ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: ELEKTRYKA z. 98 Nr kol. 859

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

WPŁYW MOMENTÓW PASOŻYTNICZYCH NA ROZRUCH INDUKCYJNEGO SILNIKA KLATKOWEGO

Streszczenie. Omówiono nową metodę wyznaczania momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych, bazującą na modelu matematycznym maszyny we współrzędnych k-osiowych. Scharakteryzowano mechanizmy generowania tych momentów i przedstawiono tabelę, określającą prędkości synchroniczne oraz okresy charakterystyk kątowych momentów synchronicznych I rzędu. Jako przykład rozważono silnik klatkowy, w którym pasożytnicze momenty synchroniczne są wytworzone przez harmoniczne żłobkowe przepływu. Wyznaczono momenty synchroniczne oraz prawdopodobieństwo ich synchronizacji w trakcie rozruchu w oparciu o uproszczoną metodę analityczną, zaproponowaną przez B. Hellera i V. Hamatę. W celu weryfikacji tej metody przeprowadzono symulację rozruchu silnika na EMC przy różnych początkowych położeniach wirnika i przy różnych momentach obciążenia maszyny. Omówiono wpływ momentów pasożytniczych na przebiegi nieustalone prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego oraz prądu silnika.

1. WPROWADZENIE

Własności eksploatacyjne indukcyjnych maszyn klatkowych w istotny sposób zależą od wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu, wytwarzanych przez uzwojenie stojana i wirnika. O tym, jakie harmoniczne przestrzenne przepływu powstają w maszynie i jakie wartości przyjmują ich amplitudy, decyduje w pierwszym rzędzie liczba żłobków stojana $Ż_1$, liczba żłobków wirnika $Ż_2$ oraz typ uzwojenia stojana (liczba stref, współczynniki uzwojeń dla poszczególnych harmonicznych itd). Ponadto wpływ na amplitudy mają takie cechy konstrukcyjne, jak: otwarcie żłobków, skos żłobków wirnika, izolacja prętów wirnika itp. Wyższe harmoniczne przestrzenne są przyczyną drgań, hałasów magnetycznych oraz strat dodatkowych. W wyniku elektromagnetycznego współdziałania wyższych harmonicznych przestrzennych powstają w maszynie pasożytnicze momenty elektromagnetyczne, zniekształcające charakterystykę mechaniczną, związaną z główną harmoniczną przestrzenną. W interpretacji fizycznej z pasożytniczymi momentami można związać umyślone, fikcyjne maszyny asynchroniczne i synchroniczne, zwane dalej maszynami elementarnymi. Elementarne maszyny asynchroniczne wytwarzają pasożytnicze momenty asynchroniczne o różnych prędkościach idealnego biegu jałowego, zaś elementarne maszyny synchroniczne-pasożytnicze momenty synchroniczne o

różnych prędkościach synchronicznych (przy prędkościach różnych od synchronicznej mają one charakter momentów przemiennych o wartości średniej zero). Momenty synchroniczne powstają przy zatrzymanym wirniku ($\omega = 0$) oraz przy prędkościach wirnika, określonych wzorem:

$$\omega = \pm \frac{2\omega_o}{c\,Z_2}.$$

gdzie: ω_o - częstotliwość napięcia zasilającego, c - dodatnia liczba całkowita.

Różnym elementarnym maszynom synchronicznym mogą odpowiadać te same prędkości synchroniczne. Wartość momentu synchronicznego jest uzależniona od kąta elektrycznego zawartego pomiędzy przepływem stojana i wirnika („twornika" i „wzbudzenia") elementarnej maszyny synchronicznej. „Wzbudnicę" elementarnej maszyny synchronicznej stanowi uzwojenie stojana lub wirnika innej maszyny elementarnej. Zmiana położenia osi przepływu uzwojenia, pełniącego rolę uzwojenia wzbudzenia, następuje w wyniku chwilowego przyśpieszenia wirnika, a więc poprzez zmianę kąta mechanicznego, zawartego pomiędzy osią fazy odniesienia stojana i osią fazy odniesienia wirnika w chwili dojścia maszyny do stanu ustalonego (w chwili zaistnienia stanu ustalonego). Względem tego kąta moment synchroniczny elementarnej maszyny synchronicznej wyraża się wzorem:

$$M_s = M_{mx} \sin c\, Z_2(\vartheta - \vartheta_o) \qquad (1)$$

gdzie: ϑ_o - kąt mechaniczny, przy którym moment synchroniczny elementarnej maszyny synchronicznej przyjmuje wartość zero.

