

Zygmunt SZYMAŃSKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

METODA ANALIZY OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO
Z NIESYMETRIĄ WEWNĘTRZNĄ

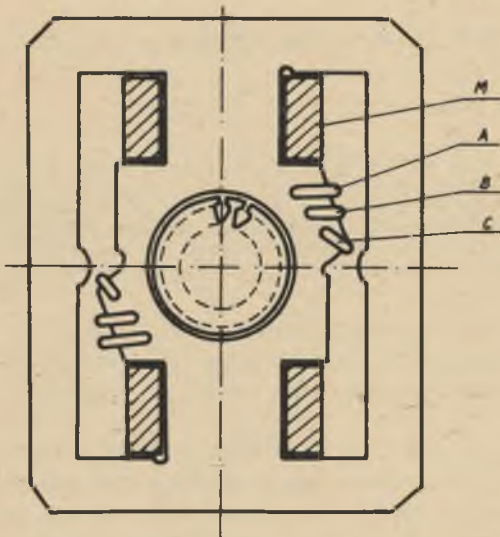
Streszczenie. Przedstawiono metodykę analizy obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego z wewnętrzną niesymetrią: magnetyczną i elektryczną, za pomocą metody schematów zastępczych o parametrach skupionych. Analizę przeprowadzono na przykładzie jednofazowego silnika z kilkoma zwojami zwartymi na biegunie. W celu sprawdzenia dokładności metody przeprowadzono weryfikację pomiarową wyników obliczeń dla silnika typu SAZ-1,9.

1. UWAGI WSTĘPNE

Klasycznym przykładem silnika indukcyjnego z wewnętrzną niesymetrią elektryczną i magnetyczną jest silnik indukcyjny ze zwartą fazą pomocniczą. Niesymetria obwodu elektrycznego jest spowodowana: różną liczbą zwojów poszczególnych uzwojeń oraz różnym przekrojem przewodów nawojowych. Niesymetria obwodu magnetycznego jest spowodowana: nierównomiernym rozmieszczeniem osi uzwojeń stojana, nierównomierną szczeliną powietrzną oraz konfiguracją obwodu magnetycznego silnika. Niesymetrie te utrudniają stworzenie wiernego modelu matematycznego silnika. Silnik indukcyjny ze zwartą fazą pomocniczą był przedmiotem badań i analiz wielu autorów [1]-[4]. Wspólnym założeniem dla ww. metod jest założenie: $\mu_{Fe} = \text{const}$, w ferromagnetycznych elementach silnika. W artykule przedstawiono próbę analizy obwodu magnetycznego silnika metodą schematów zastępczych o parametrach skupionych. Metoda ta umożliwia uwzględnienie, w sposób przybliżony, w obliczeniach magnetycznych spadków magnetycznych nie tylko w szczelinie powietrznej, lecz również w ferromagnetycznych elementach obwodu magnetycznego oraz określenie stopnia nasycenia poszczególnych elementów obwodu magnetycznego silnika.

2. OGÓLNE ZAŁOŻENIA ANALIZY OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA Z NIESYMETRIĄ WEWNĘTRZNA

Własności pola magnetycznego w materiałach para- i ferromagnetycznych można przedstawić za pomocą równań Maxwella. Dokładne rozwiązanie analityczne tych równań dla obwodu magnetycznego konkretnego silnika, przy uwzględnieniu skomplikowanego kształtu poszczególnych składowych elementów obwodu, nieliniowości charakterystyki magnesowania jest niemożliwe, ponieważ dla każdego składowego elementu otrzymuje się równanie różniczkowe o współczynnikach nieliniowych.



Rys. 1. Obwód magnetyczny silnika indukcyjnego z 3 zwojami zwartymi na biegunie

stosowano metodę schematów zastępczych o parametrach skupionych. Na rys. 1 przedstawiono obwód magnetyczny silnika indukcyjnego z trzema zwojami zwartymi na biegunie.

Obwód magnetyczny silnika dzielimy wzdłuż poszczególnych rurek linii pola magnetycznego na elementarne części, które w schemacie zastępczym są reprezentowane przez zastępcze reluktancje R_{m1} . Uzwojenia stojana: M, A, B, C oraz zastępcze uzwojenia wirnika: 1, ..., m są w schemacie zastępczym reprezentowane przez SMM: F_M, F_A, F_B, F_C oraz $F_{w1}, F_{w2}, \dots, F_{wm}$.

