

**Zakład Napędów Wieloźródłowych
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW
Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

Ćwiczenie M3 - instrukcja

**Badanie silnika indukcyjnego jednofazowego
i transformatora**

Data wykonania ćwiczenia.....

Data oddania sprawozdania.....

Zespół wykonujący ćwiczenie:

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena końcowa</i>
1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.

Wydział SiMR PW

Rok ak. 201.../201...

Semestr.....

Grupa.....

Warszawa 2010r.

SPIS TREŚCI

1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA.....	2
2. SILNIK INDUKCYJNY JEDNOFAZOWY - WYBRANE ZAGADNIENIA.....	2
3. TRANSFORMATOR - WYBRANE ZAGADNIENIA.....	5
4. LITERATURA POMOCNICZA.....	11

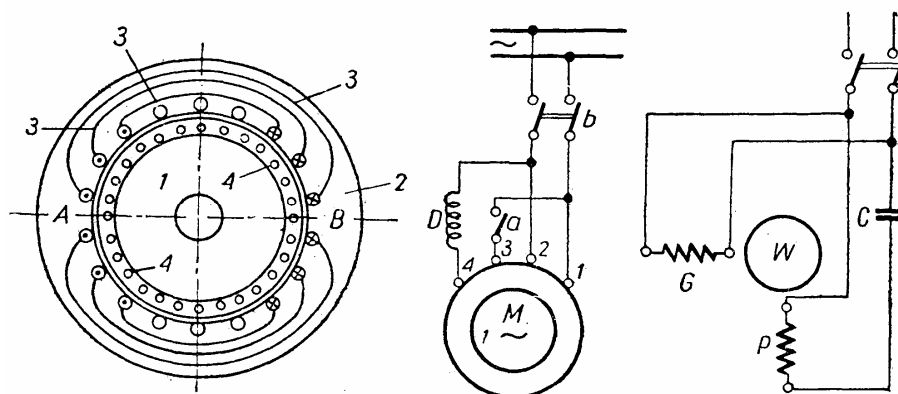
1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania silnika indukcyjnego jednofazowego. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwią analizę wpływu napięcia zasilania na parametry eksploatacyjne silnika w zależności od zmian obciążenia. W drugiej części ćwiczenia elementem badanym jest transformator. Pomiary laboratoryjne dotyczą podstawowych parametrów elektrycznych: napięć, prądów, mocy, $\cos\phi$ dla różnych stanów pracy transformatora. Analiza otrzymanych wyników umożliwi wyznaczenie parametrów znamionowych urządzenia; m.in. przekładni, strat w żelazie w stanie jałowym, napięcia zwarcia, strat mocy w miedzi w stanie zwarcia.

2. Silnik indukcyjny jednofazowy - wybrane zagadnienia

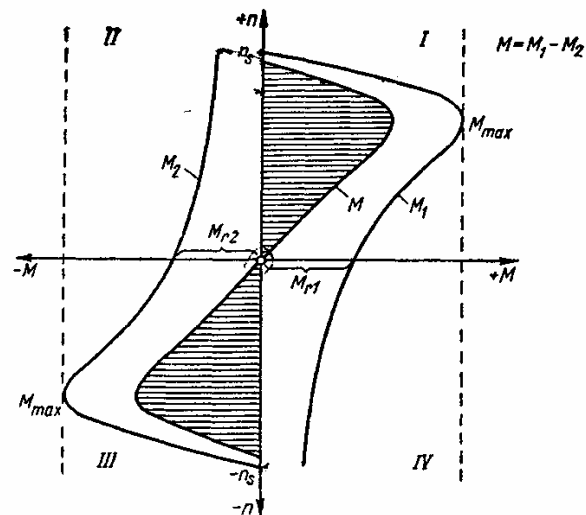
Silnik indukcyjny jednofazowy składa się ze stojana i wirnika. Nieruchomy stojan jest wykonany z izolowanych wzajemnie blach stalowych, charakteryzujących się wyciętymi żłobkami na swym wewnętrznym obwodzie. W obszarze 2/3 wszystkich żłobków stojana jest umieszczone uzwojenie główne (robocze) silnika, natomiast w pozostałej części znajduje się nawinięte uzwojenie fazy pomocniczej (rozwuchowej). Wirnik wykonany jest w formie klatki dla silników małych mocy lub pierścieni dla silników dużej mocy.