Charakterystyka kątowa momentu synchronicznego dowolnej elementarnej maszyny synchronicznej opisana wzorem (1) jest funkcją sinusoidalną o okresie $\frac{2\pi}{cZ_2}$. Podziałka żłobkowa wirnika jest najmniejszą wspólną wielokrotnością okresów wszystkich charakterystyk kątowych. Elementarne maszyny synchroniczne o wspólnej prędkości synchronicznej posiadają charakterystyki kątowe momentów o takim samym okresie $\frac{2\pi}{cZ_2}$, lecz o różnych wartościach kąta ϑ_o. Przy określaniu amplitudy wypadkowego momentu synchronicznego dla danej prędkości należy więc uwzględnić ich wzajemne przesunięcie. W praktyce często wyznaczenie amplitudy wypadkowego momentu synchronicznego zastępuje się oszacowaniem jej wartości od góry poprzez zsumowanie amplitud momentów poszczególnych elementarnych maszyn synchronicznych. Na charakterystyce mechanicznej maszyny indukcyjnej, uwzględniającej momenty asynchroniczne, momenty synchroniczne zaznacza się jako piki o długości odpowiadającej podwójnej amplitudzie momentu synchronicznego.

W maszynach indukcyjnych dąży się do ograniczenia pasożytniczych momentów synchronicznych przede wszystkim poprzez odpowiedni dobór liczby żło-

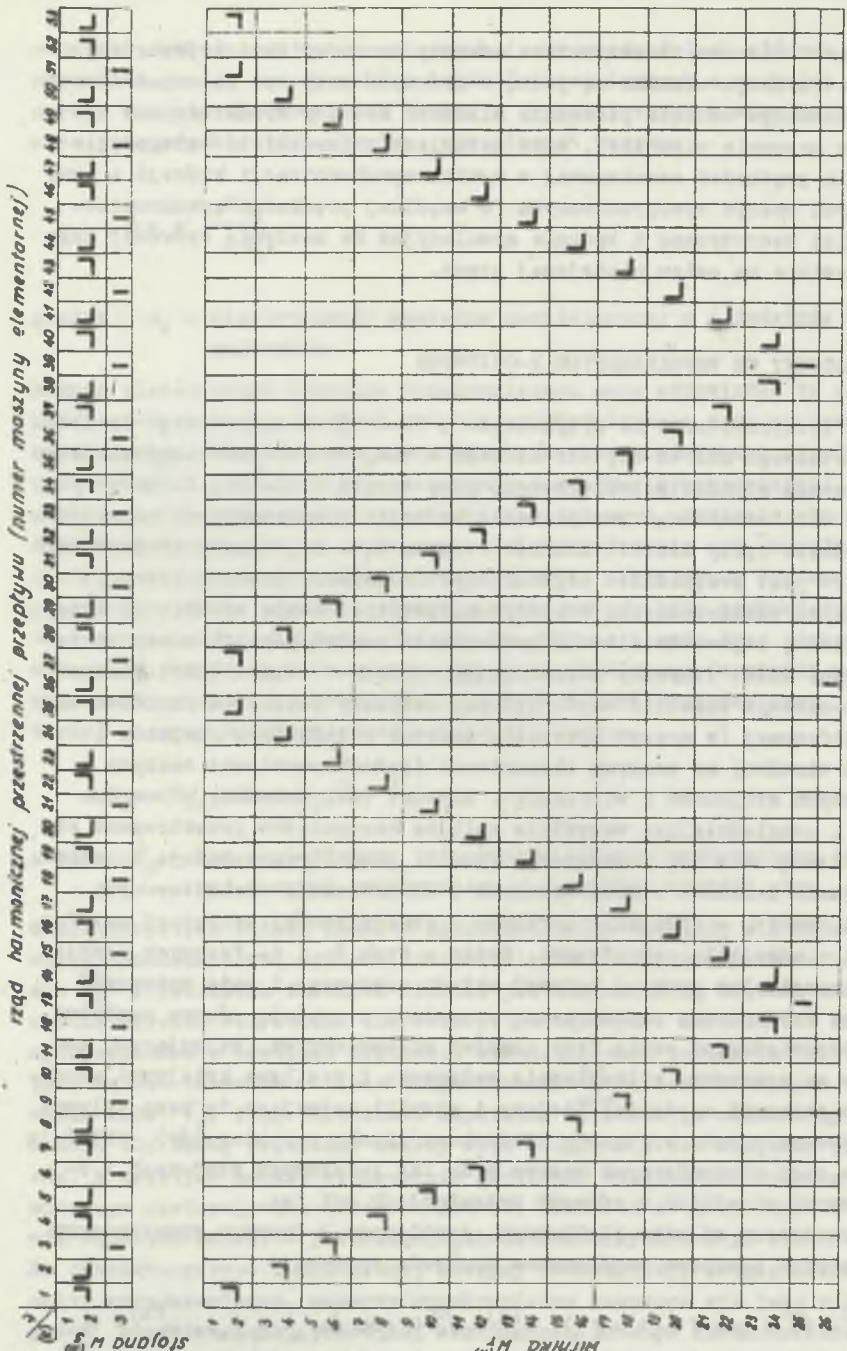
bków stojana i wirnika. Pasożytnicze momenty synchroniczne pojawiające się przy zatrzymanym wirniku są jedną z głównych przyczyn zależności momentu rozruchowego od kąta położenia wirnika. Momenty synchroniczne występujące w maszynie wirującej, mogą natomiast uniemożliwić osiągnięcie przez silnik prędkości znamionowej w wyniku synchronizacji którejś z grup elementarnych maszyn synchronicznych (o wspólnej prędkości synchronicznej). Analiza teoretyczna i badania symulacyjne na maszynie cyfrowej tego właśnie zjawiska są celem niniejszej pracy.

