

Dr inż. Marek Głogowski

3. Badanie sprzężenia elektromagnetycznego – transformator jednofazowy

Program ćwiczenia:

- Pomiar rezystancji uzwojeń transformatora.
- Pomiar przekładni transformatora.
- Wyznaczenie charakterystyki stanu jałowego transformatora.
- Wyznaczenie charakterystyki zwarcia transformatora.
- Wyznaczanie parametrów schematu zastępczego transformatora.

Cel ćwiczenia:

- Celem ćwiczenia jest poznanie sposobu wyznaczania charakterystyk i schematu zastępczego transformatora jednofazowego.

Uwaga! Przed przystąpieniem do ćwiczenia zapoznać się z dodatkiem pt. "Procedura wyznaczania niepewności pomiarowych".

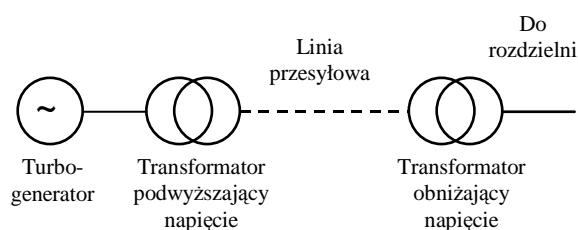
Wprowadzenie:

Energia elektryczna jest przesyłana na duże odległości wynoszące czasami 1000 i więcej kilometrów. Straty przy przesyłaniu energii są proporcjonalne do I^2R . Aby te straty były możliwie małe, powinno być małe R albo I . Zmniejszenie R wymagałoby stosowania linii przesyłowych o bardzo dużych przekrojach przewodów, co byłoby bardzo kosztowne, a przy bardzo dużych mocach technicznie niewykonalne. Dlatego na duże odległości należy przysyłać energię przy stosunkowo małym prądzie I i przy stosunkowo wysokim napięciu U , co wynika z równości mocy $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Rolę transformatora w systemie energetycznym można wyjaśnić za pomocą rys. 1. Energia elektryczna jest wytwarzana w turbogeneratorach ustawionych w elektrowniach. Napięcie turbogeneratora na ogół nie przekracza 24 kV. W celu podwyższenia napięcia do wartości np. 220 kV i zmniejszenia prądu jest ustawiony na początku linii przesyłowej *transformator podwyższający* napięcie.

Na końcu tej linii jest ustawiony *transformator obniżający* napięcie do wartości odpowiadającej napięciu rozdzielni obniżonego napięcia. Od tych rozdzielni energia jest odprowadzana liniami, na końcach których są ustawione transformatory obniżające napięcie do wartości stosowanej w rozdzielniach niskiego napięcia (kilkaset voltów). Energia doprowadzona do tych rozdzielni jest odprowadzana do odbiorników. Tak więc energia elektryczna na drodze przesyłu od turbogeneratorów do odbiornika jest transformowana co najmniej trzykrotnie. Dlatego transformator powinien mieć bardzo dużą sprawność.

Budowę transformatora jednofazowego przedstawia rysunek 2. Rdzeń składa się z jarzm 1 i z kolumn 2. Każde z uzwojeń, zarówno dolne 3, jak i górne 4 jest podzielone na połowę. Na



Rys. 1. Schemat systemu energetycznego.

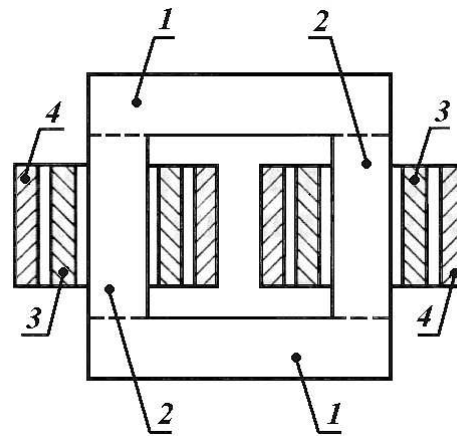
każdej z kolumn jest osadzona połówka uzwojenia dolnego¹⁾ i połówka uzwojenia górnego. W celu ułatwienia wykonania izolacji uzwojenie dolne jest umieszczone bliżej rdzenia, a uzwojenie górne – dalej od rdzenia. Obydwa uzwojenia mają postać cylindryczną. Pomiedzy uzwojeniem dolnym i górnym znajduje się tuleja izolacyjna nie widoczna na rysunku.

