

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Roman MIKSIEWICZ

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki ŚląskiejŹRÓDŁA BŁĘDÓW W RÓŻNYCH METODACH OBLICZANIA MOMENTÓW PASOŻYTNICZYCH
W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

Streszczenie. Omówiono i sklasyfikowano różne metody obliczania momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych (metody oparte na przemiennej analizie schematów zastępczych i pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny; metody, polegające na bezpośrednim rozwiązywaniu równań na maszynie cyfrowej; metodę, opartą na schematach rozkładu maszyny na maszyny elementarne). Omówiono różne uproszczenia przyjmowane w ramach tych metod, będące źródłami błędów (tzw. błędów metody). Szczególną uwagę zwrócono na uproszczenia, polegające na ograniczaniu liczby uwzględnianych harmonicznych przestrzennych, algebraicznym sumowaniu składowych momentów pasożytniczych, pomijaniu momentów pasożytniczych II rzędu i przybliżonym obliczaniu indukcyjności rozproszenia różnicowego. Dokonano oceny wpływu tych uproszczeń na wyniki obliczeń na przykładzie silnika Sg 132 S-6.

1. Wstęp

Wyniki obliczeń momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych uzyskiwane na podstawie różnorodnych metod różnią się między sobą. Przyczyną tego są uproszczenia, przyjmowane przy rozwiązywaniu równań (modeli matematycznych) maszyn. Błędy takie określamy mianem błędów metody rozwiązania (w dalszej części będziemy je krótko nazywali błędami metody). Błędy metody wraz z błędami modelu wynikającymi z założeń upraszczających, przyjmowanych przy formułowaniu równań maszyn, składają się na całkowity błąd obliczeń i powodują, że wyniki obliczeń odbiegają od wyników pomiarów. Również i wyniki pomiarów uzyskiwane w różnych układach pomiarowych nie są zgodne ze sobą, co świadczy o tym, że metody pomiarów momentów pasożytniczych, zwłaszcza amplitud momentów synchronicznych, muszą być nadal doskonalone i rozwijane.

Celem niniejszej pracy jest sklasyfikowanie metod obliczania momentów pasożytniczych i omówienie różnych uproszczeń przyjmowanych w ramach tych metod oraz ocena wpływu, jaki uproszczenia te wywierają na wyniki obliczeń. Rozważania zostały poparte obliczeniami dla silnika indukcyjnego Sg 132 S-6 ($P_n = 3$ kW, $U_n = 380$ V, $2p = 6$, $z_1 = 36$, $z_2 = 33$), przeprowadzonymi na pod-

stawie metody schematów rozkładu maszyny na maszyny elementarne, przedstawionej w pracy [3] (błąd tej metody zostanie omówiony w rozdz. 5).

Metody obliczania momentów pasywnych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- a) metody przybliżone, oparte na schematach zastępczych i obliczeniach pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny,
- b) metody dokładne, oparte na bezpośrednim numerycznym rozwiązywaniu równań maszyny na EMC.

Zanim jednak przystąpimy do omawiania błędów, charakteryzujących obie powyższe grupy, zwrócimy uwagę na pewien szczególny błąd, wspólny dla wszystkich metod rozwiązywania równań maszyny i obliczania momentów pasywnych, a wynikający z wprowadzenia do analizy szeregów Fouriera.

2. Błąd. wynikający z zastosowania szeregów Fouriera

Wstępnym błędem metody, wspólnym dla wszystkich metod rozwiązywania równań i obliczania momentów pasywnych, jest rozkład krzywych przestrzennych przepływu magnetycznego uzwojeń w szeregi Fouriera i wprowadzenie do równań współczynników indukcyjności, odpowiadających harmonicznym pola magnetycznego.

Współczynniki równań (współczynniki indukcyjności) stają się wówczas szeregami nieskończonymi. Rozwiązanie układu równań wymaga jednak ograniczenia liczby wyrazów tych szeregów do skończonej liczby Ω . Pociąga to za sobą konieczność określania rzędu Ω najwyższej uwzględnionej w równaniach harmonicznej przestrzennej. Po ograniczeniu liczby wyrazów poszczególnych szeregów do Ω , w rozwiązaniu pojawia się więc błąd, wynikający z pominięcia harmonicznych przestrzennych o rzędach $\nu > \Omega$. Oszacowanie tego błędu jest praktycznie niemożliwe, albowiem amplitudy harmonicznych przepływu nie są względem rzędu ν funkcjami monotonicznie malejącymi (funkcje te są funkcjami periodycznie tłumionymi, ze względu na periodyczny przebieg funkcji współczynników uzwojenia i współczynnika skosu względem rzędu ν), a ponadto dla niektórych harmonicznych o rzędzie ν może następować wzmocnienie amplitudy wynikające z równań więzów. Takie wzmocnienie niektórych harmonicznych ma na przykład miejsce przy połączeniu uzwojeń w trójkąt. Wybór właściwego Ω jest więc z jednej strony problemem matematycznym, z drugiej strony - problemem technicznym, stwarzającym istotny dylemat: im wyższe Ω - tym dokładniejsze rozwiązanie z matematycznego punktu widzenia, ale równocześnie im wyższe Ω - tym bardziej model odbiega od założeń upraszczających przyjmowanych przy formułowaniu równań maszyny, a zwłaszcza od założenia o nitkowym rozkładzie przestrzennym układu prądowego na obwodzie maszyny.