2. MODEL MASZYNY WE WSPÓŁRZĘDNYCH k-OSIOWYCH

Analizę przeprowadzono na przykładzie 3-fazowego 2-biegunowego (p=1) silnika klatkowego Skf 63-2B, dla którego w miejsce rzeczywistego siedemnastożłobkowego wirnika zaprojektowano nowy wirnik o liczbie żłobków $Ż_2 = 26$, w celu sztucznego powiększenia wartości pasożytniczych momentów synchronicznych (przy liczbie żłobków stojana $Ż_1 = 24$, liczba żłobków wirnika $Ż_2 = 26$ jest przypadkiem najniekorzystniejszym). Analizę oparto o k-osiowy układ współrzędnych, w którym najprościej można wyodrębnić maszyny elementarne, odpowiedzialne za generowanie poszczególnych momentów pasożytniczych. Model fizyczny odpowiadający układowi równań różniczkowych maszyny w k-osiowym układzie współrzędnych nazywamy schematem rozkładu maszyny wielofazowej (w naszym przypadku maszyny o 3-fazowym stojanie i 26-fazowym wirniku) na maszyny elementarne (jednoharmoniczne maszyny o 2-i 1-fazowych stojanach i wirnikach). Schemat ten, omówiony w pracach [3] i [4], uwzględniający wszystkie kolejne harmoniczne przestrzenne aż do harmonicznej $\Omega = 53$, przedstawia rys. 1. Znak ⅃ reprezentuje symetryczne uzwojenia 2-fazowe o prostopadłych i lewostronnie zorientowanych osiach faz, znak L - uzwojenie 2-fazowe o prawostronnej orientacji osi faz, zaś znak | - uzwojenie jednofazowe. Każde z tych 2- i 1- fazowych uzwojeń posiada sinusoidalny rozkład krzywej obkładu prądowego i może wytwarzać tylko jedną harmoniczną przestrzenną przepływu o rzędzie równym numerowi kolumny. Odpowiadające sobie fazy uzwojeń elementarnych, zajmujących ten sam wiersz są szeregowo galwanicznie połączone i zasilane kolejnymi współrzędnymi k-osiowymi napięcia. Stojany i wirniki zajmujące tą samą kolumnę są elektromagnetycznie sprzężone (jednakowa liczba par biegunów). Składają się one na ciąg elementarnych maszyn o 2- lub 1-fazowych stojanach i 2- lub 1-fazowych wirnikach o różnych orientacjach osi faz.

Dla rozważanego silnika klatkowego, zasilanego 3-fazowym symetrycznym układem napięć k-osiowe współrzędne napięcia wynoszą:

$$u_{s1}^{(k)} = \sqrt{3}\,U \cos(\omega_0 t + \gamma_0),\quad u_{s2}^{(k)} = \sqrt{3}\,U \sin(\omega_0 t + \gamma_0),\quad u_{s3}^{(k)} = 0,$$



Rys. 1

Schemat rozkładu maszyny o trójfazowym stojanie i 26-żłobkowym wirniku na maszyny elementarne
The diagram of a decomposition of the polyphase machine into elementary machines

zaś wszystkie współrzędne k-osiowe napięcia wirnika zerują się:

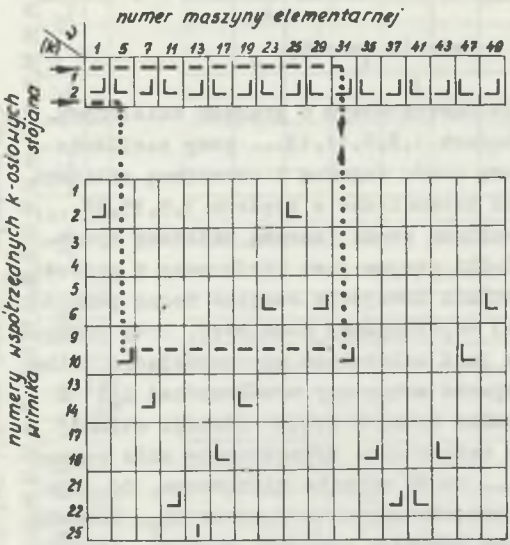
$$u_{r1}^{(k)} = u_{r2}^{(k)} = \ldots\ldots = u_{r26}^{(k)} = 0 \text{ (wirnik zwarty)}.$$

