

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI  
Roman MIKSIEWICZ

Zakład Maszyn Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

ALGORYTM OBLICZEŃ OBWODÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH  
INDUKCYJNYCH SILNIKÓW JEDNOFAZOWYCH Z KONDENSATOREM PRACY

Streszczenie. Przedstawiono algorytm obliczeń obwodów elektromagnetycznych, przydatny w projektowaniu indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy z wykorzystaniem ETO.

Wprowadzono nowe transmitancje, umożliwiające uproszczenie toku obliczeń na maszynie cyfrowej, dzięki zastąpieniu dwóch pętli iteracyjnych na schemacie blokowym - jedną.

#### 1. Klasyczna metoda obliczeń obwodów elektromagnetycznych maszyn indukcyjnych

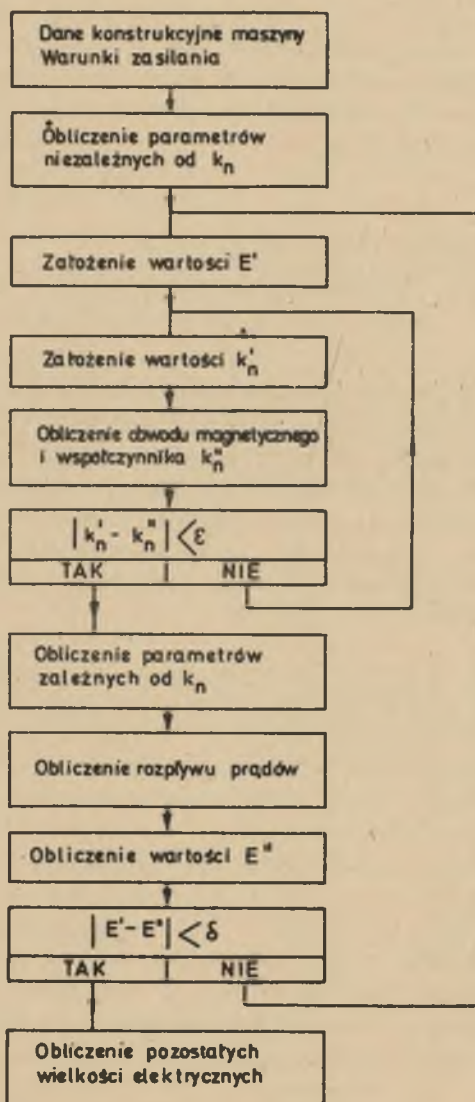
Przy obliczeniach obwodów elektromagnetycznych indukcyjnych maszyn elektrycznych w stanach ustalonych podstawowe znaczenie ma określenie wartości strumienia głównego i w konsekwencji - rozkładu indukcji magnetycznej w maszynie. Dla symetrycznych indukcyjnych maszyn 3-fazowych, zasilanych napięciem sinusoidalnym, strumień główny określony jest równaniami:

$$E = 4 k_B f z k_U \Phi \quad (1)$$

$$\underline{E} = \underline{U} - (R + j\omega L_s) \underline{I}, \quad (2)$$

gdzie:

- E - wartość skuteczna napięcia indukowanego w stojanie,
- I - wartość skuteczna prądu stojana,
- R - rezystancja fazowa stojana,
- $L_s$  - indukcyjność rozproszenia fazy stojana,
- z - liczba zwojów fazy stojana,
- $k_U$  - współczynnik uzwojenia stojana,
- $k_B$  - współczynnik kształtu,
- U - wartość skuteczna napięcia zasilającego,
- f - częstotliwość sieci.



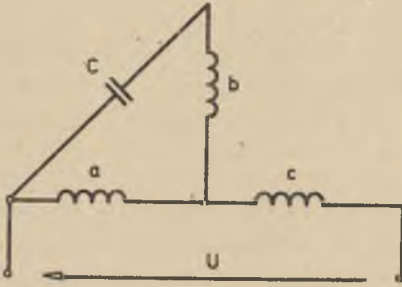
Rys. 1. Klasyczna metoda obliczeń obwodu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej

W równaniach (1), (2), prócz strumienia głównego  $\Phi$  nieznaną jest wartość prądu stojana  $I$ . Tradycyjnie wartość strumienia oblicza się metodą kolejnych przybliżeń: zakłada się pewną wartość napięcia  $E$ , a następnie oblicza strumień magnetyczny  $\Phi$ , reaktancje maszyny z uwzględnieniem współczynnika nasycenia obwodu magnetycznego  $k_n$  oraz prąd stojana  $I$ . Z równania (2) wylicza się wartość napięcia  $E''$ . Jeśli różnica  $|E' - E''|$  jest dostatecznie mała (mniejsza od pewnej założonej wartości  $\epsilon$ ), obliczenia przerywamy. Wstępny dobór wartości  $E'$  ułatwia znajomość stosunku charakterystycznego  $k_E = \frac{E}{U}$ , wyznaczonego doświadczalnie dla symetrycznych maszyn indukcyjnych średniej i dużej mocy. Wartość współczynnika  $k_E$  zmienia się w zależności od mocy silnika, w granicach od 0,9 do 0,99 [1] [2] [4].

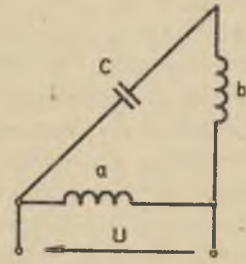
Powyższa metoda zaadoptowana została do obliczania obwodów elektromagnetycznych indukcyjnych silników 1-fazowych z fazą pomocniczą [2] [7]. Oczywiście jest ona ścisła tylko wtedy, gdy wypadkowe pole w szczelinie maszyny jest kołowe, natomiast warunek kołowego pola magnetycznego spełniony może być tylko dla jednej wybranej wartości prędkości obrotowej. Ponadto nie daje ona możliwości wyznaczenia maksymalnych i minimalnych wartości indukcji magnetycznych w szczelinie, odpowiadających dłuższej i krótszej półosi rzeczywistego pola eliptycznego. Znajomość tych indukcji, jak i położenia osi pola eliptycznego, posiada istotne znaczenie dla projektanta maszyny. W silnikach małej mocy trudniejszy jest również dobór wstępnej wartości napięcia  $E$ , ponieważ uzwojenia stojana posiadają dużą rezystancję. Współczynnik  $k_E$  zmienia się w zależności od mocy silnika w znacznie szerszych granicach. Opisany sposób obliczeń obwodu elektromagnetycznego przedstawiono na rys. 1 w postaci schematu blokowego. Jak widać, zawiera on dwie pętle iteracyjne: wewnętrzną - dla ustalenia wartości współczynnika nasycenia  $k_n$  oraz zewnętrzną - dla ustalenia wartości napięcia  $E$ .

## 2. Proponowana metoda obliczeń obwodów elektromagnetycznych maszyn indukcyjnych jednofazowych z kondensatorem pracy

W pracach [3] [5] przedstawiono metodę obliczeń stanu nieustalonego i ustalonego jednofazowej maszyny indukcyjnej o uzwojeniach stojana typu T (rys. 2) i L (rys. 3). Punktem wyjścia był model maszyny 4-fazowej o fazach a, b, c, d, z którego wyodrębniono tzw. układ zasilający, zawierający impedancje rozproszeń (rezystancje i indukcyjności rozproszeń faz stojana). Maszynę, pozbawioną niesymetrycznych impedancji rozproszeń stojana zastąpiono równoważną pod względem magnetycznym symetryczną maszyną 2-fazową o osiach  $\alpha$  i  $\beta$ . Równania silnika 1-fazowego o uzwojeniach stojana typu T wyprowadzono, przyjmując, że faza d stojana jest przzerwana ( $i_d = 0$ ). Równania silnika z uzwojeniami stojana typu L otrzymano, przyjmując dodatkowo, że przekładnia fazy c stojana dąży do zera ( $v_c = 0$ ). Taki sposób analizy umożliwia wprowadzenie nowych transmitancji  $K_{1\alpha}$  oraz



Rys. 2. Schemat połączeń uzwojeń stojana typu T



Rys. 3. Schemat połączeń uzwojeń stojana typu L

$\underline{K}_{2\alpha}$ , określających wprost składowe symetryczne  $\underline{E}_1$  i  $\underline{E}_2$  napięć indukowanych w fazach  $\alpha$  i  $\beta$  stojana maszyny zastępczej, jeśli dane jest napięcie zasilające  $\underline{U}$ :

$$\underline{E}_{1\alpha} = \underline{K}_{1\alpha} \underline{U} \quad (3)$$

$$\underline{E}_{2\alpha} = \underline{K}_{2\alpha} \underline{U} \quad (4)$$

gdzie:

$$\underline{K}_{1\alpha} = - \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21} - \underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22}} \quad (5)$$

$$\underline{K}_{2\alpha} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21} - \underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22}} \quad (6)$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 (1 + \nu_c) + \frac{2}{1 + \nu_c} (\underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - j \frac{2}{\nu_b (1 + \nu_c)} (\nu_c \underline{Z}_a - \underline{Z}_c) \quad (7)$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_2 (1 + \nu_c) + \frac{2}{1 + \nu_c} (\underline{Z}_a + \underline{Z}_c) + j \frac{2}{\nu_b (1 + \nu_c)} (\nu_c \underline{Z}_a - \underline{Z}_c) \quad (8)$$