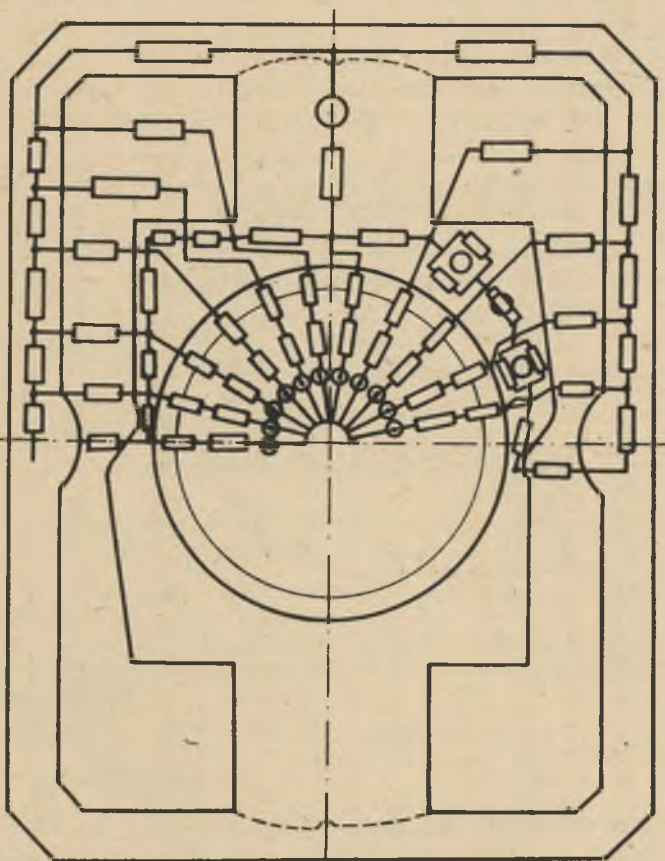
Na rys. 2 przedstawiono obwód magnetyczny silnika z zaznaczonymi wymuszeniami oraz zastępczymi reluktancjami. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego przyjęto przy następujących założeniach:

- linie pola magnetycznego przenikają radialnie przez szczelinę powietrzną,
- pomijamy straty w rdzeniu stojana,
- indukcja magnetyczna w każdym miejscu składowego elementu jest jednokowa; pomijamy efekty brzegowe,

tyczne tych równań dla obwodu magnetycznego konkretnego silnika, przy uwzględnieniu skomplikowanego kształtu poszczególnych składowych elementów obwodu, nieliniowości charakterystyki magnesowania jest niemożliwe, ponieważ dla każdego składowego elementu otrzymuje się równanie różniczkowe o współczynnikach nieliniowych.

Do analizy obwodu magnetycznego różnych typów maszyn elektrycznych stosuje się, oprócz metody klasycznej, metody: elementów skończonych, różnic skończonych oraz metodę schematów zastępczych o parametrach skupionych.

Do analizy obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego ze zwartą fazą pomocniczą za-

