_{R1} \quad (2.5)$$

Wykorzystując powyższe zależności oraz fakt, że spadki napięć na rezystancjach są w fazie z prądem, który je wywołał, a spadki napięć na reaktancjach indukcyjnych są przesunięte o $+\pi/2$ względem prądu, sporządzony został wykres wskazowy transformatora w stanie jałowym przedstawiony na rys.2.6b. Dla przejrzystości tego rysunku przyjęto na wykresie znacznie większe długości wskazów $\underline{U}_{X1}$ i $\underline{U}_{R1}$ od występujących w rzeczywistości.



Rys.2.7.Stan jałowy transformatora a)schemat układu pomiarowego, b) charakterystyki przy $f = \text{const}$.

Charakterystykami stanu jałowego transformatora nazywamy zależności: prądu I_0 , mocy pobranej P_0 i współczynnika mocy $\cos \varphi_0$ w stanie jałowym od napięcia przyłożonego do jednych zacisków transformatora przy drugich zaciskach otwartych ($I_2 = 0$) i stałej częstotliwości ($f = \text{const}$). Schemat układu pomiarowego transformatora w stanie jałowym pokazany jest na rys. 2.7a. Przykładowy przebieg charakterystyk I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$ przedstawiono na rys.2.7b. Współczynnik mocy $\cos \varphi_0$ wyznacza się z zależności

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}. \quad (2.6)$$

W stanie jałowym transformator nie jest obciążony i nie oddaje mocy do odbiorników, a więc moc pobrana jest tracona w transformatorze i prawie w całości zamienia się w ciepło.

Chcąc objaśnić gdzie tracona jest moc pobrana przez transformator w stanie jałowym, należy uświadomić sobie, z jakimi zjawiskami związane są te straty. W ogólnym przypadku

straty mocy w transformatorach są sumą strat mocy w obwodach elektrycznych i w obwodzie magnetycznym oraz strat dodatkowych (głównie w izolacji). Straty w izolacji są bardzo małe w stosunku do dwóch głównych grup strat i w dalszych rozważaniach zostaną pominięte.

Straty mocy w obwodach elektrycznych P_{cu} są związane z wydzielaniem się ciepła na rezystancji uzwojeń przez przepływający prąd i zależą od tej rezystancji i kwadratu prądu. Dla transformatora o dwóch uzwojeniach możemy zapisać

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2, \quad (2.7)$$

gdzie: R_1 i I_1 są odpowiednio rezystancją i wartością skuteczną prądu strony pierwotnej, a R_2 i I_2 rezystancją i wartością skuteczną prądu strony wtórnej transformatora.

Straty mocy w obwodzie magnetycznym P_{Fe} są sumą strat wywołaną prądami wirowymi P_{ow} oraz przemagnesowaniem obwodu magnetycznego P_{μ} . Moc ta zamienia się w ciepło powodując nagrzewanie rdzenia transformatora. Straty te można wyrazić przybliżonym wzorem

$$P_{Fe} = P_{\mu} + P_{ow} = c_{\mu} B^2 f + c_{ow} B^2 f^2, \quad (2.8)$$

gdzie: B jest indukcją magnetyczną, f częstotliwością napięcia zasilającego, a c_{μ} i c_{ow} stałymi materiałowymi.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że energia pobrana przez transformator w stanie jałowym zamienia się w ciepło głównie na skutek strat w rdzeniu oraz niewielkich strat w uzwojeniu pierwotnym i w izolacji. Prąd w stanie jałowym przy napięciu znamionowym wynosi zaledwie od 2 do 15 % prądu znamionowego. W związku z tym straty w uzwojeniu pierwotnym transformatora w stanie jałowym P_{Cu1} , jak również straty w izolacji, są znikomo małe w porównaniu ze stratami w rdzeniu i możemy je pominąć.

Moc pobrana przez transformator w stanie jałowym prawie w całości zamieniana jest na ciepło w rdzeniu i zależy od kwadratu indukcji magnetycznej (wzór (2.8)) a indukcja jest w przybliżeniu proporcjonalna do napięcia zasilającego. W związku z tym przebieg mocy pobranej przez transformator w stanie jałowym w funkcji napięcia przedstawiony na rys.2.6b jest parabolą wynikającą z przybliżonej zależności

$$P_0 \approx P_{Fe} \approx c U_{10}^2. \quad (2.9)$$

Dokładniejszego wyznaczenia strat w obwodzie magnetycznym możemy dokonać w oparciu o wzór

$$P_{Fe} = P_0 - I_0^2 R_1 - P_{iz} \quad (2.10)$$

przy czym należy znać rezystancję R_1 oraz oszacować niewielkie straty w izolacji P_{iz} .

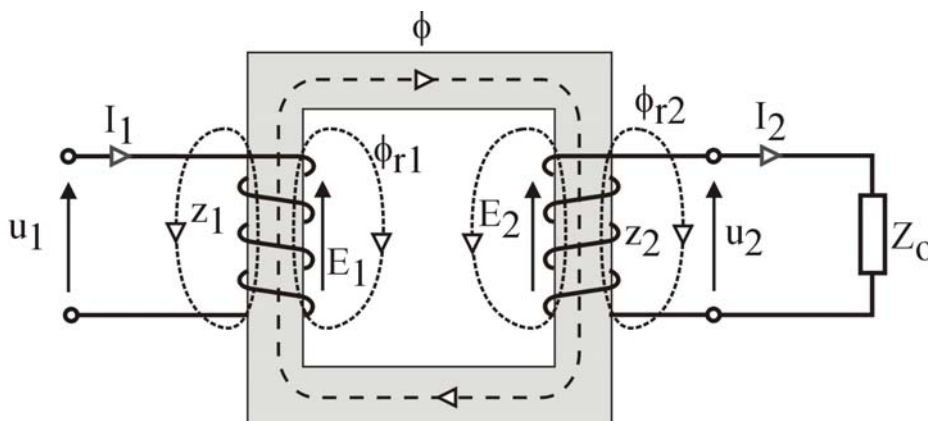
Charakterystyka $I_0 = f(U_{10})$ (rys.2.7b) ma przebieg zbliżony do krzywej przepływu magnesowania rdzenia w funkcji indukcji magnetycznej $\theta = f(B)$ dla blach, z których wykonany jest obwód magnetyczny, gdyż składowa magnesująca prądu stanu jałowego I_μ jest prawie równa prądowi jałowemu I_0 . Z przebiegu tej charakterystyki wynika, że przy wzroście napięcia ponad wartość znamionową szybko rośnie prąd jałowy i może osiągnąć wartość bliską prądowi znamionowemu. Praca transformatora przy obciążeniu byłaby wtedy niemożliwa.