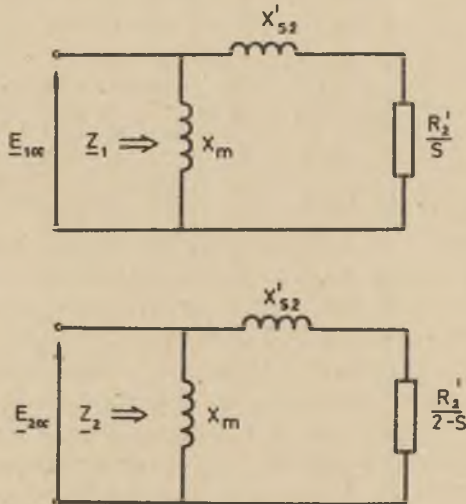
$$\underline{Z}_{21} = \underline{Z}_1 + \frac{2}{1 + \nu_c} \underline{Z}_a - \frac{2X_k}{\nu_b} - j \left[ \nu_b \underline{Z}_1 + \frac{2 \nu_c}{\nu_b (1 + \nu_c)} \underline{Z}_a + \frac{2}{\nu_b} \underline{Z}_b \right] \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \frac{2}{1 + \nu_c} \underline{Z}_a + \frac{2X_k}{\nu_b} + j \left[ \nu_b \underline{Z}_2 + \frac{2 \nu_c}{\nu_b (1 + \nu_c)} \underline{Z}_a + \frac{2}{\nu_b} \underline{Z}_b \right] \quad (10)$$

$Z_a, Z_b, Z_c$  - impedancje rozprożeń faz a, b, c stojana,

$X_k$  - reaktancja kondensatora pracy,

$v_b, v_c$  - przekładnie faz b i c stojana (fazą odniesienia jest faza a stojana).



Rys. 4. Schematy zastępcze dla impedancji  $Z_1$  i  $Z_2$

Wartość impedancji  $Z_1$  i  $Z_2$  określa się ze schematów elektrycznych, przedstawionych na rys. 4.

Dla silników 1-fazowych o uzwojeniach stojana typu L we wzorach (7)-(10) należy podstawić  $v_a = 0$ .

Napięcie  $E_{1\alpha}$  indukowane przez kołowe pole współbieżne o amplitudzie  $B_{1\alpha}$ , wynikającej ze wzoru:

$$E_{1\alpha} = 4 k_B f z_a k_{ua} \alpha_i \tau_p L B_{1\alpha} \quad (11)$$

zaś napięcie  $E_{2\alpha}$  - przez kołowe pole przeciwbieżne o amplitudzie  $B_{2\alpha}$ , wynikającej ze wzoru:

$$E_{2\alpha} = 4 B f z_a k_{ua} \alpha_i \tau_p L B_{2\alpha} \quad (12)$$

gdzie:

$\tau_p$  - podziałka biegunowa maszyny,

$L$  - długość maszyny,

$\alpha_i$  - współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej,

$z_a$  - liczba zwojów fazy a stojana,

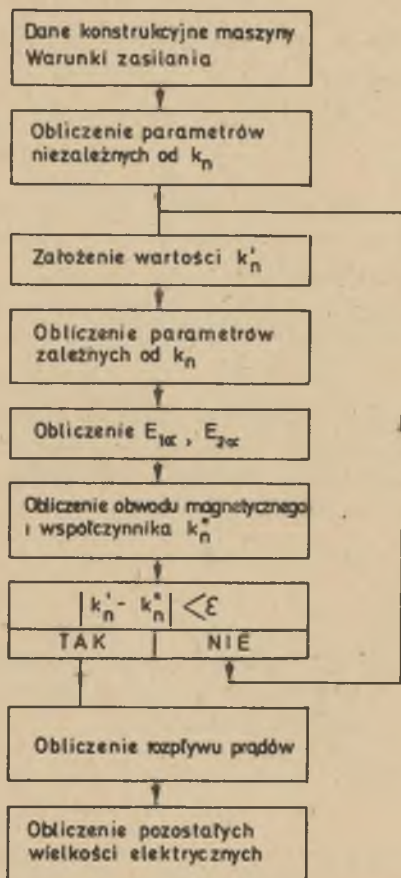
$k_{ua}$  - współczynnik uzwojenia fazy a stojana.