Zasadę działania transformatora można wyjaśnić na podstawie rysunku 3. Transformator ma rdzeń z blach elektrotechnicznych, tworzący obwód zamknięty dla strumienia magnetycznego Φ , oraz nawiniętej na nim przewodem miedzianym dwa (najczęściej) uzwojenia o liczbach zwojów N_1 i N_2 . Liczba zwojów N_1 jest najczęściej różna od liczby zwojów N_2 . Jeśli do uzwojenia o liczbie zwojów N_1 zostanie doprowadzone napięcie u_1 , to popłynie prąd i_1 , wywołujący strumień magnetyczny, którego zasadnicza część Φ popłynie przez rdzeń magnetyczny, kojarząc się z obydwoma uzwojeniami transformatora. Część strumienia magnetycznego, oznaczona $\Phi_{\sigma 1}$ zamknie się przez powietrze, kojarząc się tylko z uzwojeniem o liczbie zwojów N_1 . Strumień Φ nazywa się *strumieniem głównym*, a strumień $\Phi_{\sigma 1}$ – *strumieniem rozproszonym*.

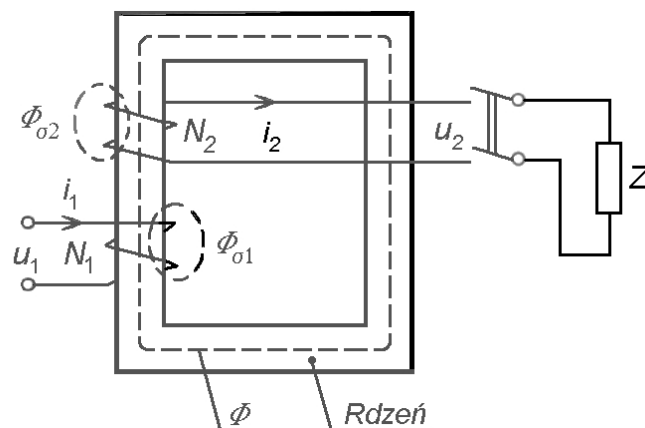
Strumień $\Phi_{\sigma 1}$ przechodzi głównie przez powietrze, a więc przez ośrodek o małej przewodności magnetycznej²⁾. Strumień Φ przechodzi przez rdzeń żelazny, a więc przez ośrodek magnetyczny o dużej przewodności magnetycznej. Dlatego strumień rozproszony $\Phi_{\sigma 1}$ jest znacznie mniejszy od strumienia głównego Φ . Zwykle $\Phi_{\sigma 1}$ wynosi kilka procent strumienia Φ . Jeśli napięcie u_1 jest napięciem przemiennym, to prąd i_1 jest prądem przemiennym oraz strumienie Φ i $\Phi_{\sigma 1}$ są strumieniami przemiennymi. Wtedy – zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej – w uzwojeniach transformatora indukują się napięcia odpowiednio proporcjonalnie do liczb zwojów N_1 i N_2 oraz strumienia Φ . Jeśli do uzwojenia o liczbie zwojów N_2 zostanie dołączony odbiornik o impedancji Z , to przez to uzwojenie popłynie prąd i_2 . Moc dostarczona do transformatora $U_1 I_1$ jest w przybliżeniu równa mocy odprowadzonej od transformatora, czyli $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, więc

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

W takim stanie, zwanym *stanem obciążenia*, prąd i_1 wywołuje strumień główny Φ_{g1} i strumień rozproszony $\Phi_{\sigma 1}$, a prąd i_2 wywołuje strumień główny Φ_{g2} i strumień rozproszony $\Phi_{\sigma 2}$. Strumień $\Phi_{\sigma 2}$ jest skojarzony tylko z uzwojeniem o liczbie zwojów N_2 . Strumień Φ_{g2} przy przebie-



Rys. 2. Budowa transformatora jednofazowego.



Rys. 3. Ilustracja zasady działania transformatora jednofazowego.