Uzwojenie główne zasilane jest wyłącznie napięciem jednofazowym - źródło prądu sinusoidalnie zmiennego, wytwarzające w stojanie strumień magnetyczny, zmienny się w czasie, w takt zmian wywołującego go prądu, ale pozostający nieruchomo w przestrzeni. Wytworzone pole magnetyczne jest polem magnetycznym pulsującym (oscylującym). W tych warunkach nieruchomy wirnik zachowuje się tak jak uzwojenie wtórne transformatora, w którym indukuje się SEM powodując przepływ prądu w wirniku.



Rys.1. Uzwojenie silnika jednofazowego: 1- wirnik, 2-stojan, 3-uzwojenie stojana, 4-uzwojenie wirnika;
Schematy połączeń z dławikiem oraz z uzwojeniem pomocniczym i kondensatorem.

W wyniku oddziaływania pulsującego strumienia magnetycznego stojana na uzwojenia wirnika z prądem powstają siły. Siły te znoszą się wzajemnie, wyniku, czego wirnik pozostaje nieruchomy – brak momentu napędowego (rozruchowego). Innymi słowy dla prędkości zero momenty rozruchowe pochodzące od dwóch strumieni są sobie równe $M_{r1} = M_{r2}$, ale przeciwnie skierowane.

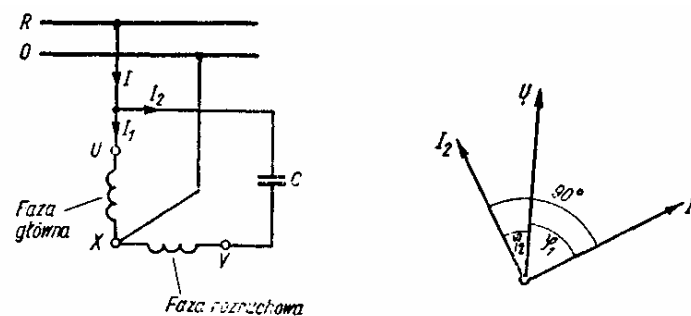


Rys.2. Moment obrotowy silnika jednofazowego bez fazy rozruchowej.

Brak momentu rozruchowego jest poważną wadą opisanego wyżej silnika. Aby tę wadę usunąć, stosuje się w stojanie drugie uzwojenie tzw. fazą rozruchową

Obydwa uzwojenia główne i rozruchowe są przesunięte względem siebie w maszynie dwubiegunowej o kąt 90° . Prądy płynące w tych uzwojeniach powinny być względem siebie przesunięte w fazie o $1/4$ okresu, tzn. ich wektory powinny być przesunięte o 90° . Dla osiągnięcia tego stosuje się dwa rozwiązania silników jednofazowych klatkowych:

- a) silniki z fazą rozruchową kondensatorową;
- b) silniki z fazą rozruchową oporową.



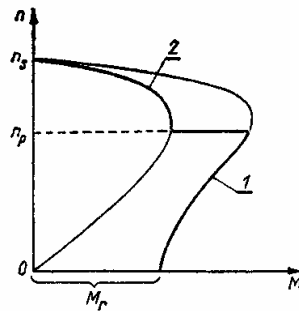
Rys.3. Schemat połączeń i wykres wektorowy silnika jednofazowego z kondensatorową fazą rozruchową.

Silniki z fazą rozruchową kondensatorową mają fazę rozruchową przyłączoną do sieci szeregowo z kondensatorem. Przez fazę główną płynie prąd I_1 opóźniony względem napięcia o kąt ϕ_1 , gdyż obwód fazy głównej jest obwodem o charakterze indukcyjnym. Natomiast prąd I_2 wyprzedza napięcie o kąt ϕ_2 . Dzięki odpowiedniemu doborowi kondensatora uzyskujemy przesunięcie fazowe:

$$\phi_1 + \phi_2 = 90^\circ$$

Prądy te wytwarzają dwa strumienie magnetyczne przesunięte w przestrzeni o 90° i w fazie o $1/4$ okresu, których wypadkowa daje pole magnetyczne wirujące, podobnie jak w

silniku trójfazowym. A zatem silnik jednofazowy z fazą rozruchową jest w istocie silnikiem dwufazowym, zasilanym jednofazowo. Charakterystyka mechaniczna, poślizg tego silnika niczym się nie różni od charakterystyki mechanicznej i poślizgu silnika klatkowego trójfazowego.