Maksymalna indukcja magnetyczna  $B_{mx}$  w szczelinie maszyny jest równa sumie amplitud składowej współbieżnej i przeciwbieżnej pola magnetycznego:

$$B_{mx} = B_{1\alpha} + B_{2\alpha} \quad (13)$$

zaś minimalna indukcja magnetyczna  $B_{min}$  - różnicy:

$$B_{min} = B_{1\alpha} - B_{2\alpha} \quad (14)$$



Rys. 5. Proponowana metoda obliczeń obwodu elektromagnetycznego indukcyjnej maszyny jednofazowej

Wprowadzenie transmitancji  $K_{1\alpha}$  i  $K_{2\alpha}$  i wykorzystanie wzorów (3) (4), w miejsce wzorów (1), (2) eliminuje zewnętrzną pętlę iteracyjną, konieczną do ustalenia wartości  $E$  w schemacie blokowym na rys. 1.

Nowy schemat blokowy przedstawia rys. 5. Uproszczenie struktury schematu blokowego i zastąpienie dwóch pętli iteracyjnych - jedną, posiada istotne znaczenie przy obliczeniach obwodów elektromagnetycznych maszyn metodami numerycznymi, skracając czas obliczeń.

Ponadto w schemacie blokowym z rys. 1 niedokładność ustalenia wartości dotyczy dwóch wielkości - napięcia  $E$  (dokładność  $\epsilon$ ) oraz współczynnika nasycenia  $k_n$  (dokładność  $\delta$ ), natomiast na schemacie blokowym z rys. 5 - tylko współczynnika nasycenia  $k_n$ . Stąd też błąd wyznaczenia wielkości elektromagnetycznych w metodzie klasycznej (możliwość niekorzystnego ustalenia się zarówno wartości  $E$ , jak i  $k_n$ ) jest większy niż w metodzie proponowanej.

Przedstawiona metodyka obliczeń obwodów elektromagnetycznych może być z powodzeniem wykorzystana w projektowaniu indukcyjnych maszyn 3-fazowych.

#### LITERATURA

- [1] Dubicki B.: Maszyny elektryczne t. III. Silniki indukcyjne. PWN, Warszawa, 1964.
- [2] Jermolin N.: Elektricheskiye mashiny maloy moszcznosti. Moskwa, 1967.
- [3] Kluszczyński K.: Analiza obwodu elektromagnetycznego 1-fazowego indukcyjnego silnika z kondensatorem pracy o uzwojeniach stojana typu T. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. "Elektryka" z. 47, Gliwice, 1975.
- [4] Kozłowski H., Turowski E.: Silniki indukcyjne. PWN, Warszawa, 1961.

- [5] Paszek W., Mikeiewicz R.: Porównanie charakterystyk 1-fazowego silnika indukcyjnego z kondensatorem pracy o uzwojeniu stojana w układzie T lub L. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. "Elektryka", z. 51, Gliwice, 1976.
- [6] Postnikow J.: Projektowanie elektrycznych maszyn. Kijów, 1960.
- [7] Pustoła J., Śliwiński T.: Budowa i działanie silników 1-fazowych. PWN, Warszawa, 1964.

Przyjęto do druku w lipcu 1977 r.

РАСЧЁТНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНЫХ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РАБОЧИМ КОНДЕНСАТОРОМ

Р е з ю м е

Представлена расчётная схема электромагнитных цепей пригодна при проектировании однофазных асинхронных двигателей с рабочим конденсатором при использовании ЭВМ. Введены новые передаточные функции, которые облегчают расчёт на вычислительной машине. Благодаря исключению одной итерационной петли упрощается расчётная схема.

CALCULATION ALGORITHM OF THE ELECTRO-MAGNETIC CIRCUIT OF THE  
INDUCTION SINGLE-PHASE CAPACITOR MOTOR

S u m m a r y

Calculation algorithm of the electro-magnetic circuit of the induction single-phase capacitor motor was developed. The new proposed transfer functions enable simplification of the computational scheme.