¹⁾ **strona dolna transformatora** jest to uzwojenie o mniejszej liczbie zwojów. Wszystkie wielkości związane ze stroną dolną są nazywane wielkościami dolnymi i oznaczane indeksem d;

²⁾ przewodnością magnetyczną albo permeancją nazywamy odwrotność reluktancji $\Lambda = \mu S/l$, jednostką jest 1 H;

gach sinusoidalnych jest skierowany prawie przeciwnie niż strumień Φ_{g1} (przesunięty w fazie prawie o 180°). Te dwa strumienie tworzą wspólny strumień wypadkowy Φ , skojarzony z obydwoma uzwojeniami. $\Phi_{\sigma 2}$. Jeśli impedancja odbiornika Z maleje, to prąd I_2 wzrasta, strumień Φ_{g2} wzrasta, strumień wypadkowy Φ chwilowo maleje, napięcie U_{i1} indukowane w uzwojeniu o liczbie zwojów N_1 (przeciwstawiające się płynięciu prądu I_1) chwilowo maleje, prąd I_1 wzrasta, strumień Φ_{g1} wzrasta aż strumień wypadkowy ponownie wzrośnie prawie do poprzedniej wartości. Na tej podstawie można stwierdzić, że przy wzroście prądu I_2 wzrasta prąd I_1 , a strumień główny prawie nie ulega zmianie.

Jeśli napięcie zasilające jest dołączone do uzwojenia pierwotnego o liczbie zwojów N_1 mniejszej od liczby zwojów N_2 uzwojenia wtórnego, to w uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie wyższe od napięcia zasilającego. Taki transformator podwyższa napięcie, a zmniejsza prąd w uzwojeniu wtórnym w stosunku do napięcia i prądu w uzwojeniu pierwotnym. Jeśli napięcie zasilające jest dołączone do uzwojenia $N_1 > N_2$, to transformator obniża napięcie, a zwiększa wartość prądu.

1. Pomiar rezystancji uzwojeń transformatora

Pomiar rezystancji uzwojeń należy wykonać miernikiem uniwersalnym. Dla każdego z uzwojeń należy wykonać po trzy pomiary, następnie obliczyć wartość średnią. Zmierzone wielkości należy przeliczyć na umowną temperaturę 75°C .

Rezystancję uzwojenia miedzianego przelicza się według wzoru

$$R_{75} = R \frac{235 + 75}{235 + T_0}$$

R_{75} – rezystancja w umownej temperaturze pracy,

R – rezystancja w temperaturze otoczenia,

T_0 – temperatura otoczenia.

2. Pomiar przekładni transformatora

Najczęściej za przekładnię transformatora ϑ przyjmuje się z_g/z_d (z_g – liczba zwojów strony górnej, z_d – liczba zwojów strony dolnej) niezależnie od tego, który obwód jest pierwotny, a który wtórny.

Pomiar przekładni wykonuje się w stanie jałowym. Pomierzone wartości napięć są obarczone błędem uchybu przyrządów i minimalnym wprawdzie, lecz istniejącym spadkiem napięcia wywołanym przepływem prądu pobieranego przez woltomierz. Przekładnię należy obliczyć ze wzoru

$$\vartheta = \frac{U_g}{U_d}$$

U_g, U_d – odpowiednio strona górna i dolnego napięcia.

3. Stan jałowy transformatora

Wyniki uzyskane z pomiarów transformatora zasilanego napięciem znamionowym pracującego w stanie jałowym, pozwalają ocenić stan techniczny jego rdzenia i stanowią ważny materiał porównawczy dla użytkownika.

Podczas ćwiczenia pomiary transformatora należy wykonać dla kilku wartości napięcia zasilania w granicach $(0.3-1.1) U_n$. Wyniki pomiarów umożliwiają wyznaczenie charakterystyki strat w żelazie ΔP_{Fe} , prądu jałowego I_o , jego składowej I_{Fe} oraz współczynnika mocy $\cos \varphi_o$ w zależności od wartości napięcia zasilającego. Charakterystyki te, zwane charakterystykami stanu jałowego transformatora, obrazują własności jego obwodu magnetycznego. Wykresy typowych charakterystyk stanu jałowego transformatora przedstawiono na rysunku 4. Prąd stanu jałowego I_o , pobierany przez transformator pracujący w stanie jałowym jest bardzo mały i w transformatorach energetycznych małej mocy nie przekracza wartości $0,1 I_n$ prądu znamionowego, a w jednostkach dużych o mocy kilkudziesięciu megawoltoamperów jest rzędu $0,01 I_n$. Z analizy porównawczej niepewności pomiaru mocy P_o pobieranej przez transformator pracujący w stanie jałowym oraz strat obciążenia $\Delta P_o = I_o^2 R_1$ wynika, że straty obciążenia są mniejsze od niepewności z jaką jest mierzona moc. Można więc przyjąć, że moc mierzona, którą pobiera transformator w stanie pracy jałowej jest praktycznie równa stratom w żelazie.