O przebiegu krzywej współczynnika mocy $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0} = f(U_{10})$ decydują przebiegi prądu $I_0 = f(U_{10})$ i mocy pobranej $P_0 = f(U_{10})$. Współczynnik $\cos \varphi_0$ przy małych napięciach rośnie osiągając maksimum przy przegięciu krzywej magnesowania. Przy dalszym wzroście napięcia szybciej rośnie iloczyn $U_{10} I_0$ niż moc P_0 pobrana przez transformator (co uzasadniają charakterystyki przedstawione na rys.2.7b) i współczynnik mocy maleje.

Reasumując należy stwierdzić, że w celu przybliżonego określenia w strat w rdzeniu transformatora, wystarczy pomierzyć jego moc czynną pobraną w stanie jałowym.

2.1.3. Transformator w stanie obciążenia

Transformator pracuje w stanie obciążenia wówczas, gdy jedno uzwojenie jest zasilane ze źródła napięcia, a do zacisków drugiego przyłączony jest odbiornik. Schemat ideowy obciążonego transformatora przedstawia rys.2.8.



Rys.2.8. Schemat ideowy obciążonego transformatora

Bilans napięć dla obwodu pierwotnego i wtórnego przyjmuje postać:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad \text{ i } \quad u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt}, \quad (2.11)$$

gdzie: ψ_1, ψ_2 – strumienie skojarzone odpowiednio z uzwojeniem pierwotnym i wtórnym.

Biorąc pod uwagę fakt, że strumień rozproszenia zamyka się przez powietrze i jego zależność od prądu jest liniowa, możemy zapisać:

$$\psi_1 = z_1 \phi + z_{r1} \phi_{r1} = z_1 \phi + L_{r1} i_1 \quad \text{ oraz } \quad \psi_2 = z_2 \phi + z_{r2} \phi_{r2} = z_2 \phi + L_{r2} i_2, \quad (2.12)$$

gdzie: ϕ - strumień główny, ϕ_{r1}, ϕ_{r2} – strumienie rozproszenia, L_{r1}, L_{r2} – indukcyjności rozproszenia uzwojeń, i_1, i_2 – prądy w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym.

Po uwzględnieniu powyższych zależności, wzory na bilans napięć w obciążonym transformatorze przyjmują postać:

$$u_1 = R_1 i_1 + z_1 \frac{d\phi}{dt} + L_{r1} \frac{di_1}{dt} \quad \text{ i } \quad z_2 \frac{d\phi}{dt} = u_2 + R_2 i_2 + L_{r2} \frac{di_2}{dt}. \quad (2.13)$$

Przyłączenie odbiornika o impedancji Z_0 do uzwojenia wtórnego transformatora powoduje w nim przepływ prądu, który wytwarza własny strumień magnetyczny. Strumień ten zamyka się - podobnie jak strumień pierwotny - również w rdzeniu i jest do niego przeciwnie skierowany. Jest to stan nieustalony, w którym wypadkowy strumień chwilowo obniża się i zmniejsza wartość napięć indukowanych zgodnie ze wzorem (2.3). Powoduje to wzrost prądu pierwotnego, którego wartość zależy od różnicy napięć zasilającego i indukowanego w uzwojeniu pierwotnym, podzielonej przez impedancję obwodu pierwotnego. Wzrost prądu pierwotnego powoduje wytworzenie strumienia kompensującego strumień wytworzony prądem wtórnym, utrzymując strumień główny na praktycznie stałym poziomie. W efekcie końcowym każda zmiana prądu wtórnego pociąga za sobą natychmiastową zmianę prądu pierwotnego.

W celu sporządzenia schematu zastępczego obciążonego transformatora parametry strony wtórnej sprowadza się na stronę pierwotną (lub odwrotnie) zakładając, że przekładnia jest idealna i wynosi 9:1 (rys. 2.9). Jest to jednoznaczne z przyjęciem transformatora równoważnego spełniającego warunki:

- $E'_2 = E_1$ – napięcie wtórne sprowadzone na stronę pierwotną jest równe napięciu E_1 ,
co odpowiada zastępczej liczbie zwojów $z'_2 = z_1$;

- $S'_2 = S_2$ i $P'_2 = P_2$ – moc pozorna i czynna zastępczego obwodu wtórnego powinna być równa mocy rzeczywistego obwodu wtórnego;
- $I'_2 z'_2 = I_2 z_2$ – przepływ zastępczego uzwojenia wtórnego powinien być równy przepływowi rzeczywistego uzwojenia wtórnego.

Korzystając z definicji przekładni $\vartheta = \frac{E_1}{E_2}$, napięcie indukowane wtórne sprowadzone na stronę pierwotną wyniesie

$$E'_2 = E_1 = \vartheta E_2. \quad (2.14)$$

Prąd wtórny sprowadzony na stronę pierwotną określa zależność

$$I'_2 = \frac{I_2}{\vartheta} \quad (2.15)$$

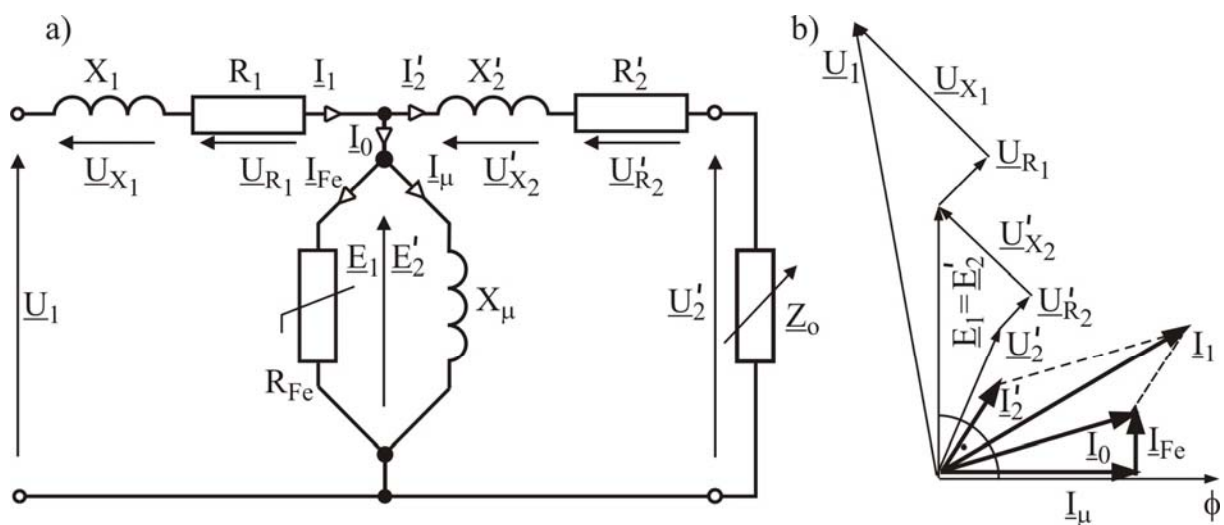
wynikająca z równości przepływów uzwojenia wtórnego rzeczywistego i zastępczego. Sprowadzanie rezystancji i reaktancji opiera się na założeniu równości mocy czynnej i biernej w uzwojeniu wtórnym, a mianowicie:

$$P'_{2Cu} = R'_2 I'^2_2 = P_{2Cu} = R_2 I^2_2, \text{ stąd } R'_2 = R_2 \vartheta^2 \quad (2.16)$$

oraz analogicznie

$$X'_2 = X_2 \vartheta^2. \quad (2.17)$$

Schemat zastępczy rzeczywistego transformatora otrzymano przez uzupełnienie schematu zastępczego transformatora w stanie jałowym elementami charakteryzującymi parametry obwodu wtórnego sprowadzone na stronę pierwotną.



Rys. 2.9. Transformator w stanie obciążenia: a) schemat zastępczy, b) wykres wskazowy

Schemat zastępczy i wykres wskazowy transformatora w stanie obciążenia przedstawia rys. 2.9. Na schemacie rezystancje R_1 i R_2' charakteryzują straty w uzwojeniach, rezystancja R_{Fe} straty w rdzeniu, natomiast pobór mocy biernej związany jest z wytworzeniem strumienia głównego (reaktancja X_μ) i strumieni rozproszenia (reaktancje X_1 i X_2').

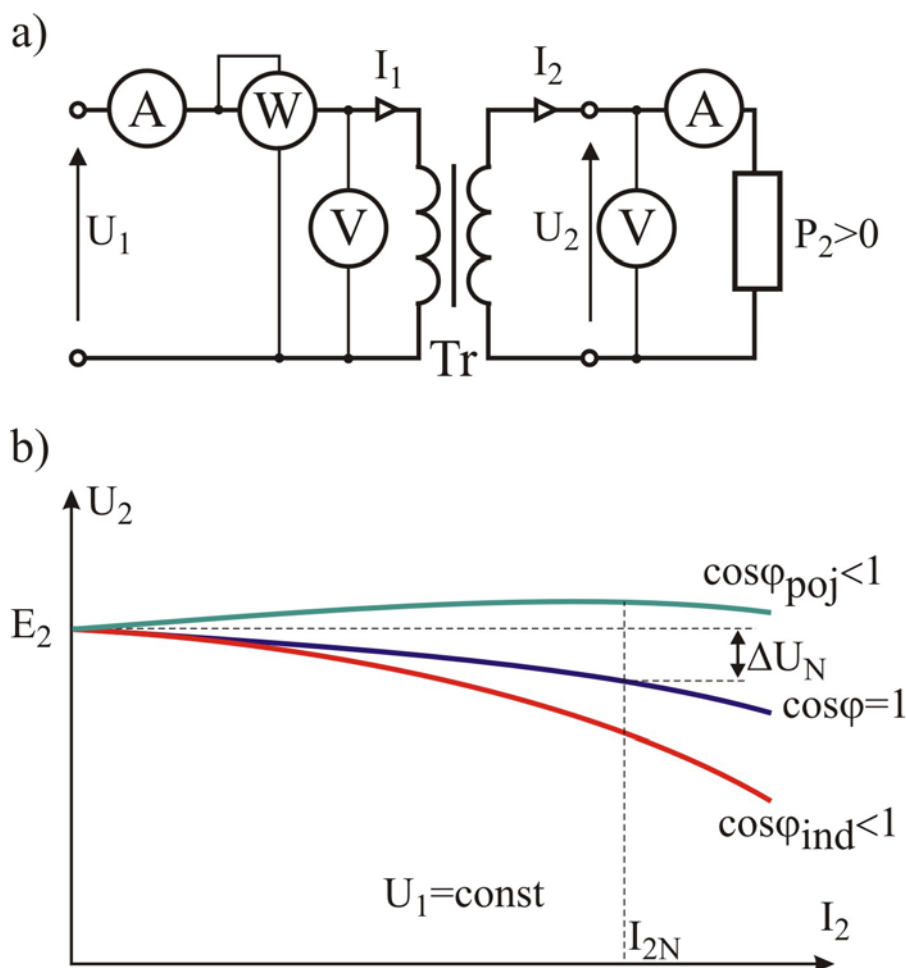
W oparciu o schemat zastępczy przedstawiony na rys. 2.9a oraz równania dotyczące bilansu napięć zapisanych w postaci symbolicznej

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{r1} + \underline{U}_{X1} + \underline{E}_1 \text{ oraz } \underline{E}_1 = \underline{E}_2' = \underline{U}_{R2}' + \underline{U}_{X2}' + \underline{U}_2' \quad (2.18)$$