Uzwojenie stojana jest uzwojeniem jednowarstwowym o grupach dzielonych. Jego układ zawiera harmoniczne o rzędach 1,5,7,11,13... przy zasileniu pierwszą i drugą współrzędną k-osiową prądu (zgodną i przeciwną składową symetryczną w stanie ustalonym) oraz harmoniczne o rzędach 3,9,15,21.... przy zasilaniu 3-cią współrzędną k-osiową prądu (zerową składową symetryczną w stanie ustalonym) [4] . Jeśli stojan jest skojarzony w gwiazdę, wówczas: $i_{s3}^{(k)} = 0$ i na schemacie rozkładu uzwojenia stojana można pominąć drugi wiersz, odpowiadający trzeciej współrzędnej k-osiowej. Przy połączeniu faz w trójkąt, takie pominięcie jest założeniem upraszczającym, albowiem w zamkniętym trójkącie mogą pojawić się prądy współrzędnej $i_{s3}^{(k)}$ o częstotliwości różnej od częstotliwości sieci w wyniku reakcji wtórnej (ogólnie - wielokrotnej) stojana na harmoniczne przestrzenne pola magnetycznego wirnika o rzędach 3,9,15.... Co do wirnika klatkowego, to jego przepływ nie zawiera harmonicznych przestrzennych o rzędach cZ_2. Pozwala to na zrezygnowanie z 12-tego wiersza schematu rozkładu wirnika, odpowiadającego 26-tej współrzędnej k-osiowej wirnika.

Poprzez opuszczenie odpowiednich kolumn i wierszy w schemacie z rys. 1 otrzymujemy zredukowany schemat rozkładu maszyny, przedstawiony na rys. 2, odpowiadający maszynie o fazach skojarzonych w gwiazdę. Posługiwanie się tym schematem przy analizie maszyny o fazach skojarzonych w trójkąt jest przybliżeniem i wymaga dodatkowego założenia upraszczającego o nieuwzględnieniu prądów fazowych $i_{s3}^{(k)}$, cyrkulujących w zamkniętym trójkącie i momentów pasożytniczych, związanych z tymi prądami.

3. PASOŻYTNICZE MOMENTY SYNCHRONICZNE

Na schemacie rozkładu maszyny wielofazowej na maszyny elementarne, można w przejrzysty sposób przedstawić mechanizmy generowania moementów synchronicznych poprzez uwidocznienie "dróg", na których dochodzi do powstawania przepływów twornika i wzbudzenia w poszczególnych elementarnych maszynach synchronicznych. Odcinki "dróg", wyróżnione linią przerywaną odpowiadają połączeniom galwanicznym, zaś linią kropkowaną - sprzężeniom elektromagnetycznym. Przykładowo na rys. 2 zaznaczono jedną z możliwych "dróg" powstania pasożytniczego momentu synchronicznego I rzędu w 31-szej maszynie elementarnej. 31-szy stojan elementarny (twornik maszyny synchronicznej) jest zasilany bezpośrednio prądem sieci. 31-szy wirnik elementarny (uzwojenie wzbudzenia maszyny synchronicznej) jest zasilany prądem z 5-tego wirnika elementarnego (wzbudnica). W 5-tym wirniku elementarnym (wzbudnicy) siłę elektromotoryczną indukuje prąd sieci, przepływający przez



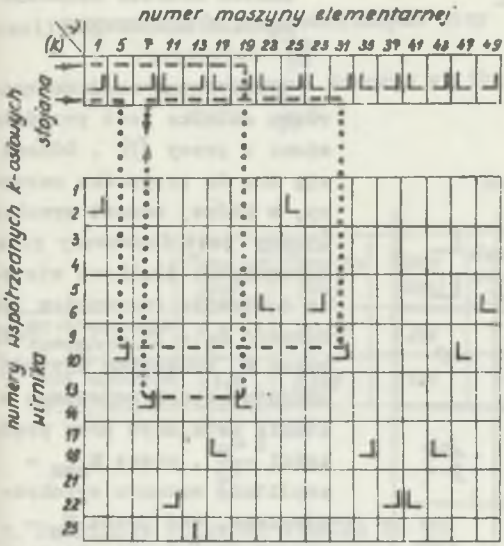
Rys. 2

Mechanizm generowania pasożytniczych momentów synchronicznych I rzędu
A principle of a generation of the parasitic synchronous torques of a first order