Przedstawiony problem pogłębia się dla modeli maszyn, uwzględniających uzłobkowanie stojana i wirnika, albowiem w modelach takich rozwija się

w szereg Fouriera również przewodność magnetyczną szczeliny, a przy rozwiązywaniu równań bierze się pod uwagę tylko wyraz stały i pierwszą harmoniczną przestrzenną [2], [7].

Pytanie, czy można zrezygnować z rozwinięcia funkcji przepływu w szereg Fouriera (które to rozwinięcie daje olbrzymie korzyści, ale i budzi wątpliwości), jest pytaniem wciąż otwartym. Czynione były nieliczne próby rozwiązania równań maszyny przy rozwinięciu funkcji przepływu w inne zupełne ciągi funkcji ortogonalnych (np. w funkcje Walsha), zapewniające szybszą zbieżność rozwinięcia dla funkcji z nieciągłościami I rodzaju, lecz nie przyniosły one spodziewanych rezultatów i nie są kontynuowane.

3. Uproszczenia i błędy związane z metodami grupy I

W okresie, gdy nie były znane maszyny cyfrowe, bezpośrednie rozwiązywanie równań maszyny przy uwzględnieniu wyższych harmonicznym przestrzennych pola było praktycznie niemożliwe. Stąd właśnie rozwój metod I, umożliwiających uzyskiwanie - na drodze pewnych uproszczeń i przybliżeń - rozwiązań analitycznych.

Głównym wstępnym uproszczeniem w metodach grupy I jest przyjęcie, że reakcją wirnika na ψ -tą harmoniczną przestrzenną przepływu stojana jest ψ -ta harmoniczna przestrzenna przepływu wirnika. Uproszczenie to umożliwia sformułowanie schematu zastępczego maszyny i obliczenie przybliżonych wartości prądu stojana i wirnika (jest to tzw. pierwsze odbicie prądu stojana w wirniku, umożliwiające znalezienie prądów reakcji pierwotnej wirnika). Znając przybliżone wartości prądu stojana i wirnika, przeprowadza się analizę pola magnetycznego w szczelinie, wyszukuje współdziałające ze sobą harmoniczne, tworzące momenty pasażynicze (harmoniczne o równych okresach, nieruchome względem siebie), a następnie oblicza te momenty (są to tzw. momenty pasażynicze I rzędu).

Metoda ta, stosowana w różnej formie m.in. przez Odoka, Richtera, Schuisky'ego została rozwinięta przez Oberretla, Jordana, Spätha, umożliwiając drogą kolejnych odbić (przemiennego rozwiązywania schematów zastępczych i analizy pola magnetycznego w szczelinie) uwzględnianie wtórnej reakcji stojana, wtórnej reakcji wirnika itd. (prądy wtórnej reakcji stojana znajduje się jako odbicie prądów reakcji pierwotnej wirnika, prądy wtórnej reakcji wirnika - jako odbicie prądów wtórnej reakcji stojana itd.) i w konsekwencji obliczanie momentów pasażyniczych wyższych rzędów.

Posługiwanie się metodą kolejnych odbić wymaga dużej wprawy w formułowaniu schematów zastępczych, obliczaniu parametrów schematów zastępczych (zwłaszcza indukcyjności rozproszenia różnicowego), wyszukiwaniu współdziałających ze sobą harmonicznym przestrzennych, a przede wszystkim - głębokiego rozumienia zjawisk fizycznych, zachodzących w maszynie. Specyfiką bowiem metod I jest to, że wiele zjawisk fizycznych w maszynie, związanych z wyk-

szymi harmonicznymi, musiało być wpierv "dostrzeżone fizycznie", przeanalizowane jakościowo pod kątem wpływu różnych parametrów i czynników, a dopiero wówczas a posteriori określano tok obliczeń, pozwalający na badanie związków ilościowych.

Jako przykład takiego zjawiska można przytoczyć oddziaływanie gałęzi równoległych w stojanie na pola magnetyczne wyższych harmoniczných [6] .

Skromne możliwości obliczeniowe, pozostające w dyspozycji konstruktorów, powodowały, że dużą uwagę przykładano do upraszczania obliczeń poprzez selekcję harmoniczných przestrzenných i wybór spośród harmoniczných tylko tych, które mogły mieć znaczący wpływ na końcowy wynik obliczeń. Wymieńmy obecnie i omówmy zasadnicze uproszczenia, związane z metodami grupy I i oceńmy ich wpływ na wyniki obliczeń:

a) Algebraiczne sumowanie modułów amplitud składowých synchroniczných momentów pasożytniczych.