Rys.4. Charakterystyka mechaniczna jednofazowego silnika klatkowego z oporową fazą rozruchową: 1- z fazą rozruchową, 2-bez fazy rozruchowej.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%$$

n_1 – prędkość synchroniczna,
 n – prędkość wirnika,

Silnik jednofazowy z kondensatorem stosowany służy do napędu urządzeń uruchamianych pod obciążeniem, takich jak kompresory, podnośniki, pompy benzynowe itp.

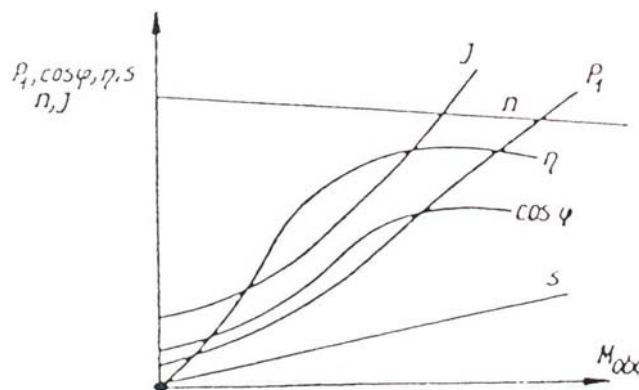
Silnik jednofazowy z rezystancyjną fazą rozruchową jest powszechnie stosowany do napędu w pralkach domowych, pompach odśrodkowych, aparatach medycznych, polerkach i innych urządzeniach niewymagających dużego momentu rozruchowego, charakteryzuje się:

$$\frac{M_r}{M_n} = 1 \div 1,2, \quad \frac{I_r}{I_n} = 6 \div 9$$

M_r – moment rozruchowy,
 M_n – moment znamionowy,
 I_r – prąd rozruchowy,
 I_n – prąd znamionowy

Zastosowanie kondensatora pozwala na uzyskanie przesunięcia kątownego, $\sim 90^\circ$ dzięki czemu powstaje kołowe pole wirujące i duży moment rozruchowy:

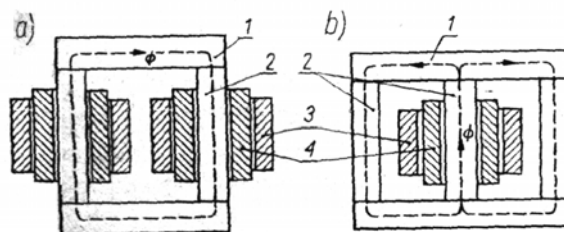
$$\frac{M_r}{M_n} = 1,8 \div 2 \quad \frac{I_r}{I_n} = 3 \div 5$$



Rys.5. Charakterystyki robocze silnika indukcyjnego jednofazowego.

3. Transformator - wybrane zagadnienia

Transformator energetyczny - urządzenie elektromagnetyczne statyczne, służące do przetwarzania energii elektrycznej prądu przemiennego o danym napięciu na energię elektryczną o innym napięciu.



Rys.6. Budowa transformatora jednofazowego: a) rdzeniowego; b) płaszczykowego; 1 - jarzmo, 2 - kolumna, 3 - uzwojenie wysokiego napięcia, 4 - uzwojenie niskiego napięcia

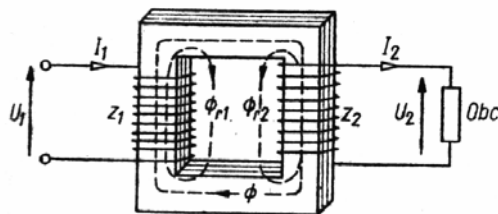
Transformatory mogą pracować jako podwyższające lub jako obniżające napięcie, w związku z tym mówimy o stronie napięcia górnego i stronie napięcia dolnego. W transformatorze obniżającym strona napięcia górnego jest stroną pierwotną.

Obwód magnetyczny transformatora stanowi rdzeń, złożony z cienkich blach stalowych, izolowanych od siebie. Materiałem - stal o dużej zawartości krzemu, w zależności od właściwości magnetycznych uzyskuje się wąską lub szeroką pętlę histerezy magnetycznej.