5-ty stojan elementarny. Moment ten oznaczamy jako $M_{s5,31}$ (ogólnie $M_{s\vartheta,\varrho}$). Pierwszy indeks wskazuje na uzwojenie wirnika, pełniące rolę wzbudnicy, zaś drugi - na maszynę elementarną, w której powstaje moment synchroniczny. Jeszcze zwięźlej: pierwszy indeks ϑ jest numerem maszyny wzbudzającej, zaś drugi ϱ - maszyny synchronicznej. Na podstawie orientacji osi faz w maszynie wzbudzającej i maszynie synchronicznej można bez trudności w oparciu o tab. 1 określić prędkość synchroniczną, w więc i okres charakterystyki kątowej momentu. Na rys. 3 przedstawiono jeden z możliwych mechanizmów powstania pasożytniczego momentu synchronicznego II rzędu w 7-mej maszynie elementarnej. Momenty synchroniczne II rzędu są wynikiem współdziałania prądów reakcji wtórnej stojana (prądy o częstotliwości różnej od częstotliwości sieci) oraz prądów wirnika o częstotliwości poślizgu s_ϑ (gdzie: $s_\vartheta = \frac{\omega_0 - \vartheta\omega}{\omega_0}$, ϑ - numer wirnika elementarnego). Momenty synchroniczne II rzędu są znacznie mniejsze od momentów synchronicznych I rzędu. Uwzględnienie kolejnych odbić prądów (reakcji wielokrotnych) prowadzi do ujawniania pasożytniczych momentów synchronicznych coraz to wyższych rzędów, których znaczenie (z technicznego punktu widzenia) jest jednak pomijalnie małe. Przy ograniczeniu liczby wyższych harmonicznych przestrzennych w rozważanej maszynie do $\Omega = 53$ (rys.2), momenty synchroniczne I rzędu powstaną wyłącznie przy prędkości $\frac{2\omega_0}{25}$ (c=1) oraz przy prędkości - $\frac{2\omega_0}{52}$ (c=2). Zasadniczy wpływ na rozruch silnika będzie miał pasożytniczy moment synchroniczny przy prędkości $\frac{2\omega_0}{25}$, który jest sumą następujących składników:

$$M_s = M_{s1,25} + M_{s25,1} + M_{s5,31} + M_{s31,5} + M_{s11,37} + M_{s37,11} + M_{s17,43} + M_{s43,17} +$$

$$+ M_{s23,49} + M_{s49,23} + \cdots\cdots \qquad (2)$$



Rys. 3

Mechanizm generowania pasożytniczych momentów synchronicznych II rzędu
A principle of a generation of the parasitic synchronous torques of a second order

Spośród składników sumy (2) dominującą rolę odgrywa pierwszy składnik, związany z harmonicznymi przestrzennymi przepływu o największych amplitudach: pierwsza harmoniczna jest harmoniczną główną, zaś 25-ta harmoniczna - harmoniczną żłobkową zarówno stojana, jak i wirnika. Uzasadnia to przyjęcie do dalszych rozważań modelu, uwzględniającego wyłącznie 1-szą i 25-tą harmoniczną przepływu, a tym samym pominięcie we wzorze (2) składników momentu, związanych z harmonicznymi strefowymi (pasmowymi):

$$M_s \approx M_{s1,25} + M_{s25,1}. \qquad (3)$$

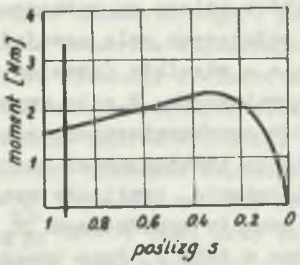
Charakterystykę asynchronicznego momentu elektromagnetycznego przedstawia rys. 4. Pasożytniczy moment asynchroniczny, związany z 25-tą harmoniczną przestrzenną jest pomijalnie mały. Momenty synchroniczne obliczono w oparciu o uproszczoną metodę, która polega na wyznaczeniu prądów poszczególnych wirników elementarnych, pełniących rolę uzwojeń wzbudzenia i zasileniu nimi - jako prądami wzbudzenia - wirników (uzwojeń wzbudzenia) odpowiednich elementarnych maszyn synchronicznych. W celu uwypuklenia zagadnień, związanych z sumowaniem momentów synchronicznych, wyznaczono wpierw oba momenty $M_{s1,25}$ i $M_{s25,1}$ przy pominięciu indukcyjności rozproszenia różnicowego, a następnie przy jej uwzględnieniu. Amplitudy momentów składowych $M_{smx1,25}$, $M_{smx25,1}$, amplitudy momentu wypadkowego $|M_{smx}$ i sumy amplitud $(M_{smx1,25} + M_{smx25,1})$ zestawiono w tab. 2. Przy uwzględnieniu indukcyjności rozproszenia różnicowego suma amplitud momentów składowych jest praktycznie równa amplitudzie momentu wypadkowego. Przy nieuwzględnieniu - oszacowanie takie jest obarczone dość znacznym błędem. W celu pełniejszego wyeksponowania wpływu pasożytniczych momentów synchronicznych na przebieg rozruchu silnika, przyjęto do dalszych rozważań model matematyczny maszyny bez indukcyjności rozproszenia różnicowego.