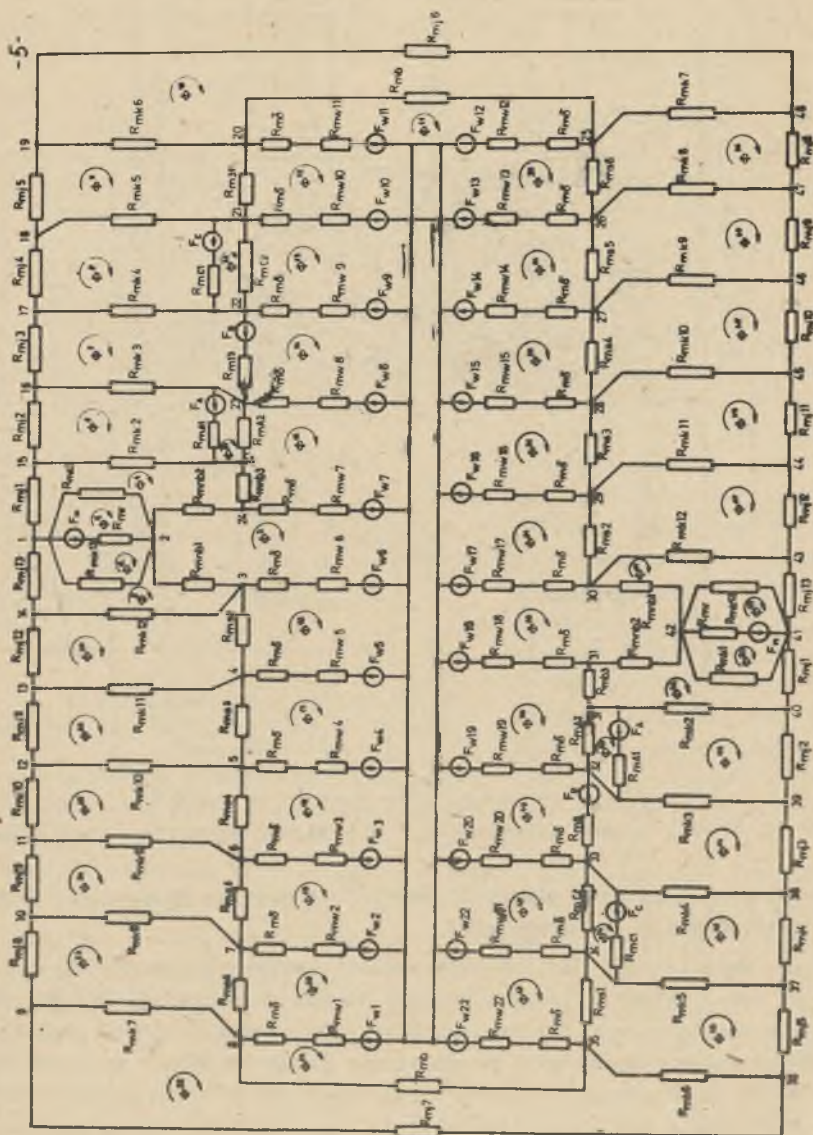


Rys. 2. Wykrój blachy silnika SAZ-1,9 z zaznaczonymi reluktancjami

d) reluktancja składowego elementu obwodu jest zależna od wartości indukcji maksymalnej w tym elemencie.

Punktem wyjścia do komponowania schematu zastępczego obwodu magnetycznego jest wykrój blachy wirnika - liczba żłobków wirnika. Obwód magnetyczny wirnika dzielimy na k rurek magnetycznych, przez które przechodzi całkowity strumień magnetyczny przenikający przez wirnik. Składowe elementy obwodu magnetycznego wirnika, obejmujące ząb i część jarzma, zastępujemy w schemacie zastępczym reluktancją R_{mwi} . Obwód elektryczny wirnika jest w schemacie zastępczym reprezentowany przez SMM F_{w1} , przy czym: $i = 1, \dots, m$.

Przestrzeń między obwodem magnetycznym stojana i wirnika dzielimy na m części.



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego silnika SAZ-1,9 z trzema zwojami zwartymi

Poszczególne składowe elementy szczeliny powietrznej są w schemacie zastępczym reprezentowane przez reluktancję: $R_{m\delta i}$. Dla równomiernej szczeliny powietrznej: $\delta = \text{const}$ - reluktancja składowych elementów jest identyczna: $R_{m\delta i} = \text{const}$, dla nierównomiernej szczeliny powietrznej: $\delta = \text{var}$ - poszczególne elementy składowe będą miały różną wartość reluktancji: $R_{m\delta i} = \text{var}$.

Liczba rurek magnetycznych wirnika określa liczbę składowych elementów, na którą należy podzielić obwód magnetyczny stojana. Składowe elementy obwodu magnetycznego stojana są w schemacie zastępczym reprezentowane przez zastępcze reluktancje:

- R_{mr} - biegun główny,
- R_{mnb} - nabiegunniki,
- R_{mj_1} - elementy składowe jarzma,
- R_{mb} - bocznik magnetyczny,
- R_{ms_1} - elementy obwodu magnetycznego nie ekranowane przez zwoje zwarte,
- R_{mA}, R_{mB}, R_{mC} - elementy obwodu magnetycznego ekranowane przez zwoje zwarte: A, B, C.

Zwoje zwarte występujące w obwodzie elektrycznym stojana można w schemacie zastępczym uwzględnić przez:

- dodatkowe reluktancje: $R'_{mA}, R'_{mB}, R'_{mC}$ [5],
- siły magnetomotoryczne: F_A, F_B, F_C .

Obszar między biegunem głównym, jarzmem stojana i nabiegunnikami, przez który przenika część strumienia magnetycznego wytworzona przez uzwojenie główne M, jest w schemacie zastępczym reprezentowany przez reluktancję R_{mk1} . Schemat zastępczy silnika indukcyjnego z 3 zwojami zwartymi przedstawiono na rys. 3.

Wartości poszczególnych reluktancji występujących w schemacie zastępczym można obliczyć znając: wymiary geometryczne obwodu magnetycznego silnika oraz charakterystykę magnesowania: $B = f(H)$ blachy magnetycznej, z której wykonano obwód magnetyczny silnika.

Na rys. 4-7 przedstawiono przebieg charakterystyk: $U_m = f(\Phi)$ oraz $R_m = f(\Phi)$ dla składowych elementów obwodu magnetycznego silnika SAZ-1,9. Tak skonstruowany schemat zastępczy obwodu magnetycznego silnika umożliwia obliczenie: rozpięty strumieni magnetycznych, określenie wartości maksymalnej indukcji w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego, strumieni rozproszenia stojana oraz określenie rozkładu indukcji w szczelinie powietrznej dla różnych stanów pracy silnika.

3. ANALIZA OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO ZE ZWARTĄ FAZĄ POMOCNICZĄ

Analizę obwodu magnetycznego silnika ze zwartą fazą pomocniczą przeprowadzono dwustopniowo. Obliczenia wstępne wykonano przy założeniu, że: wszystkie reluktancje występujące w schemacie zastępczym mają wartość stałą: $R_{mi} = \text{const}$. Na podstawie schematu zastępczego silnika (rys. 3), wykorzystując metodę strumieni oczkowych, można napisać układ równań liniowych opisujących obwód magnetyczny silnika:

$$[F] = [R_m] [\Phi^1] \quad (1)$$

gdzie:

$[F]$ - kolumnowa macierz wymuszeń zespolonych,

$[R_m]$ - macierz reluktancji zastępczych,

$[\Phi^1]$ - kolumnowa macierz strumieni oczkowych.