Synchroniczny moment pasożytniczy powstający przy prędkości synchronicznej ω_s jest sumą wielu - a co najmniej sumą dwóch składników i ma następującą ogólną postać (oznaczenia momentów wg pracy [3]):

$$M_s(\omega_s) = M_v(o)(\varphi) + M_\varphi(o)(v) + M_\lambda(o)(\chi) + M_\lambda(o)(\lambda) + \dots \quad (1)$$

moment synchro-
niczny, związany
z parą harmoniczných
 v i φ

moment synchroniczny,
związany z parą harmoniczných
 λ i χ

Każdy z tych składników jest względem kąta φ_o (kąt φ_o jest kątem, zawartym pomiędzy stojaniem i wirnikiem, widzianym przy oświetlaniu przekroju poprzecznego maszyny lampą stroboskopową o częstotliwości rozbiłysków ω_s , równą prędkości synchronicznej maszyny) funkcją sinusoidalną o różnym początkowym kącie fazowym. Tę sinusoidalną funkcję synchronicznego momentu pasożytniczego względem kąta φ_o nazywamy - poprzez analogię do teorii maszyny synchronicznej - charakterystyką kątową momentu synchronicznego (kąt φ_o odpowiada kątowi mocy) [3] . Aby otrzymać wypadkową charakterystykę kątową pasożytniczego momentu synchronicznego, a tym samym znaleźć amplitudę wypadkowego momentu synchronicznego, należy sumować charakterystyki kątowe poszczególných składników z uwzględnieniem początkowego kąta fazowego (sumowanie geometryczne składowých). W metodach I wyznacza się amplitudy poszczególných składowých (nie wyznacza się natomiast fazy charakterystyki kątowej), a amplitudę wypadkowego momentu synchronicznego oblicza się w przybliżony sposób jako sumę amplitud poszczególných składowých (sumowanie algebraiczne składowých). Przybliżenie to, które bardzo upraszcza tok obliczeń, prowadzi jednak do bardzo dużých błędów i to różniących się w maszynach o różných liczbach żłobków. Każda para harmoniczných, np. para v i φ jest związana z dwoma składnikami momentu (może ich być więcej, jeśli uwzględniamy momenty wyższych rzędów), których amplitudy są zbliżone

(są co najmniej tego samego rzędu), a ich fazy początkowe należą do różnych ćwiartek. Oznacza to, że suma algebraiczna może być w niekorzystnym przypadku kilka razy większa od sumy geometrycznej. Wielkość błędu sumowania algebraicznego zależy również od tego, czy moment synchroniczny, związany z harmoniczną ψ i φ jest momentem dominującym, czy też porównywalnym z momentami, pochodzącymi od innych par harmoniczych, np. λ i κ (jest to uzależnione od liczby żłobków stojana i wirnika),

W przypadku gdy momenty pochodzące od różnych par harmoniczych są ze sobą porównywalne, błąd sumowania algebraicznego może jeszcze bardziej wzrosnąć. Autorzy różnych metod grupy I chętnie przystają na ten błąd, albowiem obliczenia momentów pasożytniczych, z powodu założeń upraszczających, przyjmowanych przy formułowaniu modelu matematycznego (błędów modelu), dają za małe wartości synchronicznych momentów pasożytniczych, a wówczas uproszczone sumowanie algebraiczne pozwala na znaczne powiększenie momentów obliczonych.

Przykładowo, dla silnika Sg 132 S-6, w którym synchroniczne momenty pasożytnicze powstają przy trzech prędkościach: $n_1 = 90,9 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$, $n_2 = 45,5 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$ i $n_3 = 0$, zestawiono w tabeli 1 amplitudy momentów synchronicznych wyznaczone poprzez geometryczne sumowanie składowych oraz algebraiczne sumowanie składowych.

Tabela 1

Prędkość synchroniczna [obr/min]	Moment pasożytniczy [Nm]	
	suma geometryczna	suma algebraiczna
- 90,9	2,62	14,4
45,5	0,57	0,79
0	0,00051	0,0059

Wydaje się jednak, że przy analizowaniu wpływu poszczególnych parametrów i współczynników na zjawiska pasożytnicze, należy rozważać nie tylko amplitudy, wyznaczone jako sumy geometryczne składowych, ale również amplitudy, wyznaczone przez algebraiczne sumowanie składowych. Suma geometryczna równa zero mówi bowiem tylko o tym, że powstające w maszynie elektromagnetyczne momenty synchroniczne wzajemnie równoważą się. Suma algebraiczna równa zero oznacza natomiast, że w maszynie w ogóle nie powstają synchroniczne momenty pasożytnicze. Suma algebraiczna składowych momentu pasożytniczego może więc być uważana za miarę natężenia zjawisk pasożytniczych w maszynie. Problem ten nabiera jeszcze większego znaczenia w świetle możliwych błędów obliczeń, które w niejednakowym stopniu muszą dotyczyć amplitudy i fazy charakterystyk kątowych poszczególnych składowych. Przy obecnie stosowanych metodach obliczania momentów pasożytniczych, obarczonych znacznymi niedokładnościami oraz przy braku rozeznania co do war-

tości błędów związanych z amplitudą i fazą charakterystyk kątowych momentów pasożytniczych, celowe i zasadne wydaje się więc rozważanie zarówno sumy geometrycznej, jak i algebraicznej.

- b) Uwzględnianie momentów synchronicznych I rzędu i pomijanie momentów pasożytniczych II rzędu.

Przy uwzględnieniu momentów pasożytniczych I i II rzędu suma (1) przyjmuje postać:

$$M_B(\omega_B) = M_{\nu(0)}^I(\varphi) + M_{\varphi(0)}^I(\nu) + M_{\lambda(0)}^I(\kappa) + M_{\kappa(0)}^I(\lambda) + \dots + M_{\nu(0)}^{II}(\nu, \varphi) + M_{\varphi(0)}^{II}(\nu, \varphi) +$$

momenty synchroniczne I rzędu,
związane z parą harmonicznych
 ν i φ

momenty synchroniczne
II rzędu, związane z
parą harmonicznych
 ν i φ

W niektórych przypadkach, a w szczególności wówczas, gdy harmoniczna ν -ta jest harmoniczną główną ($\nu = p$), składniki momentu II rzędu typu $M_{\nu(0)}^{II}(\nu, \varphi)$ przyjmują wartości porównywalne z momentami I rzędu i nie mogą być pominięte.