Tabela 1

Prędkości synchroniczne dla pasożytniczych momentów I rzędu
Synchronous speeds for parasitic torques of a first order

maszyna synchroniczna

maszyna indukująca ν \ ϱ				
	0	$\frac{2\omega_0}{\varrho+\nu}$	$-\frac{2\omega_0}{\varrho-\nu}$	0
	$\frac{2\omega_0}{\varrho+\nu}$	0	0	$-\frac{2\omega_0}{\varrho-\nu}$
	$\frac{2\omega_0}{\varrho-\nu}$	0	0	$-\frac{2\omega_0}{\varrho+\nu}$
	0	$\frac{2\omega_0}{\varrho-\nu}$	$-\frac{2\omega_0}{\varrho+\nu}$	0



Rys. 4

Charakterystyka momentu silnika
The torque - speed curve of the motor

4. UPROSZCZONA ANALITYCZNA METODA BADANIA ROZRUCHU SILNIKA KLATKOWEGO

Uproszczona analiza rozruchu silnika jest przedstawiona w pracy [2] . Odnosi się ona do przypadku maszyny, w której moment synchroniczny jest formowany przez harmoniczne żłobkowe stojana i wirnika (warunkiem jest równość $\dot{Z}_1 + 2p = \dot{Z}_2$). Jeśli przez M_s oznaczymy wartość momentu asynchronicznego w stanie ustalonym przy prędkości $\frac{2\omega_0}{Z_2}$, przez M_{smx} - amplitudę momentu synchronicznego, zaś przez M_o - moment obciążenia, to warunek konieczny synchronizacji momentu pasożytniczego (silnik nie osiągnie prędkości znamionowej) określa nierówność: $M_{smx} > M_s - M_o$. Nie jest to jednak warunek wystarczający, ponieważ w pewnych przypadkach silnik może "wyrwać się" spod działania momentu synchronicznego pod wpływem sił bezwładności. Zjawisko to zostało przeanalizowane w pracy [2] w oparciu o szereg założeń upraszczających. W interpretacji fizycznej rozwiązanie równania różniczkowego ruchu sprowadza się do określenia przedziału kątów ϑ, przy których w wyniku "zaburzenia zewnętrznego" o wartości $M_s - M_o$ nie następuje wypadnięcie z synchronizmu (utrata stabilności) elementarnej maszyny synchronicznej,

Tabela 2

Amplitudy momentów synchronicznych przy prędkości $\frac{2\omega_0}{26}$

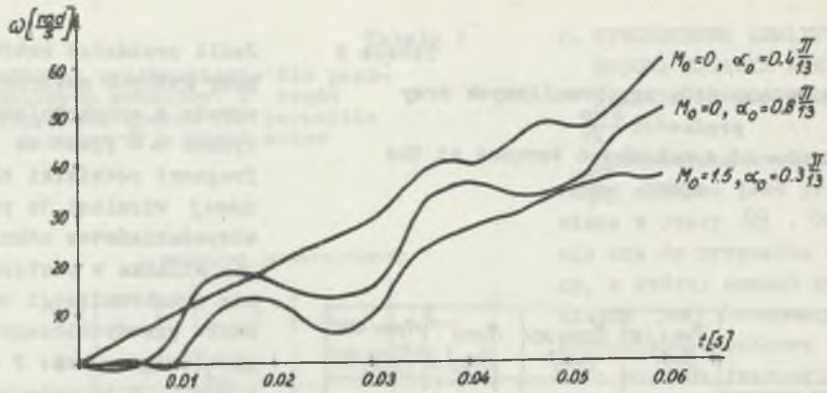
Amplitudes of synchronous torques at the speed $\frac{2\omega_0}{26}$

	$M_{smx\,1.25}$ [Nm]	$M_{smx\,25.1}$ [Nm]	M_{smx} [Nm]	$M_{smx\,1.25} + M_{smx\,25.1}$ [Nm]
bez ind. rozproszenia różnicowego	2.65	2.407	4.296	5.057
z ind. rozproszenia różnicowego	1.747	0.008	1.755	1.755

Jeśli przedział kątów, przy których maszyna nie wypada z synchronizmu wynosi $\Delta\vartheta$ (jest to fragment podziałki żłobkowej wirnika), to prawdopodobieństwo utknięcia silnika w następstwie synchronizacji momentu pasożytniczego określa stosunek: $P = \frac{\Delta\vartheta}{2\pi} \cdot 2$. W rozważanym przypadku przy założeniu, że $M_0 = 0$, prawdopodobieństwo to wyniosło 0,46.