Straty w żelazie są proporcjonalne do kwadratu

$$P_o = \Delta P_{Fe}$$

indukcji magnetycznej B , a tym samym do kwadratu strumienia magnetycznego ϕ , do wartości którego jest wprost proporcjonalna siła elektromotoryczna E , czyli w przybliżeniu także do kwadratu napięcia U (jeżeli pominąć niewielki spadek napięcia na impedancji uzwojenia i przyjąć, że $E = U$).

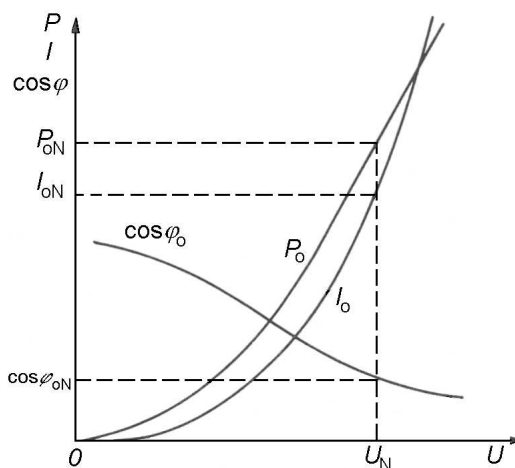
Zatem

$$P_o = \Delta P_{Fe} \sim B^2 \sim \Phi^2 \sim E^2 \cong U^2$$

Stąd charakterystyka $P_o = f(U)$ ma kształt paraboli. Prąd I_o pobierany przez transformator w stanie jałowym jest sumą geometryczną składowej biernej I_μ jaką stanowi prąd magnesujący i składowej czynnej I_{Fe} , która jest w przybliżeniu proporcjonalna do napięcia i odpowiada stratom w żelazie transformatora. Prądy te można wyznaczyć z zależności

$$I_\mu = I_o \sin \varphi_o$$

$$I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o$$



Rys. 4. Charakterystyki stanu jałowego transformatora.

Ponieważ składowa czynna I_{Fe} prądu jest mała $I_{Fe} \cong 0,1 I_o$, więc składowa bierna prądu I_{μ} , czyli prąd magnesujący transformatora, tylko nieznacznie różni się od prądu I_o . Tym samym, wykres prądu magnesującego $I_{\mu} = f(U_o)$ praktycznie pokrywa się z wykresem prądu jałowego $I_o = f(U_o)$.

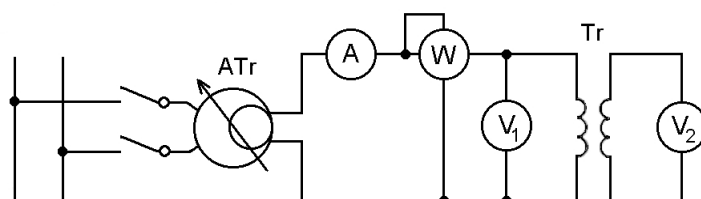
Współczynnik mocy transformatora w stanie jałowym

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{UI_o}$$

maleje, gdy napięcie zasilania wzrasta. Wynika to stąd, że prąd stanu jałowego wzrasta nieproporcjonalnie szybko w miarę jak zwiększa się napięcie zasilania, co jest spowodowane wzrastającym nasyceniem rdzenia transformatora.

Pomiary stanu jałowego transformatora należy wykonać w układzie połączeń, którego schemat zamieszczono na rysunku 5.

Po stronie pierwotnej mierzy się prąd I_o amperomierzem A, moc P_o watomierzem W i napięcie U_{1o} woltomierzem V_1 . Uzwojenie wtórne transformatora jest otwarte. Woltomierz V_2 mierzy napięcie wtórne U_{2o} .