Przykładowo, dla silnika Sg 132 S-6 poszczególne składowe synchronicznych momentów pasożytniczych I rzędu i II rzędu przy prędkości $n_1 = 90,9 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$ zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Momenty składowe I rzędu [Nm]	Momenty składowe II rzędu [Nm]
4,25	2,74
4,8	0,009
1,6	0,00001
0,62	
0,0027	
0,0013	
0,13	
0,04	
0,12	
0,048	

Składnik II rzędu musi być sumowany ze składnikami I rzędu z uwzględnieniem przesunięcia fazowego charakterystyki kątowej (geometryczne sumowanie składowych), albowiem w przeciwnym wypadku - zamiast pomniejszyć - może powiększyć błąd obliczeń.

c) Przybliżone wyznaczanie reaktancji rozproszenia różnicowego.

W metodzie kolejnych odbić zachodzi konieczność wyznaczania reaktancji rozproszenia różnicowego (szczelinowego) wirnika dla różnych składowych ortogonalnych. W przypadku gdy w krzywej przestrzennej przepływu wirnika uwzględniamy wyłącznie harmoniczne żłobkowe wirnika o rzędach $\nu = c\frac{z}{2} + p$, gdzie c - liczba całkowita, w obliczeniach mamy do czynienia z jedną tylko reaktancją różnicową wirnika, a mianowicie reaktancją różnicową wirnika dla p -tej składowej ortogonalnej.

Reaktancje różnicowe wyznacza się jako sumy odpowiednich reaktancji magnesujących, mnożonych przez współczynniki tłumienia.

Poprawność wyznaczenia reaktancji rozproszenia różnicowego w istotny sposób rzutuje na dokładność obliczeń momentów pasywnych, a wynika ona z:

- prawidłowego wyboru harmonicznych oraz właściwego wyboru najwyższej uwzględnionej harmonicznej,
- dokładności wzorów na współczynniki tłumienia (najczęściej w schematach zastępczych służących do wyznaczania tych współczynników pomija się rezystancję wirnika, zakładając, że współczynniki tłumienia są wyznaczone dla $s \rightarrow \infty$),
- właściwego uwzględniania wpływu połączenia uzwojeń stojana na współczynniki tłumienia (przy połączeniu uzwojenia stojana w trójkąt prądy reakcji wtórnej cyrkulujące w trójkącie powodują że współczynniki tłumienia przyjmują dla niektórych harmonicznych wartości bliskie zeru),
- właściwego uwzględnienia wpływu gałęzi równoległych w stojanie na współczynniki tłumienia,
- uwzględnienia wpływu podharmonicznych, generowanych przez uzwojenie klatkowe, na wartości reaktancji rozproszenia różnicowego wirnika.

W celu zbadania jakiego rzędu błędy mogą wynikać z niewłaściwego wyznaczenia współczynników tłumienia, przeprowadzono obliczenia pasywnych momentów synchronicznych dla silnika Sg 132 S-6 przy założeniu, że wszystkie współczynniki tłumienia i to zarówno dla stojana, jak i wirnika przyjmują wartość 1 (brak tłumienia). Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Prędkość synchroniczna [obr/min]	Momenty synchroniczne [Nm] (suma geometryczna)	
	z tłumieniem	bez tłumienia
- 90,9	2,62	2,16
45,5	0,57	0,54
0	0,00051	0,00039

Omawiając uproszczenie, a zwrócono uwagę na znaczenie sumy algebraicznej modułów składowych momentów pasożytniczych jako miary natężenia zjawisk pasożytniczych w maszynie. Dla potwierdzenia celowości analizowania wpływu różnych parametrów i uproszczeń na momenty pasożytnicze opierając się na sumie geometrycznej, jak i algebraicznej – przytoczono w tabeli 4 wyniki obliczeń sum algebraicznych dla rozważanego przypadku silnika z tłumieniem i bez tłumienia strumienia rozproszenia różnicowego. Z porównania obu tabel (tab. 3 i tab. 4) wynika, że wpływ tłumienia – nieznaczny w przypadku sumy geometrycznej składowych momentów – jest wyraźnie widoczny w odniesieniu do sumy algebraicznej, zwłaszcza dla dominującego momentu synchronicznego.

Tabela 4

Prędkość synchroniczna [obr/min]	Momenty synchroniczne [Nm] (suma algebraiczna)	
	z tłumieniem	bez tłumienia
- 90,9	14,4	7,2
45,5	0,79	0,58
0	0,0059	0,0047

d) Intuicyjne wyszukiwanie harmonicznych pola, formujących pasożytnicze momenty synchroniczne

W maszynach powstają pasożytnicze momenty synchroniczne przy różnych prędkościach synchronicznych, a każdy z tych momentów zawiera wiele składników, związanych z różnymi parami harmonicznych. Brak jest w ramach metod grupy I uporządkowanej, usystematyzowanej metody wyszukiwania momentów pasożytniczych, co stwarza niebezpieczeństwo przypadkowego pominięcia któregoś z istotnych składników momentu.