5. SYMULACJA ROZRUCHU SILNIKA NA EMC

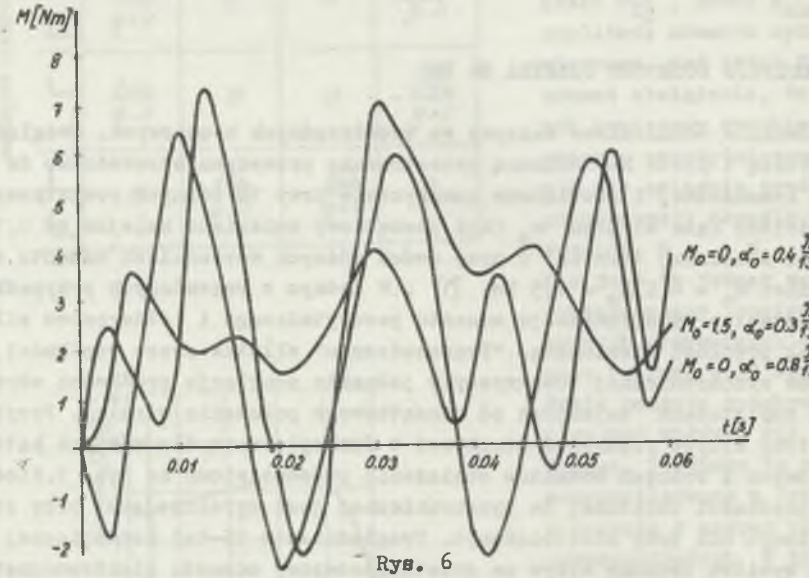
Równania różniczkowe maszyny we współrzędnych k-osiowych, uwzględniające 1-szą i 25-tą harmoniczną przestrzenną przepływu sprowadzono do postaci kanonicznej i rozwiązano numerycznie przy 10 różnych początkowych wartościach kąta wirnika α_0 (kąt początkowy zmieniano kolejno od 0,1 podziałki żłobkowej wirnika) i przy dwóch różnych wartościach momentu obciążenia: $M_0 = 0$ i $M_0 = 1,5$ Nm, [1] . W żadnym z rozważanych przypadków nie nastąpiła synchronizacja momentu pasożytniczego i każdorazowo silnik osiągał prędkość znamionową. "Przechodzeniu" silnika przez prędkości zbliżone do synchronicznej towarzyszyły jednakże oscylacje prędkości obrotowej o amplitudach zależnych od początkowego położenia wirnika. Przykładowo trzy krzywe prędkości obrotowej w funkcji czasu dla różnych kątów początkowych i różnych momentów obciążenia przedstawiono na rys. 5.Siodło przy prędkości zbliżonej do synchronicznej jest wyraźniejsze przy silniku obciążonym niż przy nieobciążonym. Uwzględnienie 25-tej harmonicznej przepływu wywiera istotny wpływ na przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego i prądu stojana podczas rozruchu silnika. Szczytowa wartość momentu elektromagnetycznego oraz czas jej pojawienia stają się zależne od początkowego położenia wirnika. Szczytowa wartość momentu, która dla modelu z harmoniczną główną wynosiła ok. 4 Nm, wzrosła - w najbardziej niekorzystnym przypadku - do ok. 8 Nm (rys. 6). Wpływ ten tłumaczy rys. 7. Moment elektromagnetyczny przy uwzględnieniu 1-szej i 25-tej harmonicznej można przedstawić w postaci sumy dwóch składników: $M_{e(1)}$ i $M_{e(25)}$, związanych odpowiednio z kątem α i 25α . Moment elektromagnetyczny $M_{e(1)}$ jest praktycznie identyczny z momentem elektromagnetycznym otrzymanym dla modelu



Rys. 5

Przebiegi prędkości obrotowej w funkcji czasu przy rozruchu silnika przy różnych wartościach kąta początkowego wirnika

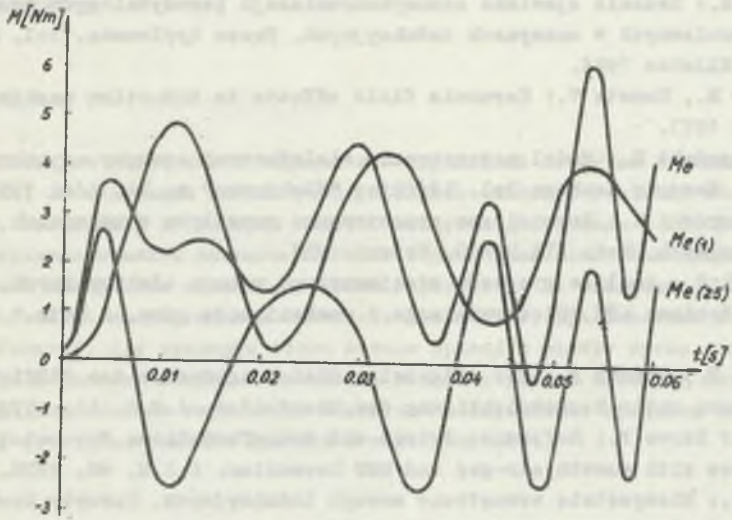
Time functions of a speed during the start of a motor with the various initial positions of a rotor