Dla silnika SAZ-1,9 z 3 zwojami zwartymi na biegunie otrzymano układ 54 równań liniowych o wymuszeniach zespolonych. Po rozwiązaniu układu równań (1) można określić wartości strumieni przenikających przez poszczególne fragmenty obwodu magnetycznego według równania (2)

$$\Phi_{1-k} = \Phi^1 - \bar{\Phi}^k \quad (2)$$

gdzie:

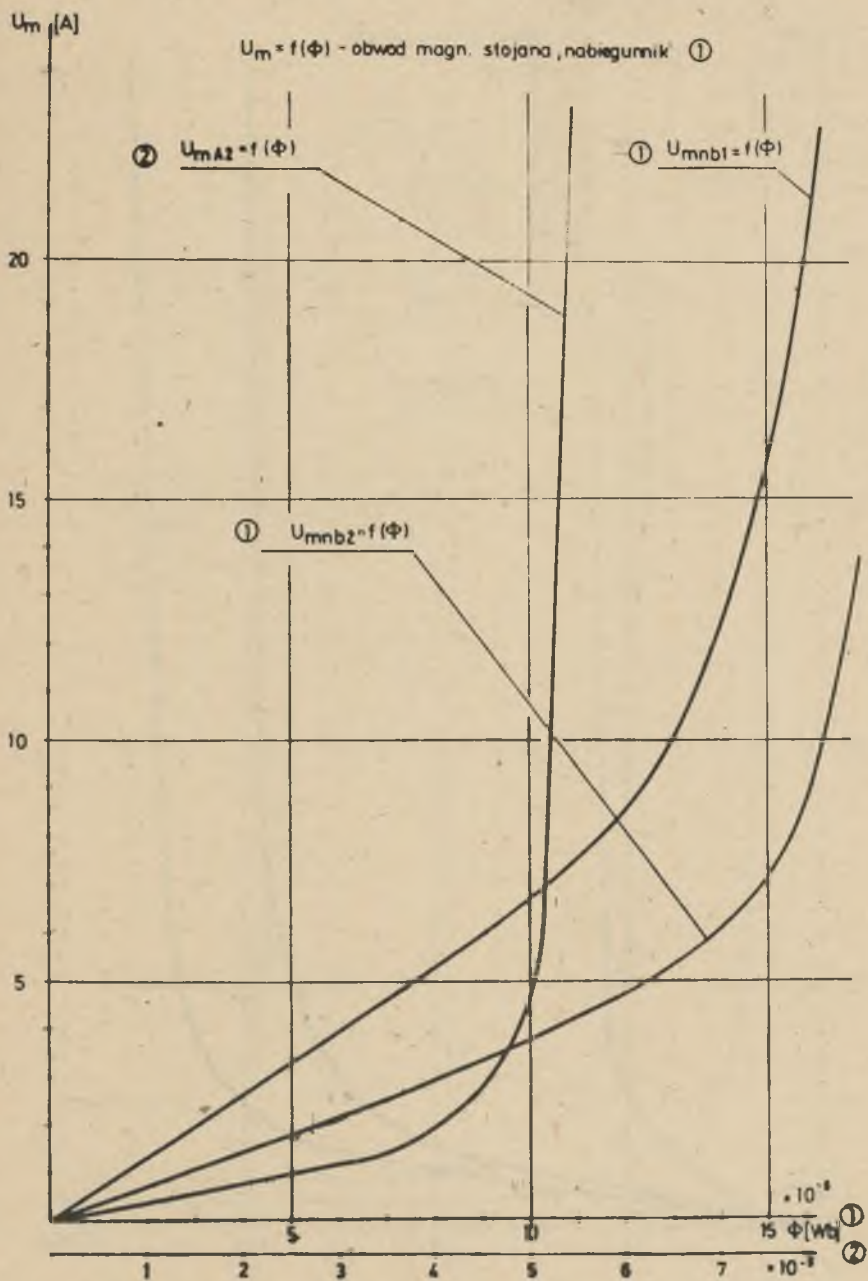
Φ_{1-k} - strumień magnetyczny przenikający dany fragment obwodu magnetycznego,

$\Phi^1, \bar{\Phi}^k$ - wartości strumienia magnetycznego w i,k-tym oczku.