Rys. 5. Schemat połączeń w stanie jałowym transformatora.

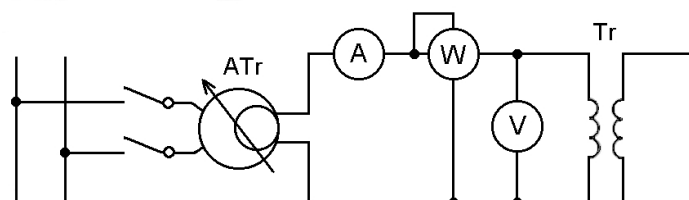
Tabela 1

| Lp. | I_o | U_{1o} | P_o | | | $\cos \varphi_o$ | U_{2o} | I_{Fe} | Uwagi |
|-------|-------|----------|----------|-------|---|------------------|----------|----------|-------|
| | | | α | c_w | | | | | |
| | A | V | dz | W/dz | W | – | V | A | |
| 1 – 7 | | | | | | | | | |

Wyniki uzyskane z pomiarów i obliczeń należy zamieścić w tabeli 1. Korzystając z otrzymanych wyników należy narysować wykresy P_o , I_o , $\cos \varphi_o = f(U_{1o})$

4. Stan zwarcia transformatora

Badanie transformatora pracującego w stanie zwarcia (rys. 6) wykonuje się, gdy jedno z uzwojeń ma celowo zwarte zaciski, podczas gdy drugie uzwojenie zasilane jest napięciem o obniżonej wartości. Wartość napięcia, jaką zasilany jest transformator zwarty,



Rys. 6. Schemat połączeń do próby zwarcia transformatora.

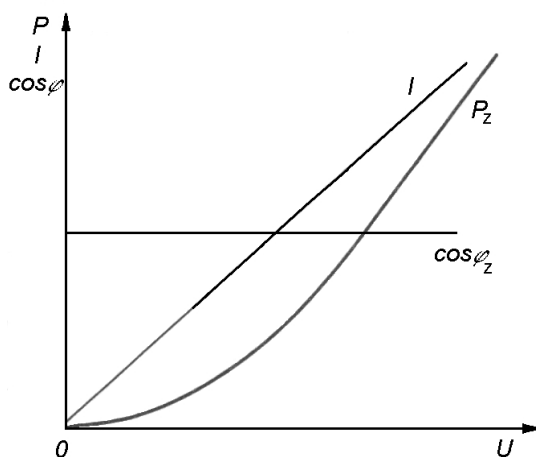
której odpowiada prąd znamionowy płynący w uzwojeniach jest napięciem zwarcia transformatora. Na podstawie pomierzonych w stanie zwarcia wielkości wyznacza się napięcie zwarcia ΔU_{zw} , straty obciążenia ΔP_{obc} oraz parametry gałęzi podłużnej schematu zastępczego transformatora. Prąd pobierany przez transformator pracujący w stanie zwarcia pomiarowego jest proporcjonalny do napięcia. Pomiar zwarcia wykonuje się w zakresie zmian prądu 0.2 do 1.2 I_n . Straty obciążenia dla $I_z = I_n$ są równe znamionowym stratom obciążenia ΔP_{obc} . Wynika

stąd, że moc czynna P_z pobierana przez transformator w stanie zwarcia pomiarowego jest praktycznie równa stratom obciążenia, gdyż straty ΔP_{Fez} w rdzeniu transformatora pracującego w stanie zwarcia pomiarowego stanowią ułamek procenta mocy mierzonej.

Pomiary należy rozpocząć zasilając transformator napięciem o takiej wartości, pod wpływem którego płynie prąd $I_{1z} = 1.2 I_n$. Następnie należy wykonać kilka pomiarów zmniejszając napięcie zasilania aż do wartości, dla której jest jeszcze możliwy pomiar mocy. Ze szczególną uwagą należy wykonać pomiar transformatora zasilanego takim napięciem, pod wpływem którego w uzwojeniach transformatora popłynie prąd równy prądowi znamionowemu. Moc pobrana przez transformator jest wtedy równa stratom obciążenia transformatora mocą znamionową $P_{zn} = \Delta P_{obc}$. Wykonując pomiary transformatora pracującego w stanie zwarcia pomiarowego należy mierzyć napięcie U_z , I_z oraz moc P_z .