Rys. 6

Przebiegi momentu elektromagnetycznego w funkcji czasu przy rozruchu silnika przy różnych wartościach kąta początkowego wirnika

Time functions of an electromagnetic torque during the start of a motor with the various initial positions of a rotor



Rys. 7

Przebiegi momentów składowych i momentu wypadkowego
Time functions of the components of the torque and the resultant torque

z harmoniczną główną. Przy uwzględnieniu 25-tej harmonicznej pojawia się składowa $M_{e(25)}$, która w zależności od przypadkowej wartości kąta α_o w różny sposób sumuje się ze składową $M_{e(1)}$. Przy niektórych wartościach kąta α_o w miejsce pierwszego maksimum momentu pojawia się nawet moment o ujemnej wartości.

6. WNIOSKI

Wyższe harmoniczne przestrzenne przepływu i związane z nimi pasożytnicze momenty synchroniczne wywierają niekorzystny wpływ na rozruch silników indukcyjnych (wydłużają czas rozruchu, powodują oscylację prędkości obrotowej, są przyczyną "siodeł" przy prędkości, zbliżonej do synchronicznej). W istotny sposób powiększają wartości szczytowe momentu elektromagnetycznego i prądu łączeniowego. W silnikach o prawidłowo dobranej liczbie żłobków stojana i wirnika opisane efekty wystąpią w odpowiednio mniejszej skali.

LITERATURA

[1] Cyroń M.: Badanie zjawiska samosynchronizacji pasożytniczych momentów synchronicznych w maszynach indukcyjnych. Praca dyplomowa. Pol. Śląska - Gliwice 1984.
[2] Heller B., Hamata V.: Harmonic field effects in induction machines. Praque 1977.
[3] Kluszczyński K.: Model matematyczny wielofazowej maszyny asynchronicznej, Zeszyty Naukowe Pol. Łódzkiej "Elektryka" z. 74, Łódź 1983.
[4] Kluszczyński K.: Harmoniczne przestrzenne przepływu w maszynach asynchronicznych. Mat. VII SPETO, Ustroń 1984.
[5] Sobczyk T.: Analiza procesów stacjonarnych maszyn elektrycznych. Zeszyty Naukowe AGH "Elektryfikacja i mechanizacja górn. i hutn." z. 97, Kraków.
[6] Taegen F., Hammes E.: Das allgemeine Gleichungssystem des "Käfigläufermotors unter Berücksichtigung der Oberfelder. A.f.E. 55, 1972.
[7] Van der Merwe F.: Reference frames and transformations for rotating machines with smooth air-gap and MMF harmonics. A.f.E. 60, 1978.
[8] Wach P.: Niesymetrie wewnętrzne maszyn indukcyjnych. Zeszyty Naukowe WSI Opole "Elektryka" z.19, Opole 1982.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do redakcji dn. 7 maja 1985 r.

THE INFLUENCE OF PARASITIC TORQUES FOR THE STARTING OF INDUCTION SQUIRREL-CAGE MOTOR

S u m m a r y

The new method of calculation of parasitic torques in induction motors basing on the model of machine in k-axis coordinates, was presented. As an example the squirrel-cage motor with the synchronous torques, generated by the magnetomotive force step harmonics, was considered. The synchronous torques and the probability of their synchronization during the starting were calculated, basing on the simplified analitical method, proposed by B.Heller and V. Hamata. In the purpose of verification, the simulation of starting was realised on the computer for the various initial positions of the rotor and for the various torques of the load. The influence of parasitic torques for the transient states of velocity, electromagnetic torque and current of a motor was considered.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ МОМЕНТОВ НА ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.

Р е з ю м е

Оговорен новый метод определения паразитных моментов в асинхронных двигателях, использующий математическую модель машины в к-осевой системе координат. Как пример рассмотрен короткозамкнутый двигатель, в котором паразитные синхронные моменты вызваны пазовыми гармониками магнитодвижущей силы. Определены синхронные моменты, а также вероятность их синхронизации вовремя пуска опираясь на упрощенном аналитическом методе, предложенным Б. Геллером и В. Гаматой. Для проверки этого метода проведен расчёт пуска двигателя на ЭВМ для разных начальных положений ротора и разных моментов нагрузки машины. Обсуждено влияние паразитных моментов на переходные процессы скорости вращения, электромагнитного момента и тока двигателя.