Ważnym problemem w transformatorach jest odpowiednie odprowadzenie ciepła, powstałego w wyniku strat w rdzeniu oraz strat w uzwojeniach miedzianych pierwotnym i wtórnym, wywołanych przepływem prądu. W transformatorach małej mocy - naturalne odprowadzanie ciepła na zasadzie konwekcji powietrza i promieniowania. W transformatorach dużej mocy rdzeń stalowy wraz z uzwojeniami umieszcza się w kadzi wypełnionej olejem, który oprócz działania chłodzącego izoluje. Ściany kadzi są wyposażone w uźebrowanie rurowe lub radiatory, przez które przepływa poruszany siłami konwekcji nagrzany olej transformatorowy.

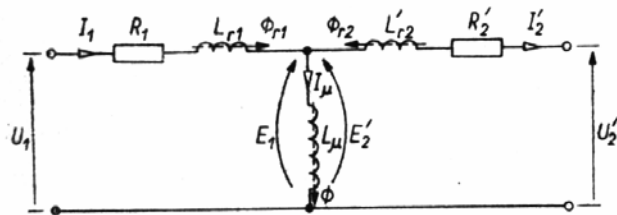
Zasada działania transformatora polega na elektromagnetycznym oddziaływaniu kilku uzwojeń, niepołączonych ze sobą elektrycznie, a nawiniętych na wspólnym rdzeniu, (sprężenie wspólnym strumieniem magnetycznym).

Prąd przemienny I_1 płynący w uzwojeniu pierwotnym, wytwarza przemienny strumień magnetyczny główny obejmujący uzwojenia pierwotne i wtórne, indukując w nich napięcia.



Rys.7. Zasada działania transformatora jednofazowego.

Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym jest napięciem źródłowym dla obwodu tego uzwojenia. Część strumienia wytworzonego przez uzwojenie pierwotne nie obejmuje uzwojenia wtórnego, gdyż zamyka się wokół własnego uzwojenia - strumień rozproszenia ϕ_{r1} . Jeżeli w obwodzie wtórnym płynie prąd I_2 to wytwarza własny strumień, którego część odejmuje się od strumienia głównego, zmniejszając jego wartość. Druga część zamyka się poza obwodem głównym, tworząc strumień rozproszenia ϕ_{r2} .



Rys.8. Schemat zastępczy transformatora idealnego.

Sinusoidalny strumień główny indukuje:

$$e_1 = -z_1 \frac{d\phi}{dt}; \quad E_{1m} = \omega z_1 \phi_m; \quad E_1 = 4.44 z_1 f \phi_m$$

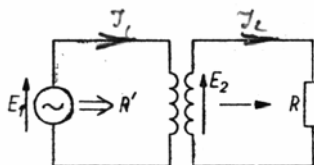
$$e_2 = -z_2 \frac{d\phi}{dt}; \quad E_{2m} = \omega z_2 \phi_m; \quad E_2 = 4.44 z_2 f \phi_m$$

w stanie jałowym napięcie U_1 przyłożone do zacisków uzwojenia pierwotnego jest równoważone przez siłę elektromotoryczną E_1 ($U_1 = E_1$). Na zaciskach uzwojenia wtórnego napięcie U_2 równe sile elektromotorycznej E_2 ($U_2 = E_2$), czyli przekładnia transformatora:

$$\mathcal{G} = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{po przekształceniach} \quad \frac{E_2}{E_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

Przy założeniu, że źródło energii zasila odbiornik R poprzez idealny transformator bez strat, moc pobrana przez odbiornik wynosi:

$$P = \frac{E_2^2}{R}$$



Rys.9. Przekazywanie energii przez transformator idealny.