Z zagadnieniem tym łączy się również możliwość skracania czasu obliczeń (optymalizacji obliczeń), wynikająca z tego, że wartości składników momentu, związane z różnymi parami harmonicznych mogą w niektórych maszynach różnić się między sobą o rzędy. O ile można by wstępnie określić, które składniki momentu są dominujące, a które pomijalnie małe, to obliczeń mógłby ulec wydatnemu skróceniu.

4. Możliwości błędów w metodach grupy II

Metody dokładne polegają na bezpośrednim numerycznym rozwiązywaniu układu równań silnika na maszynie cyfrowej (w przypadku stanów nieustalonych są to układy równań różniczkowych, zaś w przypadku stanów ustalonych – układy równań algebraicznych).

Błąd metody wiąże się tylko z ograniczeniem analizy do Ω kolejnych harmonicznych oraz z numerycznym rozwiązywaniem równań, co jest zaletą metod grupy II w stosunku do metod grupy I.

Metody grupy II skupiają się przede wszystkim na zagadnieniach formułowania modeli matematycznych. Numeryczne rozwiązywanie równań zwalnia z konieczności fizycznego analizowania zjawisk, zachodzących z maszynie (w przeciwieństwie do metod grupy I, gdzie rozwiązywanie polega na przemiennej analizie schematów zastępczych i pola magnetycznego w szczelinie), co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia prawdopodobieństwa przeoczenia przypadkowego błędu w programie obliczeń momentów pasożytniczych.

Wadą tych metod są również trudności, związane z bezpośrednim wykorzystywaniem klasycznych, powszechnie stosowanych metod korekty parametrów do pomniejszania błędów modelu, płynących z założeń upraszczających przyjmowanych przy formułowaniu modeli matematycznych maszyn. Klasyczne metody korekty parametrów, rozwijane i doskonalone (teoretycznie i empirycznie) na przestrzeni ponad stu lat istnienia maszyn indukcyjnych, związane są z metodami grupy I i odnoszą się przede wszystkim do parametrów schematów zastępczych, a nie współczynników równań, występujących w metodach grupy II. Oczywiście, że istnieją ścisłe związki pomiędzy parametrami schematów zastępczych a współczynnikami równań, jednakże przeniesienie metod korekty z parametrów schematów zastępczych na współczynniki równań może narażać na trudności, a czasem jest wręcz niemożliwe.

Przykładowo, w metodach grupy II nie zachodzi potrzeba wprowadzenia parametru - indukcyjności rozproszenia różnicowego, albowiem uwzględnia się wszystkie kolejne harmoniczne aż do rzędu Ω , a dla Ω przyjmuje się odpowiednio wysokie wartości. Tym samym jednak niemożliwe staje się wykorzystanie klasycznej metody uwzględniania wpływu nasycenia na indukcyjności rozproszenia różnicowego.

Wydaje się, że dla metod grupy II należy opracować nowe, swoiste dla nich metody korekty współczynników, prowadzące do pomniejszania błędów modelu. Byłyby to metody ukierunkowane bezpośrednio na współczynniki równań, w których korekty współczynników nie musiałyby być dokonywane "drogą okrężną" poprzez parametry schematu zastępczego.

5. Błąd metody obliczeń, opartej na schematach rozkładu maszyny na maszyny elementarne

Podstawy teoretyczne metody przedstawiono w pracy [3], a możliwości jej praktycznego wykorzystania - w pracy [4]. Metoda ta wykorzystuje pełne elementy metod grupy I, jak i metod grupy II.

Punktem wyjścia, podobnie jak w metodach grupy II, są równania różniczkowe maszyny, uwzględniające wszystkie kolejne harmoniczne aż do rzędu Ω . Z równaniami tymi jest w 2-osowym układzie współrzędnych związany model

fizyczny - schemat rozkładu maszyny indukcyjnej na maszyny elementarne. Równania różniczkowe maszyny i schematy rozkładu maszyny indukcyjnej na maszyny elementarne są wykorzystane do:

- wyszukania wszystkich asynchronicznych i synchronicznych składowych momentów pasożytniczych, powstających w maszynie w zakresie uwzględnionej liczby harmonicznych,
- określenia rzędów harmonicznych, związanych z poszczególnymi składowymi,
- uszeregowania momentów pasożytniczych wg ich znaczenia (wyodrębnienia momentów dominujących i momentów pomijalnie małych),
- określenia prędkości synchronicznych wszystkich synchronicznych momentów pasożytniczych,
- określenie wartości poślizgów, dla których obwiednie składowych przemien-nych momentów pasożytniczych przyjmują wartości zero (miejsc zerowych),

Przy obliczeniach momentów pasożytniczych informacje te są pomocne przy:

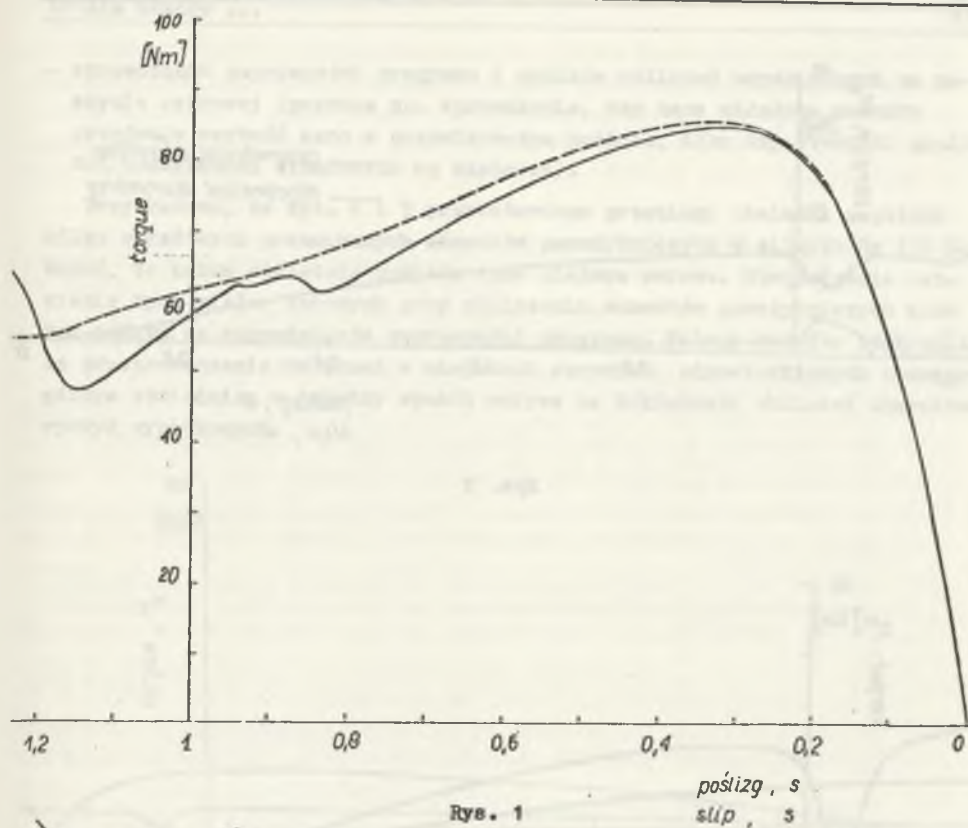
- optymalizacji toku obliczeń (ułatwiają organizację programu, albowiem rozwiązanie jest znane "jakościowo": pozwalają na wybór harmonicznych o dominującym znaczeniu i zrezygnowanie z obliczeń dla harmonicznych o pomijalnie małym znaczeniu).

Na możliwość takiej optymalizacji wskazuje na przykład tabela 2. Dla obliczenia wypadkowego pasożytniczego momentu synchronicznego wystarcza praktycznie uwzględnienie czterech składowych momentu I rzędu oraz jednej składowej momentu II rzędu.

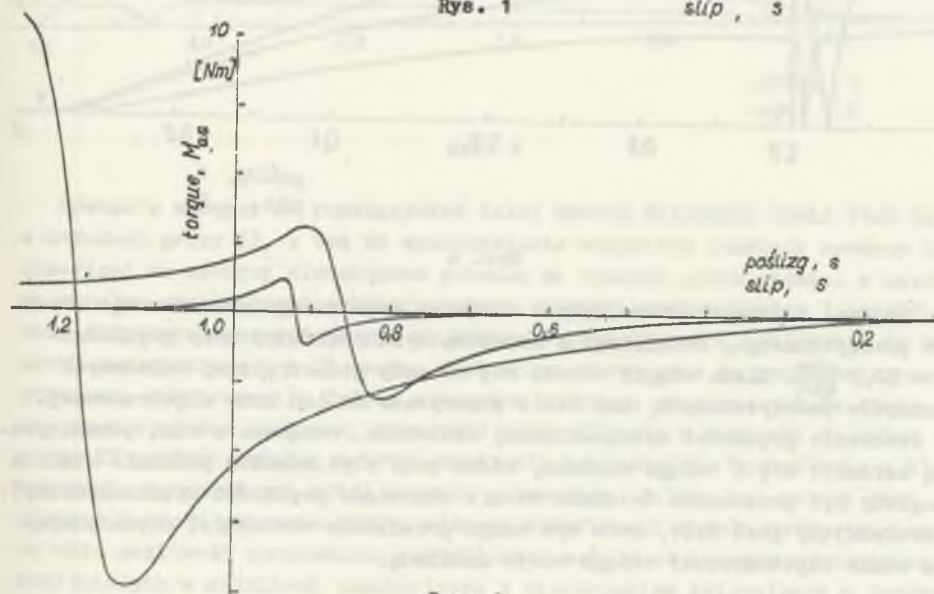
- doborze skali poślizgu s

Moment elektromagnetyczny jest sumą bardzo wielu składników, których maksima i miejsca zerowe są rozłożone wzdłuż osi s i których przebiegi są nieregularne. Przedziały, dla których niektóre ze składowych przyjmują wartości znaczące, są ponadto bardzo wąskie. Przy równomiernym podziale skali poślizgu np. co 0,1 istnieje niebezpieczeństwo, że cała znacząca część danej składowej wraz z punktem maksimum znajdzie się pomiędzy punktami obliczeń i nie zostanie w obliczeniach uwzględniona. Informacje uzyskane na podstawie schematów rozkładu pozwalają na wybór różnych składowych momentów (podziału skali, różnego dla poszczególnych składowych) i na określenie punktów, w których obliczenia powinny być konieczne przeprowadzone ze względu np. na maksymalną lub zerową wartość którejś ze składowych).