Współczynnik mocy obliczamy ze wzoru

$$\cos \varphi_z = \frac{P_z}{U_z I_z}$$



Rys. 7. Charakterystyki zwarcia transformatora.

Tabela 2

| Lp. | I_z | U_z | P_z | | | $\cos \varphi_z$ | Uwagi |
|-------|-------|-------|----------|-------|---|------------------|-------|
| | | | α | c_w | W | | |
| | A | V | dz | W/dz | W | – | |
| 1 – 7 | | | | | | | |

Wyniki uzyskane z pomiarów i obliczeń należy zamieścić w tabeli 2. Na podstawie otrzymanych wyników należy wykreślić charakterystyki I_z , P_z i $\cos \varphi_z = f(U_z)$.

5. Schemat zastępczy transformatora

Schemat zastępczy transformatora (rys. 8) jest to schemat obwodu złożonego z rezystancji i reaktancji dobranych tak, że zjawiska zachodzące w tym układzie odwzorowują z dostatecznym przybliżeniem zjawiska zachodzące w transformatorze.

Parametry gałęzi poprzecznej układu, tj. rezystancję R_{Fe} odpowiadającą stratom mocy w żelazie rdzenia transformatora spowodowanych występowaniem zjawiska histerezy magnetycznej i prądów wirowych oraz reaktancję X_μ odpowiadającą strumieniowi głównemu transformatora, oblicza się z zależności:

$$R_{Fe} = \frac{U_o^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{U_o^2}{P_o}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_o}{I_o \sin \varphi_o}$$

Obliczając wartości parametrów R_{Fe} i X_{μ} wartości pozostałych wielkości występujących we wzorach należy odczytać z charakterystyk stanu jałowego dla napięcia $U = U_n$.

Ponieważ w stanie zwarcia pomiarowego straty strumienia i straty w żelazie są pomijalnie małe, można przyjąć, że dla tego stanu pracy parametry $R_{Fez} = \infty$ i $X_{\mu z} = \infty$. Wtedy na schemacie układu zastępczego nie ma gałęzi poprzecznej.

Rezystancja zastępcza zwana rezystancją zwarcia transformatora

$$R_z = R_1 + R_2' = \frac{P_z}{I_z^2}$$

reaktancja zastępcza zwana reaktancją zwarcia transformatora

$$X_z = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2}$$

a impedancja zastępcza zwana także impedancją zwarcia transformatora

$$Z_z = \frac{U_z}{I_z}$$

Można przyjąć, że:

$$R_1 = R_2' = 0,5R_z$$

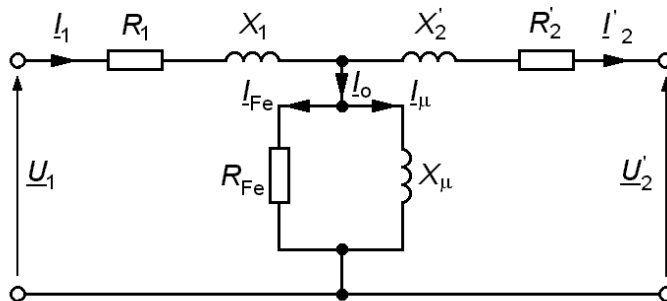
$$X_1 = X_2' = 0,5X_z$$

W sprawozdaniu z ćwiczenia należy obliczyć parametry zastępczego układu badanego transformatora.

Opracowanie sprawozdania:

Sprawozdanie z wykonanego ćwiczenia powinno zawierać:

- protokół z pomiarów,
- wykresy charakterystyk stanu jałowego $P_o, I_o, \cos \varphi_o = f(U_o)$,
- wykresy charakterystyk stanu zwarcia I_z, P_z i $\cos \varphi_z = f(U_z)$,



Rys. 8. Schemat zastępczy transformatora.

- wyznaczenie parametrów schematu zastępczego,
- uwagi i wnioski z uwzględnieniem rachunku niepewności.

Literatura:

- Władysław Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994.
- Elektrotechnika. Ćwiczenia laboratoryjne: praca zbiorowa, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1979.
- Władysław Latek, *Teoria maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1987.

ver 06/2013