Dla źródła, które tę moc dostarcza, odbiornikiem jest inna rezystancja. Rezystancję obciążenia widzianą od strony źródła poprzez transformator nazwano rezystancją przeliczoną na stronę pierwotną R' , a więc:

$$P = \frac{E_2^2}{R} = \frac{E_1^2}{R'} \rightarrow R' = \mathcal{G}^2 R$$

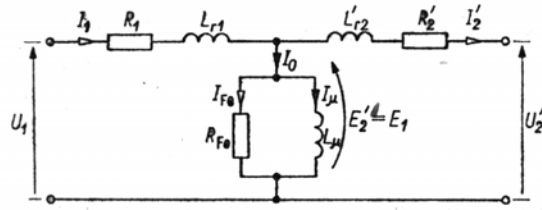
W teorii transformatorów i maszyn indukcyjnych przeliczamy wielkości opisujące stronę wtórną na stronę pierwotną:

$$R'_2 = \mathcal{G}^2 R_2$$

$$X'_2 = \mathcal{G}^2 X_2$$

$$L'_2 = \mathcal{G}^2 L_2$$

$$P = E_2 I_2 = E_1 I_1 \rightarrow I'_2 = \frac{I}{\mathcal{G}} I_2$$



Rys.10. Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego.

Przy przepływie prądu zmiennego przez uzwojenie nawinięte na rdzeń z materiału ferromagnetycznego, w rdzeniu powstają straty:

- straty na histerezę, (proporcjonalne do pola powierzchni pętli histerezy, do kwadratu indukcji i do częstotliwości)
- straty wiroprowdowe (w rdzeniach magnetycznych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym tworzą się elementarne obwody elektryczne zamknięte, w których płyną prądy - prądy wirowe. Zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej zmienny strumień magnetyczny indukuje napięcie elementarne, które przy odpowiednich własnościach przewodzących środowiska powoduje przepływ prądów wirowych, im większa jest rezystywność blachy, tym prądy są mniejsze i ilość wydzielanego ciepła jest mniejsza).

Łączne straty w stali (R_{Fe}) - straty magnetyczne, wywołane przez zmienne pole magnetyczne występują w rdzeniu. Straty w miedzi wynikają z przepływu prądu przez uzwojenia o rezystancjach R_1 i R_2 . Przyjmuje się, że straty w uzwojeniu wtórnym występują tylko w stanie obciążenia i w stanie zwarcia transformatora.

Sprawność transformatorów energetycznych w granicach od 0,92 do 0,99, jest to iloraz mocy czynnej oddanej do mocy czynnej pobieranej przez transformator:

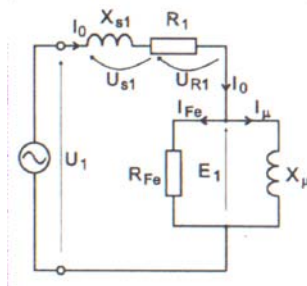
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}}$$

W zależności od obciążenia strony wtórnej transformatora rozróżnia się następujące stany pracy: stan jałowy, stan obciążenia i stan zwarcia.

W stanie jałowym w uzwojeniu wtórnym nie płynie żaden prąd, w uzwojeniu pierwotnym płynie mały prąd magnesujący, który powoduje niewielkie spadki napięcia na rezystancji R_1 i indukcyjności rozproszenia L_{r1} . Przekładnia napięciowa transformatora w stanie jałowym jest zbliżona do zwojowej.

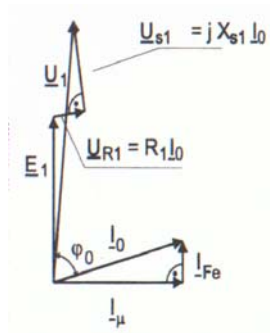
W stanie jałowym:

- reaktancja związana ze strumieniem głównym X_μ ,
- reaktancja związana ze strumieniem rozproszenia X_{S1} ,
- rezystancja uzwojenia pierwotnego R_1 ,
- rezystancja związana ze stratami mocy czynnej w rdzeniu transformatora R_{Fe} .



Rys.11. Schemat zastępczy transformatora pracującego w stanie jałowym.

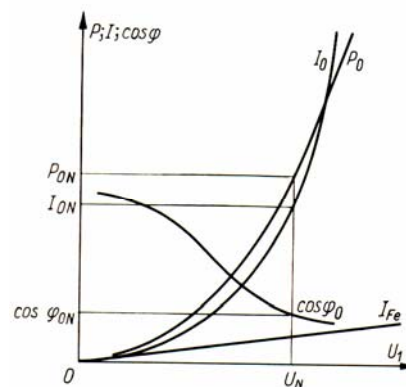
W stanie jałowym w uzwojeniu wtórnym nie płynie żaden prąd, w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd jałowy I_0 , który powoduje niewielkie spadki napięcia na rezystancji R_1 i indukcyjności rozproszenia L_{S1} .