i prądów

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2' \quad (2.19)$$

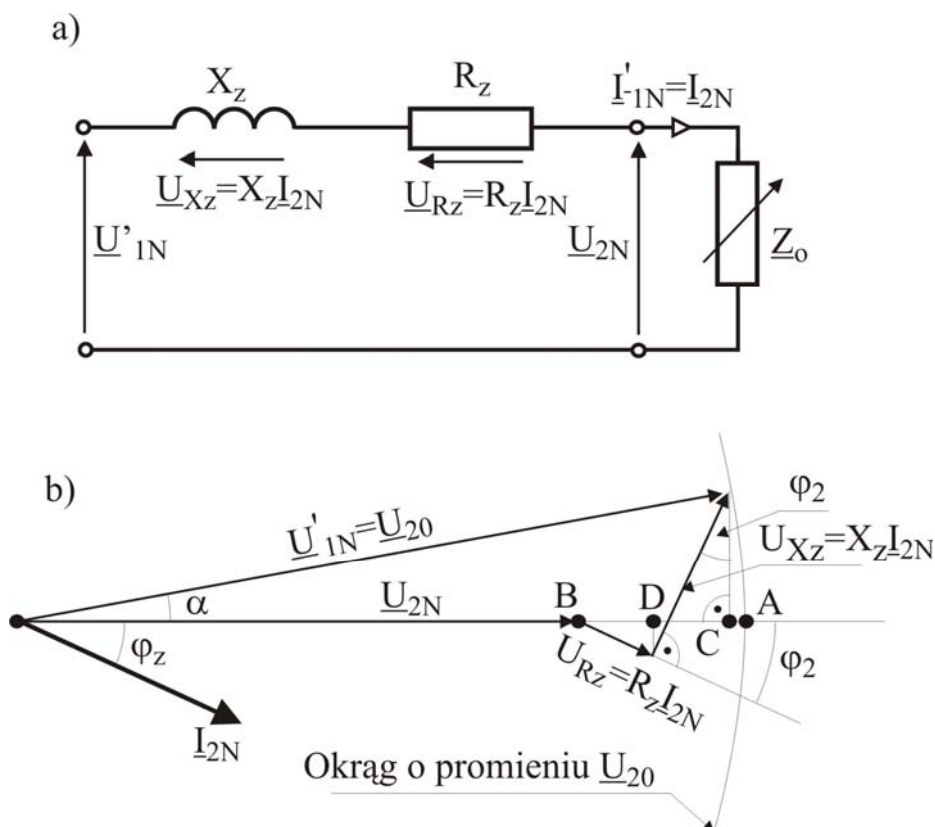
można wykreślić wykres wskazowy dla obciążonego transformatora przedstawiony na rys. 2.9b.



Rys.2.10. Transformator w stanie obciążenia: a) schemat układu pomiarowego, b) przykładowy przebieg charakterystyk zewnętrznych

Z eksploatacyjnego punktu widzenia najistotniejszymi charakterystykami transformatora przy jego normalnej pracy są zależności napięcia wyjściowego U_2 i sprawności η w funkcji prądu obciążenia I_2 , przy stałej wartości napięcia zasilającego U_1 oraz stałym $\cos\varphi_2$ (gdzie φ_2 jest kątem przesunięcia fazowego między napięciem i prądem w uzwojeniu wtórnym transformatora). Schemat układu pomiarowego transformatora przy obciążeniu pokazany jest na rys.2.10a, a przykładowy przebieg charakterystyk zewnętrznych $U_2 = f(I_2)$ i $\eta = f(I_2)$ przy powyższych założeniach na rys.2.10b.

Zmienność napięcia wtórnego zależy nie tylko od wartości prądu obciążenia, ale i od jego charakteru czyli od współczynnika mocy $\cos\varphi_2$. Zmienność tego napięcia może być w przybliżeniu wyznaczona w oparciu o uproszczony schemat zastępczy obciążonego transformatora (rys.2.11a) i odpowiadający mu wykres wskazowy (rys.2.11b).



Rys.2.11. Uproszczony schemat zastępczy obciążonego transformatora a) i wykres wskazowy do wyznaczania zmienności napięcia b)

Schemat zastępczy został sporządzony z pominięciem prądu jałowego I_0 . W schemacie tym rezystancja i reaktancja zastępcza są równe sumie rezystancji i reaktancji uzwojenia wtórnego i sprowadzonych do strony wtórnej rezystancji i reaktancji uzwojenia pierwotnego zgodnie z zależnością

$$R_z = R_2 + R_1' \quad i \quad X_z = X_2 + X_1' \quad (2.20)$$

gdzie: $R_1' = R_1 g^2$ a $X_1' = X_1 g^2$.

Z rys.2.11a wynika, że napięcie pierwotne sprowadzone na stronę wtórną jest równe sumie napięcia po stronie wtórnej transformatora i spadku napięć na rezystancji i reaktancji zastępczej, co w postaci symbolicznej dla warunków znamionowych może być zapisane

$$\underline{U}_{1N}' = \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{R_z} + \underline{U}_{X_z}. \quad (2.21)$$

W oparciu o wyrażenie (2.21) sporządzony został uproszczony wykres wskazowy przedstawiony na rys.2.11b (z uwzględnieniem kąta przesunięcia fazowego między napięciem i prądem po stronie wtórnej transformatora). Z wykresu wskazowego wynika, że wartość skuteczna zmienności napięcia wyjściowego ΔU_N jest równa odcinkowi AB , a przy małych kątach α w przybliżeniu odcinkowi BC a mianowicie

$$\Delta U_N = U_{20} - U_{2N} = AB \approx BC.$$

Odcinek AB równy w przybliżeniu odcinkowi BC jest sumą długości odcinków BD i DC . Długości odcinków BD i DC możemy wyrazić

$$BD = R_z I_{2N} \cos \varphi_2 = U_R \cos \varphi_2 \quad i \quad DC = X_z I_{2N} \sin \varphi_2 = U_X \sin \varphi_2$$

stąd zmienność napięcia wyjściowego może być wyrażona przybliżonym wzorem

$$\Delta U_N = R_z I_{2N} \cos \varphi_2 + X_z I_{2N} \sin \varphi_2. \quad (2.22)$$

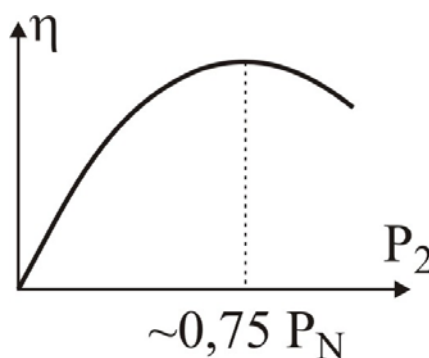
Przy obciążeniu czynnym prąd wtórny jest w fazie z napięciem ($\cos \varphi_2 = 1$) i ze wzrostem prądu I_2 maleje napięcie wyjściowe transformatora (rys.2.10b) wywołane spadkiem napięcia na rezystancji wypadkowej uzwojeń pierwotnego i wtórnego ($\Delta U_N = R_z I_{2N}$ - ze wzoru (2.22)).

W przypadku obciążenia o charakterze indukcyjnym napięcie jest mniejsze niż przy tym samym prądzie obciążenia czynnego ze względu na rozsmagnesowujące działanie składowej biernej prądu. Jak wynika ze wzoru (2.22) zmniejszanie się napięcia wyjściowego może być wyznaczone jako suma spadków napięć na rezystancji oraz reaktancji zastępczej transformatora i zależy od kąta przesunięcia fazowego między prądem i napięciem w uzwojeniu wtórnym.

Przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym może wystąpić zwiększenie napięcia wtórnego ze wzrostem prądu obciążenia w stosunku do obciążenia czynnego, gdyż składowa bierna prądu domagnesowuje obwód magnetyczny. Prąd w tym przypadku wyprzedza napięcie (φ_2 jest ujemne) i spadek napięcia wyjściowego przyjmie wartość ujemną, gdy

$X_Z I_{2N} \sin \varphi_2$ co do wartości bezwzględnej będzie większe od $R_Z I_{2N} \cos \varphi_2$, czyli różnica napięć $\Delta U_N = U_{20} - U_{2N}$ będzie mniejsza od zera co oznacza, że napięcie wyjściowe będzie większe od napięcia w stanie jałowym. Reasumując należy stwierdzić, że przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym i odpowiednim kącie przesunięcia fazowego φ_2 napięcie wyjściowe może przy tym samym prądzie obciążenia osiągać wartości większe od wartości napięć w stanie jałowym (rys.2.10b).

Sprawnością η każdego przetwornika a więc i omawianego transformatora nazywamy stosunek mocy wyjściowej P_2 do mocy wejściowej P_1 tj. $\eta = \frac{P_2}{P_1}$. Przykładowy przebieg sprawności η w funkcji mocy P_2 przedstawia rys.2.12.



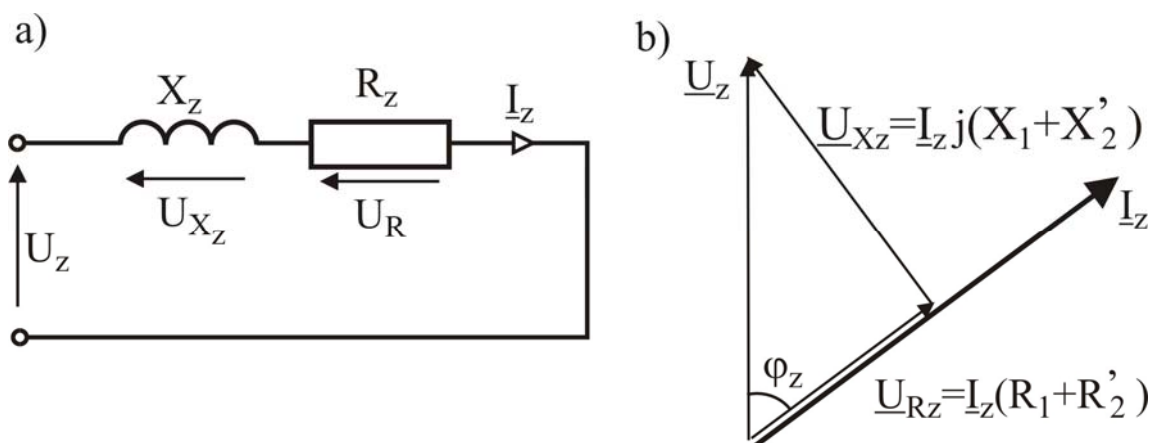
Rys.2.12. Przykładowy przebieg sprawności transformatora w funkcji mocy pobranej

W stanie jałowym ($P_2 = 0$) sprawność jest równa zero, a następnie rośnie ze wzrostem mocy oddawanej przez transformator. Ze wzrostem obciążenia transformatora, a więc i mocy P_2 rosną szybko straty w uzwojeniach (z kwadratem prądu) przy prawie niezmiennych stratach w obwodzie magnetycznym i stratach dodatkowych. Przy zrównaniu się strat w „miedzi” i strat w „żelazie” funkcja $\eta = f(P_2)$ osiąga maksimum, a przy dalszym obciążaniu transformatora zaczyna maleć. Największą sprawność mają transformatory zwykle przy obciążeniu (70 – 80)% mocy znamionowej P_N .

2.1.4. Zwarcie transformatora

Zwarcie transformatora jest stanem awaryjnym, polegającym na zwarcu uzwojenia wtórnego, przy którym prądy pierwotny i wtórny są ograniczone tylko impedancjami uzwojeń i przy znamionowym napięciu są wielokrotnie większe od prądów znamionowych. Tak duże prądy powodują szybkie nagrzewanie się uzwojeń oraz powstanie dużych sił działających na

przewody z prądem umieszczone w polu magnetycznym, które mogą uszkodzić mechanicznie uzwojenia (głównie w transformatorach dużych mocy). Przekroczenie temperatury dopuszczalnej dla izolacji uzwojeń powoduje jej zniszczenie i zwarcia międzyzwojowe, nieodwracalnie uszkadzające transformator. Przed zwarciami eksploatacyjnymi transformatory są chronione przez odpowiednie układy zabezpieczające.



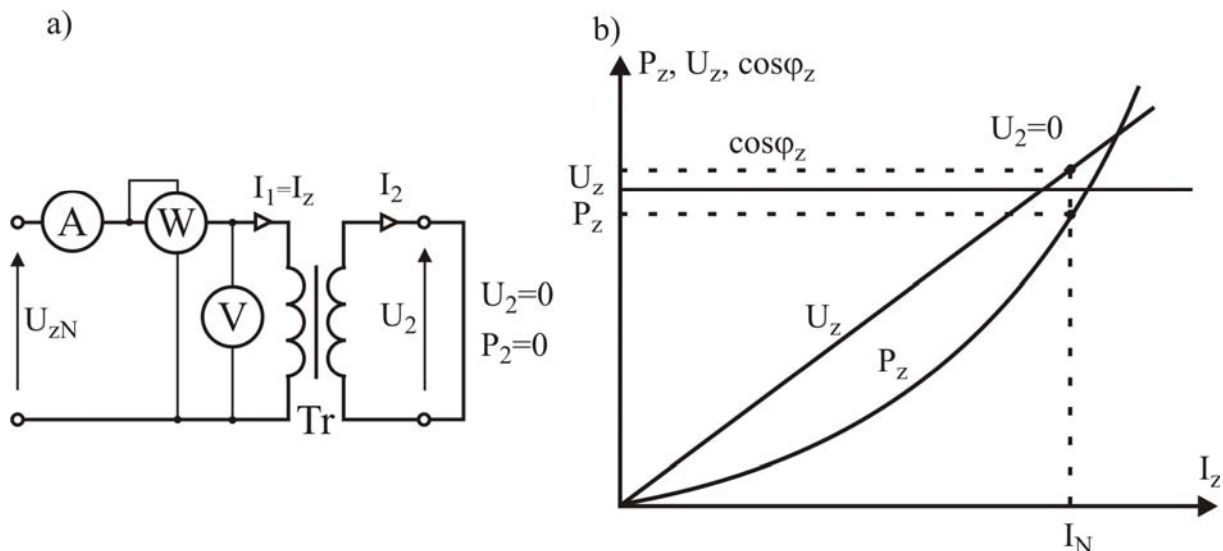
Rys .2.13. Zwarcie transformatora: a) uproszczony schemat zastępczy, b) wykres wskazowy