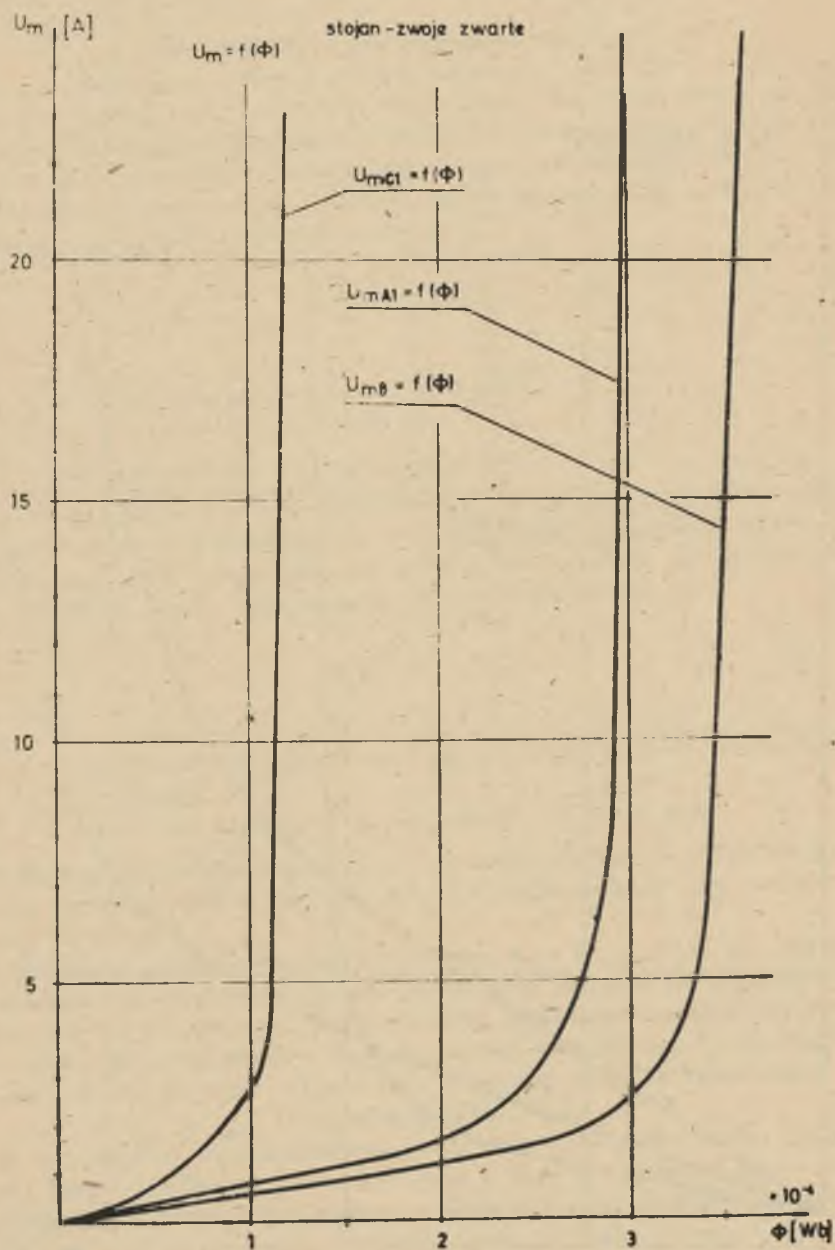
Uwzględnienie wpływu nasycenia obwodu magnetycznego na reluktancję zastępczą poszczególnych elementów (rys. 4-7) przeprowadza się metodą kolejnych przybliżeń.

Zakładamy początkową wartość strumienia: $\Phi_b = \Phi_{B-35}$ (rys. 3) przewężeniu obwodu magnetycznego stojana, identyczną jak przy obliczeniach wstępnych. Ponadto przyjmujemy, że: strumienie rozproszona przenikająca przez okno między biegunem głównym, nabiegunnikami oraz jarzmem stojana mają taką samą wartość jak przy obliczeniach wstępnych oraz że wymuszenia: F_M, F_A, F_B, F_C i $F_{w1} \dots F_{wm}$ nie ulegną zmianie.