Rys.12. Wykres wektorowy transformatora w stanie jałowym.

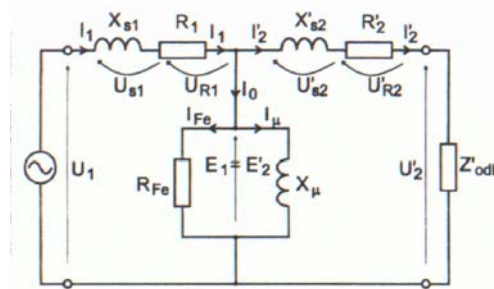
Korzystając z praw Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych możemy napisać zależności dla transformatora pracującego w stanie jałowym i wykonać wykres wektorowy:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe} \quad \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_0 + jX_{S1} \underline{I}_0 + \underline{E}_1$$



Rys.13. Charakterystyki biegu jałowego transformatora.

Transformator pracuje w stanie obciążenia, gdy uzwojenie pierwotne jest zasilane ze źródła napięcia przemiennego, a do zacisków uzwojenia wtórnego dołączony jest odbiornik.



Rys.14. Schemat zastępczy transformatora pracującego w stanie obciążenia.

Stan obciążenia charakteryzuje się tym, że wartości obydwu prądów, spadki napięcia na rezystancjach i indukcyjnościach rozproszenia są duże. Korzystając z zależności umożliwiających sprowadzenie uzwojenia wtórnego na stronę uzwojenia pierwotnego otrzymamy schemat zastępczy transformatora w stanie obciążenia, który uwzględnia następujące elementy składowe:

- reakt. strumienia głównego X_μ ,

- reakt. strumienia rozproszenia uzwojenia pierwotnego X_{S1} ,
- reakt. strumienia rozproszenia uzw. wtórnego sprowadzona na stronę pierwotną X'_{S2} ,
- rezystancja uzwojenia pierwotnego R_1 ,
- rezystancja uzwojenia wtórnego sprowadzona na stronę pierwotną R'_2 ,
- rezystancja strat mocy czynnej w rdzeniu transformatora R_{Fe} ,
- impedancja odbiornika sprowadzona na stronę pierwotną Z'_{odb} .

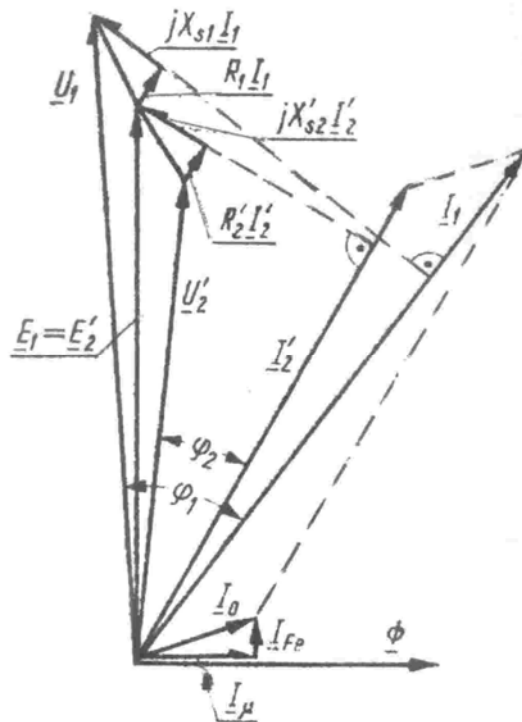
Korzystając z praw Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych możemy napisać zależności dla transformatora pracującego w stanie obciążenia i wykonać wykres wektorowy:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe}$$

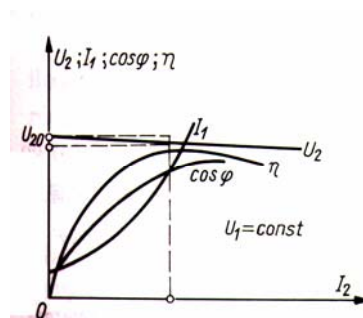
$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{S1} \underline{I}_1 + R'_2 \underline{I}'_2 + jX_{S2} \underline{I}'_2 + Z'_{odb} \underline{I}'_2$$

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{S1} \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

$$\underline{E}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX_{S2} \underline{I}'_2 + Z'_{odb} \underline{I}'_2$$



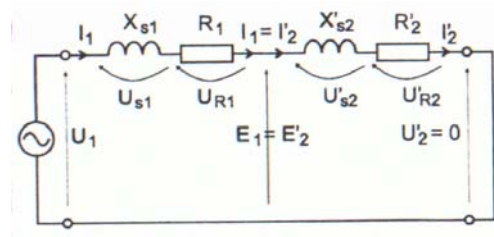
Rys.15. Wykres wektorowy transformatora w stanie obciążenia.