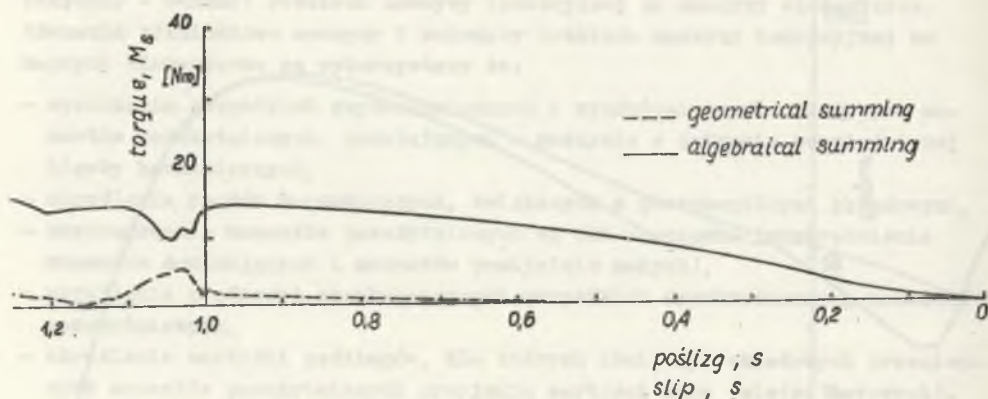
Przykładowo, dla rozważanego silnika Sg 132 S-6 przedstawiono na rys. 1 wypadkową charakterystykę mechaniczną, uwzględniającą pasożytnicze momenty asynchroniczne (linia ciągła), na tle charakterystyki mechanicznej, związanej tylko z harmoniczną główną (linia przerywana), na rys. 2 - charakterystyki pasożytniczych momentów asynchronicznych, odpowiadających kolejnym harmonicznym rzędowi 5p, 7p i 11p. Widać, że uzyskanie prawidłowego przebiegu charakterystyki wypadkowej wymaga uwzględnienia rozłożenia maksimów, minimów i miejsc zerowych poszczególnych charakterystyk składowych.



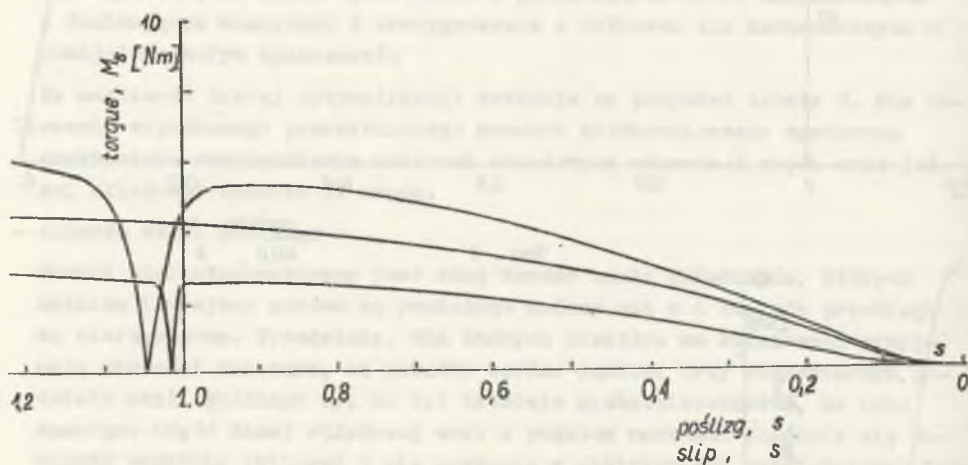
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3

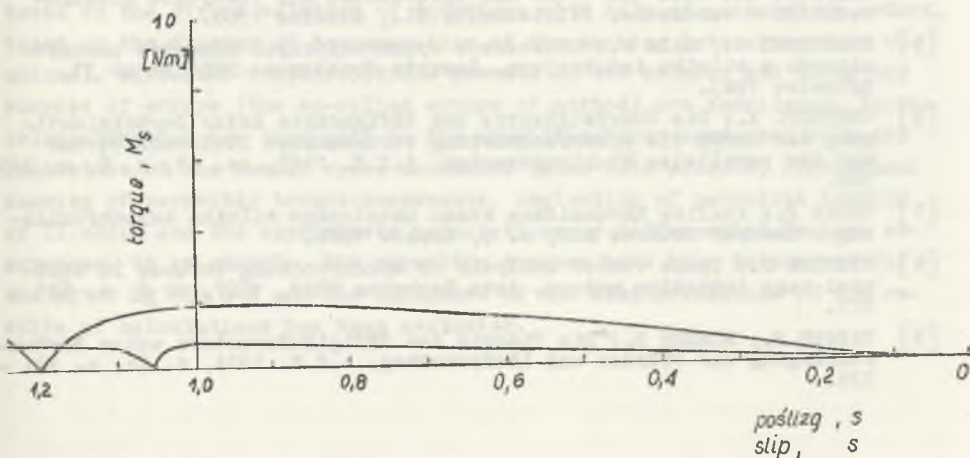


Rys. 4

Na rys. 3 przedstawiono wykres obwiedni wypadkowego przemiennego momentu pasywnego, związanego z momentem synchronicznym przy prędkości $n = 90,9 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$. Linia ciągła odnosi się do sumy geometrycznej składowych momentów pasywnych, zaś linia przerywana do ich sumy algebraicznej. W otoczeniu prędkości synchronicznej obwiednia, związana z sumą geometryczną zakłamuje się i osiąga minimum, które przy zbyt rzadkim podziale skali s mogłoby być przeoczone (minimum to nie odpowiada prędkości synchronicznej). Interesujący jest fakt, że w tym samym przedziale obwiednia, odpowiadająca sumie algebraicznej osiąga swoje maksimum.