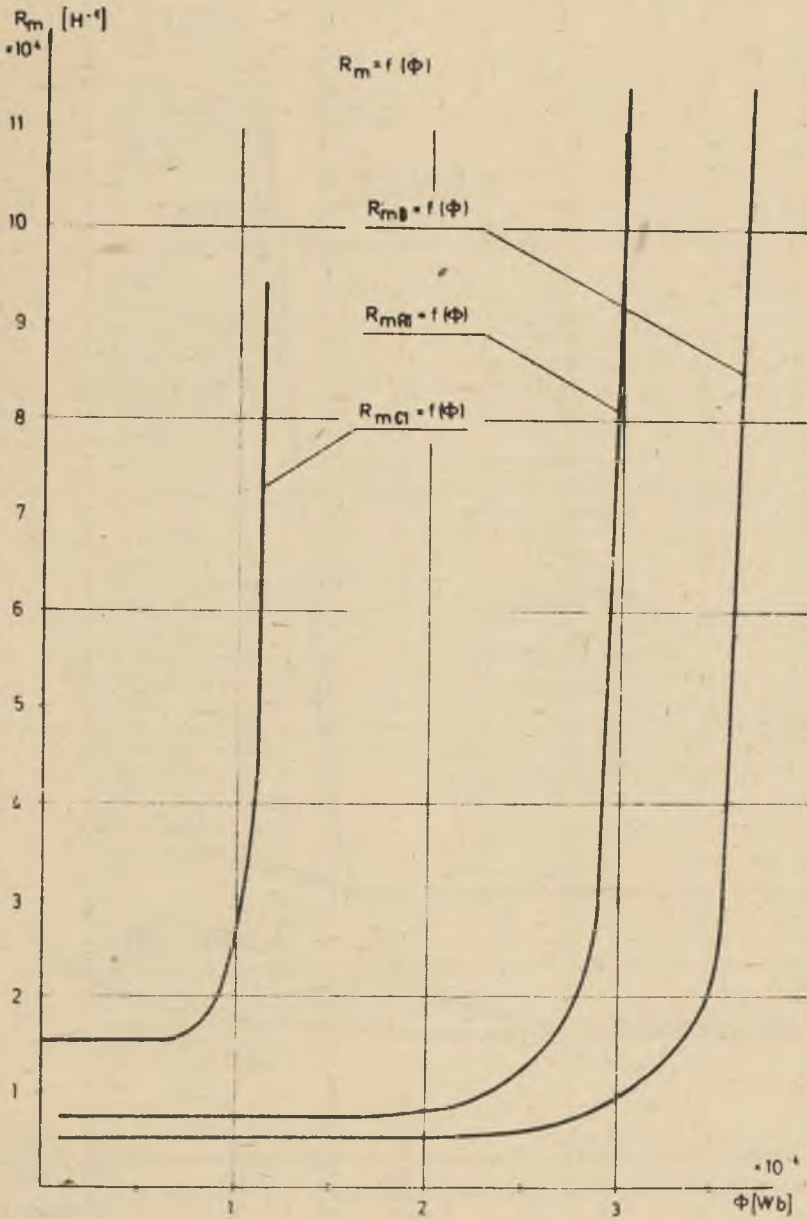
Na podstawie struktury schematu zastępczego, po odpowiednich obliczeniach, można określić wartość strumienia w biegunie głównym: Φ_{1-2} . Strumień ten porównujemy ze strumieniem odniesienia. W przypadku uzyskania różnicy: $\delta = \Phi_{1-2} - \Phi_{odn} \neq 0$, zakładamy nową wartość strumienia Φ_b i powtarzamy obliczenia do momentu uzyskania $\delta \approx 0$. Obliczamy wówczas wartości współczynników nasycenia poszczególnych elementów obwodu magnetycznego, zdefiniowanych jako:



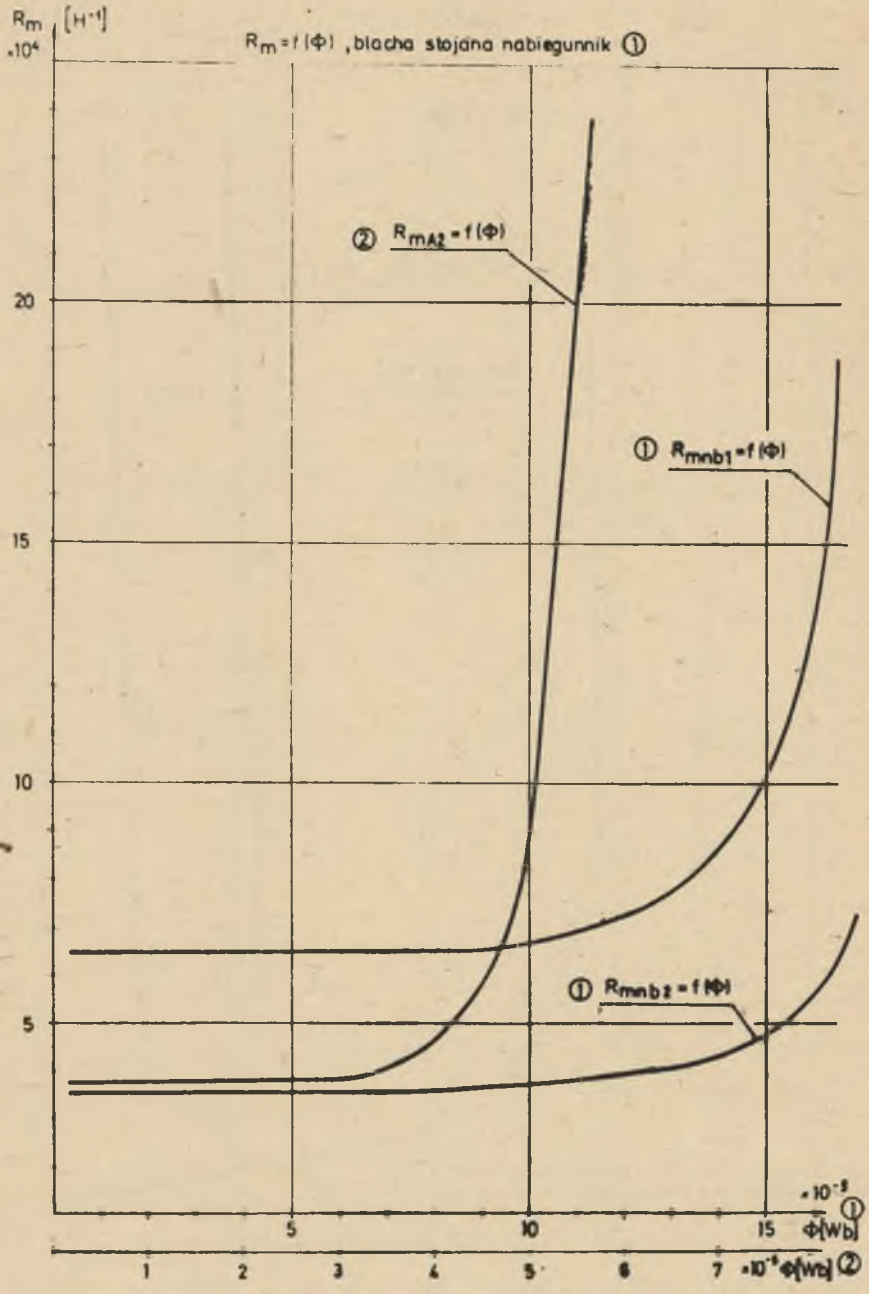
Rys. 4. Charakterystyki $U_m = f(\Phi)$ blachy stojana