Rys.16. Charakterystyki stanu obciążenia transformatora.

W stanie zwarcia w uzwojeniach płyną prądy znamionowe. Napięcie wtórne jest równe zero, a do uzwojenia pierwotnego doprowadza się napięcie równe spadkom napięć wywołanych prądami znamionowymi na rezystancjach uzwojeń i indukcyjnościach rozproszenia. Cała moc czynna pobierana przez zwarty transformator pokrywa wyłącznie straty, zamieniając się w całości na ciepło. Ponieważ prąd jałowy I_0 w stanie zwarcia stanowi

kilka $\frac{0}{100}$ prądu pobieranego przez transformator możemy dokonać uproszczenia w schemacie zastępczym transformatora pracującego w stanie zwarcia.



Rys.17. Schemat zastępczy transformatora pracującego w stanie zwarcia.

Korzystając z praw Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych możemy napisać zależności dla transformatora pracującego w stanie zwarcia i wykonać wykres wektorowy:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{s1} \underline{I}_1 + R_2 \underline{I}'_2 + jX_{s2} \underline{I}'_2$$

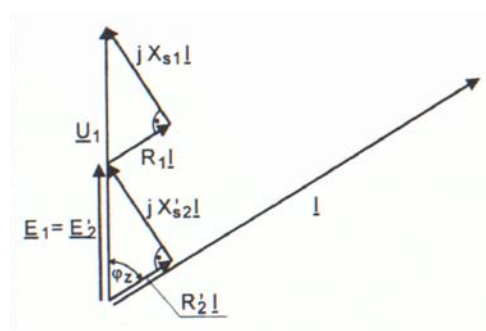
$$\underline{Z}_z = R_1 + R'_2 + jX_{s1} + jX_{s2}$$

$$\underline{Z}_z = R_z + jX_z$$

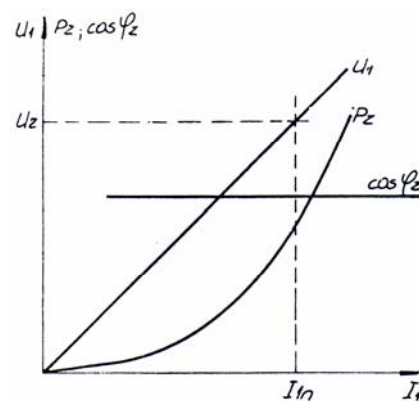
$$\underline{Z}_z = \sqrt{R_z^2 + X_z^2}$$

$$I = I_1 = I'_2$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_z I$$



Rys.18. Wykres wektorowy transformatora w stanie zwarcia, przy założeniu że $R_1 = R'_2$, $X_{s1} = X'_{s2}$.



Rys.19. Charakterystyki stanu zwarcia transformatora.

W warunkach eksploatacyjnych transformatory można połączyć równolegle, gdy:

- napięcia znamionowe wtórne są jednakowe,
- napięcia zwarcia są jednakowe,
- stosunek mocy znamionowych jest nie większy niż 1:3,
- grupy połączeń transformatorów są jednakowe

4. Literatura pomocnicza

1. Bieniek A. i inni „Maszyny i urządzenia elektryczne”
2. Koziej E., Sochon B. „Elektrotechnika i elektronika”
3. Kukurba H. Śliwa A. „Zbiór zadań z elektrotechniki”
4. Latek W. „Zarys maszyn elektrycznych”
5. Michałowski K., Przyjałkowski A. „Elektrotechnika z elektroniką”
6. Przeździecki F. „Elektrotechnika i elektronika”
7. Szumanowski A. wykład z „Elektrotechniki i elektroniki”

opracował:
dr inż. I. Krakowiak