Uproszczony schemat zastępczy (przy pominięciu prądu stanu jałowego, tzn. $I_0 = 0$) dla transformatora w stanie zwarcia przedstawia rys. 2.13a oraz odpowiadający mu wykres wskazowy rys. 2.13b. Pominięcie prądu stanu jałowego I_0 (stanowi on zaledwie kilka procent prądu znamionowego) jest jednoznaczne z eliminacją gałęzi równoległej w schemacie zastępczym transformatora. Na uproszczonym schemacie zastępczym reaktancja i rezystancja zwarcia są sumą reaktancji i rezystancji uzwojenia pierwotnego i uzwojenia wtórnego sprowadzonych na stronę pierwotną, a mianowicie

$$R_Z = R_1 + R'_2 \text{ i } X_Z = X_1 + X'_2. \quad (2.23)$$

W celach pomiarowych przeprowadza się natomiast tzw. próbę zwarcia. Próbę wykonuje się przy takim napięciu zasilającym jedno z uzwojeń i przy zwartym drugim, aby w uzwojeniach transformatora wystąpił prąd o wartościach znamionowych. Napięcie to, zwane napięciem zwarcia, jest bardzo małe i stanowi zwykle zaledwie od kilku do kilkunastu procent napięcia znamionowego.

Charakterystykami zwarcia nazywamy zależności: mocy P_z , napięcia zasilającego U_z oraz współczynnika mocy $\cos \varphi_z$ od prądu pobranego z sieci I_z przy zwartym uzwojeniu wyjściowym ($U_2 = 0$). Schemat układu pomiarowego transformatora przy próbie zwarcia pokazany jest na rys.2.14a, a przykładowy przebieg charakterystyk na rys.2.14b.



Rys.2.14. Zwarcie transformatora: a) schemat układu pomiarowego, b) charakterystyki $P_z, U_z, \cos \varphi_z$ w

funkcji I_z

Moc P_z pobrana przez transformator w stanie zwarcia równa jest sumie strat mocy w uzwojeniach P_{Cu} , rdzeniu P_{Fe} i izolacji P_{iz}

$$P_z = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{iz} \quad (2.24)$$

Jak wykazano w punkcie 2.1.3 straty w rdzeniu zależą w przybliżeniu od kwadratu napięcia, zaś przy próbie zwarcia napięcie jest małe. Straty te możemy więc pominąć, podobnie jak i straty w izolacji. W przybliżeniu możemy przyjąć, że moc pobrana w tych warunkach przez transformator jest tracona w jego uzwojeniach (pierwotnym i wtórnym). Ponieważ straty mocy w uzwojeniach zależą od kwadratu prądu (wzór 2.7), to przebieg $P_z \approx P_{Cu} = f(I_z)$ jest parabolą.

Zależność $\cos \varphi_z = f(I_z)$ jest prostą równoległą do osi odciętych. Ze wzoru określającego współczynnik mocy $\cos \varphi_z = \frac{R_z}{Z_z} = \frac{R_z}{\sqrt{R_z^2 + X_z^2}}$ wynika, że o jego stałości decyduje niezmiennosc rezystancji zastępczej R_z i reaktancji indukcyjnej transformatora X_z określonych wzorem (2.23).

Zależność $U_z = f(I_z)$ jest prostą wychodzącą z początku układu współrzędnych, gdyż napięcie zasilania jest iloczynem prądu zwarcia i impedancji zastępczej transformatora, która jest praktycznie stała.

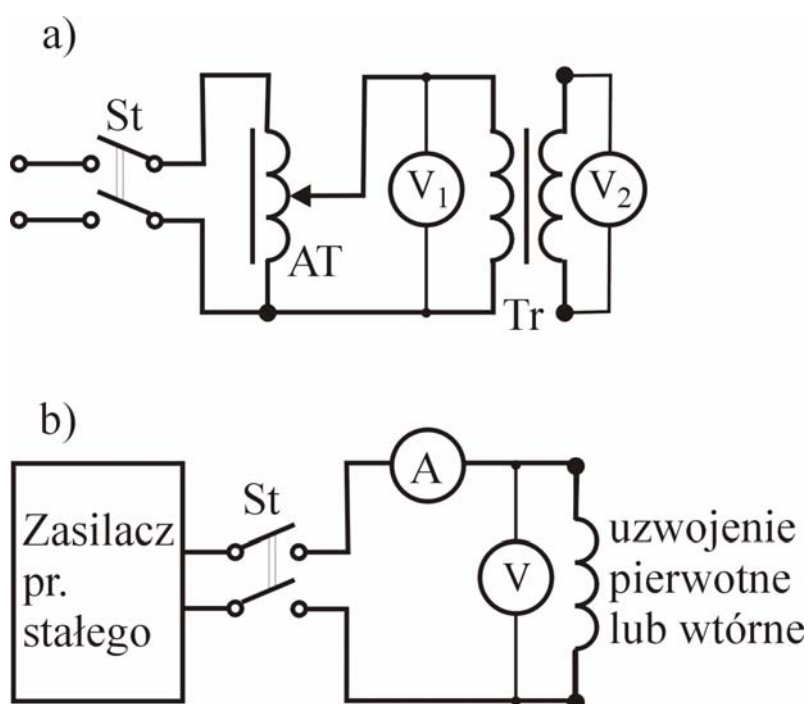
2.2. Badania laboratoryjne

2.2.1. Pomiar przekładni napięciowej oraz rezystancji uzwojeń

Przekładnią napięciową transformatora nazywamy stosunek napięć występujących na jego zaciskach w stanie jałowym. Dla transformatora zwiększającego napięcie przekładnie możemy wyznaczyć z zależności

$$g = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{z_2}{z_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.25)$$

Pomijając spadek napięcia wywołany prądem jałowym, stosunek napięć jest równy stosunkowi liczby zwojów uzwojenia wyższego napięcia z_2 do liczby zwojów uzwojenia niższego napięcia z_1 i równy stosunkowi odpowiednich napięć indukowanych. Przekładnię transformatora wyznacza się z pomiaru napięć w stanie jałowym. Schemat połączeń układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 2.15a.