Rys. 5. Charakterystyki $U_m = f(\Phi)$ dla fragmentów blachy stojana objętych przez zwoje zwarte



Rys. 6. Charakterystyki $R_m = f(\Phi)$ poszczególnych fragmentów obwodu magnetycznego stojana



Rys. 7. Charakterystyki $R_m = f(\Phi)$ blachy stojana

$$k_{n1} = \frac{U_{m1}^n}{U_{m1}^o} \quad (3)$$

gdzie:

- U_{m1}^n - spadek napięcia magnetycznego na i-tym elemencie obwodu magnetycznego dla $\mu_{Fe} = \text{var}$,
 U_{m1}^o - spadek napięcia magnetycznego na i-tym elemencie obwodu magnetycznego dla $\mu_{Fe} = \text{const}$.

Obliczone współczynniki nasycenia podstawiamy do odpowiednich wzorów na obliczenie indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń silnika indukcyjnego ze zwartą fazą pomocniczą [6] i korygujemy wartości wymuszeń: F_N , F_A , F_B , F_C oraz F_{w1} . Obliczenia prowadzimy do momentu uzyskania $k_{n1} \approx 1$. Można wówczas określić: rozplływ strumieni magnetycznych w obwodzie magnetycznym silnika oraz rozkład indukcji w szczelinie powietrznej.

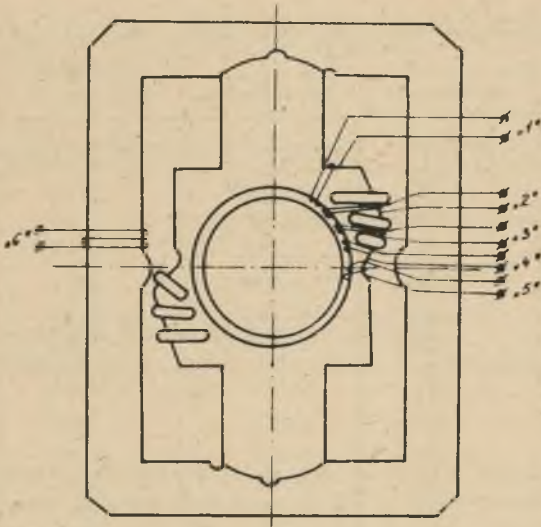
4. WERYFIKACJA POMIAROWA METODY ANALIZY

Przedstawioną metodę zastosowano do analizy obwodu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego ze zwartą fazą pomocniczą. W celu sprawdzenia dokładności i przydatności metody do analizy silników indukcyjnych z wewnętrzną niesymetrią elektryczną i magnetyczną opracowano algorytm obliczeń oraz program na maszynę cyfrową. Uproszczony schemat blokowy obliczeń przedstawiono na rys. 8. Obliczenia sprawdzające wykonano dla silnika SAZ-1,9 z różną liczbą zwojów zwartych na biegunie. W celu weryfikacji pomiarowej przedstawionej metody analizy przeprowadzono badania laboratoryjne obwodu magnetycznego silnika SAZ-1,9. W tym celu nawinięto na wybranych elementach obwodu magnetycznego silnika cewki pomiarowe do pomiaru strumienia przenikającego dany fragment obwodu. Aby pomierzyć strumień magnetyczny, zastosowano układ pomiarowy złożony ze wzmacniacza sygnału, integratora oraz amplifiltru (do pomiaru 1 harm. czasowej strumienia).