Rys.2.15. Schemat układu do wyznaczania przekładni napięciowej a) i pomiaru rezystancji uzwojeń b)

Po zamknięciu stycznego St zwiększa się napięcie za pomocą transformatora AT, odczytując wskazania woltomierzy V_1 i V_2 dla kilku wartości przyłączonego napięcia. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 1.

Rezystancję uzwojeń (pierwotnego i wtórnego) transformatora mierzymy metodą techniczną tj. przez pomiar prądu i napięcia przy zasilaniu uzwojeń transformatora ze źródła napięcia stałego. Dla kilku napięć odczytujemy wartości prądu i obliczamy rezystancję

uzwojenia(z prawa Ohma) jako wartość średnią z wykonanych pomiarów. Otrzymane wyniki notujemy w tabeli 1.

Tabela 1

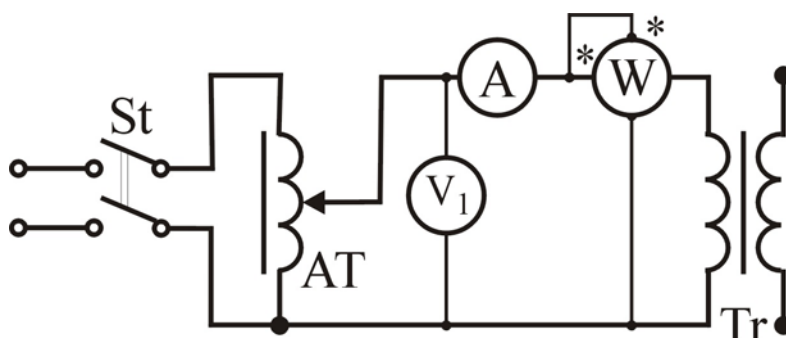
Pomiar przekładni			Pomiar rezystancji uzwojeń						
Lp	U_1	U_2	$\mathcal{G}$	U_1	I_1	R_1	U_2	I_2	R_2
	[V]	[V]	-	[V]	[A]	[Ω]	[V]	[A]	[Ω]
1									
2									
3									
....									
	$\mathcal{G}_{\text{sr}} =$			$R_{1\text{sr}} =$			$R_{2\text{sr}} =$		

Dla pomiarów napięć otrzymanych przy zasilaniu jednego z uzwojeń transformatora prądem przemiennym obliczamy przekładnię z zależności $\mathcal{G} = \frac{U_2}{U_1}$ (gdzie U_2 jest napięciem wyższym) i obliczamy wartość średnią przekładni transformatora (jako średnią arytmetyczną ze wszystkich pomiarów).

Rezystancje uzwojeń obliczamy jako stosunek napięcia do prądu przy zasilaniu uzwojeń ze źródła napięcia stałego. Średnie wartości rezystancji uzwojeń wyznaczamy w sposób analogiczny jak wartość średnią przekładni.

2.2.2. Pomiar charakterystyk w stanie jałowym

Charakterystykami stanu jałowego transformatora nazywamy zależność prądu w stanie jałowym I_{10} , mocy pobranej P_{10} i współczynnika mocy $\cos \varphi_0$ od napięcia przyłożonego do jednych zacisków przy drugich zaciskach otwartych ($I_2 = 0$) i przy stałej częstotliwości napięcia zasilającego ($f = \text{const}$).



Rys.2.16. Schemat układu do pomiaru charakterystyk stanu jałowego

W celu wyznaczenia tych charakterystyk układ pomiarowy łączymy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.2.16. W układzie pomiarowym może być wykorzystany woltomierz, amperomierz i watomierz jako oddzielne przyrządy wskazówkowe lub zintegrowany przyrząd elektroniczny.

Przed załączeniem napięcia stycznikiem St autotransformator ustawiamy w położeniu minimalnego napięcia. Zwiększając napięcie zasilające od około (0,2 do 1,2) U_N odczytujemy wskazania przyrządów pomiarowych i wyniki notujemy w tabeli 2.

Tabela 2

$f = \text{const}, I_2 = 0$						
Lp.	U_{10}	I_{10}	P_{10}	$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10}I_{10}}$	P_{cu1}	$P_{Fe} = P_{10} - P_{cu1}$
	[V]	[A]	[W]	-	[W]	[W]
	Wyniki pomiarów			Wyniki obliczeń		
1.						
2.						
3.						
...						

W oparciu o otrzymane wyniki należy obliczyć $\cos \varphi_0$ oraz straty mocy na rezystancji uzwojenia pierwotnego $P_{Cu1} = R_1 I_{10}^2$ oraz przybliżone straty w obwodzie magnetycznym zgodnie z zależnością (2.10) przy pominięciu strat w izolacji.

Na podstawie uzyskanych wyników należy wykreślić P_{10} , I_{10} , $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$ przy $I_2 = 0$ i $f = \text{const}$ w jednym układzie współrzędnych. Przy analizie wyników zwrócić uwagę na wartości mocy traconej w uzwojeniu pierwotnym transformatora P_{cu1} w stosunku do mocy pobranej w stanie jałowym P_{10} . Jak już wykazano moc pobrana przez transformator w stanie jałowym jest spowodowana stratami głównie w obwodzie magnetycznym. Dokładniejsze obliczenia strat mocy w obwodzie magnetycznym otrzymamy po odjęciu od mocy pobranej przez transformator w stanie jałowym strat mocy w uzwojeniu zasilanym i oszacowane straty w izolacji (wzór 2.10).

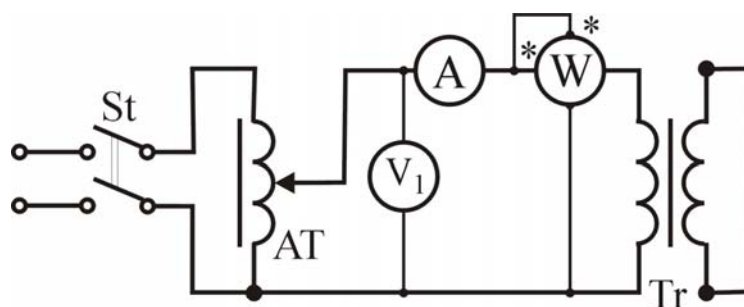
Przykładowe przebiegi charakterystyk w stanie jałowym pokazano na rys. 2.7b a uzasadnienie tych przebiegów w punkcie 2.1.2.

2.2.3. Pomiar charakterystyk przy próbie zwarcia

Próbie zwarcia wykonuje się do takiego napięcia zasilającego jedno z uzwojeń przy zwartym drugim uzwojeniu, aby w uzwojeniach transformatora wystąpił prąd o wartościach znamionowych. Napięcie to, zwane napięciem zwarcia, jest bardzo małe i stanowi zwykle zaledwie od kilku do kilkunastu procent napięcia znamionowego.