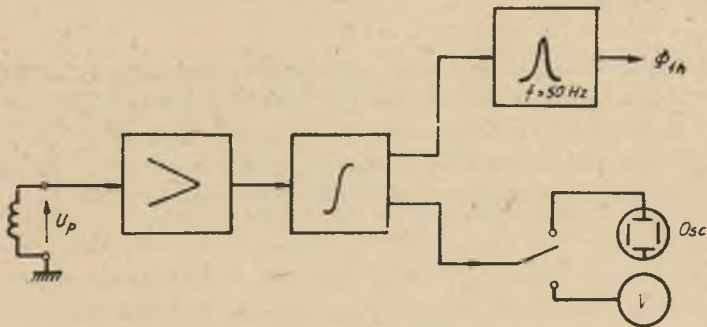
Wykrój blachy silnika z zaznaczonymi cewkami pomiarowymi przedstawiono na rys. 9, a schemat blokowy układu pomiarowego na rys. 10.

Porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów dla strumieni przenikających poszczególne fragmenty obwodu magnetycznego silnika, dla różnych stanów pracy przedstawiono w tabeli I.

Stosunkowo duże rozbieżności (około 20%) między wielkościami obliczonymi i pomierzonymi strumieni przenikających poszczególne fragmenty obwodu magnetycznego silnika są spowodowane: błędami pomiarowymi oraz pominięciem w analizie strat mocy czynnej w rdzeniu obwodu magnetycznego silnika.



Rys. 9. Wykroj blachy silnika SAZ-1 9 z zaznaczonymi cewkami pomiarowymi



Rys. 10. Schemat blokowy układu pomiarowego strumieni magnetycznych

Tabela I

Liczba zwojów zwartych	Numer cewki pomiarowej	s = 0,01		s = 1	
		pomierzone	obliczone	pomierzone	obliczone
		Φ [Wb] $\times 10^{-4}$	Φ [Wb] $\times 10^{-4}$	Φ [Wb] $\times 10^{-4}$	Φ [Wb] $\times 10^{-4}$
2 zwoje zwarte	1	1,06	0,910	0,58	0,467
	2	1,02	0,861	0,52	0,395
	3	0,98	0,838	0,44	0,351
	4	0,96	0,815	0,34	0,307
	5	0,87	0,760	0,32	0,296
	6	1,25	1,070	0,90	0,746
3 zwoje zwarte	1	1,20	1,0	0,64	0,466
	2	1,12	0,95	0,59	0,459
	3	1,06	0,94	0,52	0,403
	4	1,02	0,897	0,45	0,360
	5	0,98	0,88	0,42	0,330
	6	1,58	1,17	1,06	0,810

5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawioną w artykule metodę schematów zastępczych o parametrach skupionych można wykorzystać do analizy obwodu magnetycznego silników indukcyjnych z niesymetrią wewnętrzną: elektryczną i magnetyczną. Metoda ta jest szczególnie przydatna przy analizie wpływu asymetrii obwodu magnetycznego oraz anizotropii blach na własności ruchowe silników.

LITERATURA

- [1] Butler O.I., Wallace A.K.: Generalised theory of induction motors with asymmetrical primary windings and its application to the analysis and performance prediction of shaded - pole motors. Proc. IEE 1968, 115, No 5 pp. 685-694.
- [2] Chang S.S.L.: Equivalent circuits and their application in designing shaded - pole induction motors. Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. 1952, 70, Pt. I, pp. 690-699.
- [3] Perret R., Poloujadoff M.: Characteristics analysis of saturated shaded - pole induction motors. Trans. Power Appar. and Syst. IEE 1976, 95, No 4, pp. 1347-1352.
- [4] Puchała A.: Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych. PWN, Warszawa 1977.
- [5] Praca zbiorowa: Rasczut odnofaznych asinchronnych dwigatielej z kotkozamknutym witkom. Raport Komisji INTER-ELEKTRO, Moskwa 1978.

- [6] Szymański Z.: Wpływ parametrów konstrukcyjnych silnika indukcyjnego ze zwartą fazą pomocniczą na jego parametry elektromechaniczne. Praca doktorska. Gliwice 1980.

Wpłynęło do redakcji 8 VI 1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

МЕТОД АНАЛИЗА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ВНУТРЕННЕЙ АСИММЕТРИЕЙ

Р е з ю м е

В статье представлена методика анализа магнитной цепи асинхронного двигателя с внутренней асимметрией: электрической и магнитной при помощи метода эквивалентных схем со скопленными параметрами. Анализ проведен по примеру однофазного двигателя с несколькими экранизированными обмотками на полюсе. Для проверки точности метода проведено установление измерительной достоверности результатов расчетов для двигателя типа SA3-1,9.

THE ANALYSIS OF A MAGNETIC CIRCUIT OF THE INDUCTION
MOTOR WITH INSIDE ASYMMETRY

S u m m a r y

The analysis of a magnetic circuit of the induction motor with inside asymmetry: electrical and magnetical, with the aid of equivalent circuits method at concentrated parameters is described. The analysis was performed on an example of single phase shaded-pole motor with some shorted windings in the pole. To check the method's accuracy, the measuring verification of the computed results for the SAZ-1.9 motor type was carried out.