Pomiar mocy pobranej przez transformator przy próbie zwarcia pozwala w przybliżeniu określić straty w jego uzwojeniach. Charakterystykami zwarcia nazywamy zależność: mocy P_z , napięcia zasilającego U_z oraz współczynnika mocy $\cos \varphi_z$ od prądu pobranego z sieci I_z przy zwartym uzwojeniu wtórnym ($U_2 = 0$). Jako uzwojenie pierwotne należy przyjąć uzwojenie wyższego napięcia w celu zwiększenia dokładności pomiarów.

Przed pomiarem charakterystyk zwarcia łączymy układ zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 2.17.



Rys.2.17. Schemat układu do wyznaczania charakterystyk stanu zwarcia

Przed załączeniem napięcia stycznikiem St autotransformator AT ustawiamy w położeniu minimalnego napięcia. Po zamknięciu stycznika autotransformatorem zwiększamy napięcie zasilające tak, aby prąd zmieniał się w przedziale od około (0,2 do 1,2) I_N . Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 3.

Tabela 3

Lp.	U_z	I_z	P_z	$\cos \varphi_z = \frac{P_z}{U_z I_z}$
	[V]	[A]	[W]	[-]
1.				
2.				
3.				
...				

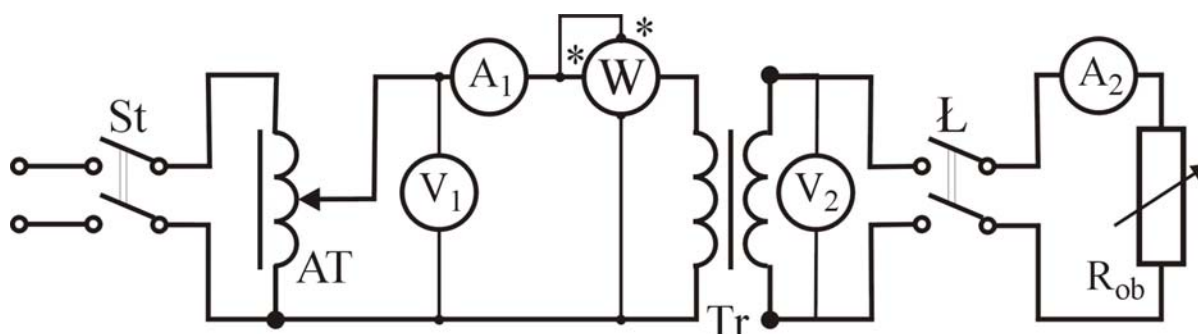
Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń należy wykreślić w jednym układzie współrzędnych zależności: P_z , U_z , $\cos \varphi_z = f(I_z)$ przy $U_2 = 0$. Dla największego napięcia

U_z odczytać z charakterystyki $P_{Fe} = f(U_{10})$ stanu jałowego moc strat w obwodzie magnetycznym dla tego napięcia i określić ich udział w stratach przy próbie zwarcia jako stosunek $\frac{P_{Fe}}{P_z}$. Przykładowe przebiegi charakterystyk przy próbie zwarcia pokazano na rys.

2.14b, a uzasadnienie tych przebiegów w punkcie 2.1.4.

2.2.4. Pomiar charakterystyki zewnętrznej

Charakterystyką zewnętrzną transformatora nazywamy zależności napięcia wyjściowego U_2 i sprawności η w funkcji prądu obciążenia I_2 przy stałej wartości napięcia zasilającego U_{1N} oraz stałym $\cos\varphi_2$. Pomiary wykonujemy w układzie pomiarowym połączonym zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2.18.



Rys.2.18. Schemat układu do wyznaczania charakterystyki zewnętrznej

Pomiaru charakterystyki zewnętrznej transformatora dokonuje się przy obciążeniu czynnym ($\cos\varphi_2 = 1$), gdyż odbiornikami są rezystory suwakowe. Uzwojeniem pierwotnym jest uzwojenie dolnego napięcia. Przed rozpoczęciem pomiarów autotransformator AT ustawiamy na minimum napięcia. Po zamknięciu stycznika St ustawiamy autotransformatorem znamionowe napięcie zasilania U_{1N} , utrzymując jego stałą wartość przez cały czas pomiarów. Pierwszych pomiarów dokonujemy bez obciążenia ($I_2 = 0$), a następnie zamykamy łącznik Ł przy maksymalnej rezystancji odbiornika i zmniejszając rezystancję R_{ob} zwiększamy tym samym prąd obciążenia I_2 do $1,2 I_{2N}$. Przy określonych wartościach prądu odczytujemy napięcie wtórne U_2 i moc pobraną przez transformator P_1 a wyniki notujemy w tabeli 4.

Tabela 4

$U_{1N} = \text{const} = \dots\dots\dots [\text{V}]; \quad \cos \varphi_2 = 1$						
Wyniki pomiarów				Wyniki obliczeń		
Lp.	U_2	I_2	P_1	U_{2ob}	P_2	η
	[V]	[A]	[W]	[V]	[W]	[%]
1.						
2.						
3.						
...						

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów i obliczeń należy wykreślić U_2 , $\eta = f(I_2)$ przy $U_1 = U_{1N}$. Sprawność η oblicza się ze wzoru

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%,$$

gdzie $P_2 = U_2 I_2$, gdyż odbiornik jest odbiornikiem czynnym i $\cos \varphi_2 = 1$.

Przybliżone napięcie strony wtórnej transformatora U_{2ob} przy obciążeniu czynnym wyznacza się z zależności

$$U_{2ob} = U_{20} - I_2 R_z,$$

sprowadzając rezystancję uzwojenia pierwotnego do strony wtórnej. We wzorze U_{20} jest napięciem wtórnym w stanie jałowym, a $R_z = R_2 + R_1'$ rezystancją zastępczą transformatora obliczoną jako suma rezystancji uzwojenia wtórnego R_2 i rezystancji uzwojenia pierwotnego sprowadzonej do strony wtórnej R_1' . Po dokonaniu obliczeń należy porównać wartości napięć pomierzonych U_2 i obliczonych U_{2ob} .

Przykładowe przebiegi $U_2 = f(I_2)$ pokazano na rys.2.10b a przebieg $\eta = f(I_2)$ na rys.2.12. Uzasadnienie przebiegów tych charakterystyk przedstawiono w punkcie 2.1.3.