- sprawdzaniu poprawności programu i wyników obliczeń uzyskiwanych na maszynie cyfrowej (poprzez np. sprawdzenie, czy dana składowa momentu przyjmuje wartość zero w przewidywanym punkcie, albo czy stosunki amplitud rozważanych składowych są właściwe).

Przykładowo, na rys. 4 i 5 przedstawiono przebiegi obwiedni amplitud kilku składowych przemennych momentów pasożytniczych w silniku Sg 132 S-6. Widać, że każda obwiednia posiada inne miejsca zerowe. Stwierdzenie istnienia tych miejsc zerowych przy obliczaniu momentów pasożytniczych może być jednym ze sprawdzianów poprawności programu. Należy ponadto podkreślić, że przeprowadzenie obliczeń w miejscach zerowych, odpowiadających poszczególnym obwiedniom w istotny sposób wpływa na dokładność obliczeń charakterystyk wypadkowych.



Rys. 5

Równania maszyny są rozwiązywane dalej metodą kolejnych odbić (tak jak w metodach grupy I), z tym że wykorzystanie schematów rozkładu maszyny indukcyjnej na maszyny elementarne pozwala na znaczne ograniczenia, a nawet na zupełne wyeliminowanie błędów metody, wymienionych w rozdz. 3 (amplitudy składowych pasożytniczych są sumowane geometrycznie, obliczane są momenty pasożytnicze I i II rzędu, dokładniej wyznaczane są reaktancje rozproszczenia różnicowego). Dzięki schematom rozkładu omawiana metoda staje się prawie równie dokładna, co metody grupy II, ale w stosunku do metod grupy II posiada istotną zaletę: umożliwia bezpośrednie korzystanie z klasycznych, sprawdzonych metod korekty parametrów. Zaletą tej metody jest również łatwość przeprowadzania różnych modyfikacji modelu matematycznego, co dało możliwość opracowania przybliżonej metody obliczania momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych z pierścieniem zwierającym w środku

pakietu oraz przybliżonej metody obliczania momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych, przy uwzględnieniu prądów poprzecznych w wirniku.

LITERATURA

- [1] HELLER V., HAMATA V.: Harmonic field effects in induction machines. Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences. Praha 1977.
- [2] HOMMES E., PAAP G.C.: The analysis of the 3-phase squirrel-cage induction motor with space harmonics. A.f.E. 1984, z. 67, s.217-236.
- [3] KLUSZCZYŃSKI K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych. Z.N. Pol.Sl. Elektryka, z. 102, Gliwice 1986.
- [4] Krytyczna analiza i weryfikacja istniejących metod obliczeń momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych na przykładzie silników o wzniosie osi wału 132 - 180 mm. Opracowanie dla Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Politechnika Sl., Gliwice 1988.
- [5] KWAŚNICKI S., SALA W.: Obliczanie synchronicznych momentów pasożytniczych w silniku indukcyjnym. Zeszyty Problemowe BOBR ME nr 37, Katowice 1983.
- [6] OBERRETEL K.: Die Oberfeldtheorie des Käfigmotors unter Berücksichtigung der durch die Ankerrückwirkung verursachten Statoroberströme und der parallelen Wicklungszweige. A.f.E. 1965, cz. 49, z. 6, s. 343-364.
- [7] RUSEK J.: Analiza harmoniczna stanu ustalonego silnika asynchronicznego. Zeszyty Naukowe AGH, z. 9, Kraków 1986.
- [8] STEPINA J.: Space vector analysis of synchronising torques in squirrel-cage induction motors. Acta Technica CSAV, 1967, nr 6, s. 685 - 701.
- [9] TAEGEN F., HOMMES E.: Die Theorie des Käfigläufermotors unter Berücksichtigung der Ständer und Läuferrückwirkung. A.f.E. 1974, z. 56, s. 331 - 339.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Bohdan Narolski

Wpłynęło do Redakcji dnia 3 lutego 1989 r.

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ РАСЧЁТА ПАРАЗИТНЫХ МОМЕНТОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Р е з ю м е

Обсуждены и классифицированы различные методы расчёта паразитных моментов в асинхронных двигателях /методы, базирующие на переменном анализе схем замещения и магнитного поля в воздушном зазоре машины, методы, основанные на непосредственном решении уравнений на вычислительной машине, метод использующий схемы разложения машины на элементарные машины/. Рассмотрены различные упрощения принимаемые в пределах сущности этих методов, которые являются источниками погрешностей /методических/. Особое внимание обращено на

упрощения, сущность которых заключается в ограничении числа учитываемых пространственных гармоник, в алгебраическом суммировании, слагаемых паразитных моментов, в пренебрежении паразитными моментами II порядка и приближенном расчёте индуктивности дифференциального рассеяния. Дана оценка влияния этих упрощений на результаты расчетов на примере двигателя Сг 132 С-6.

SOURCES OF ERRORS FOR DIFFERENT CALCULATION METHODS OF PARASITIC TORQUES IN INDUCTION MOTORS

S u m m a r y

Various methods of calculation of parasitic torques in induction motors are described and classified (methods, based on alternating analyses of equivalent circuits and magnetic field in the air-gap of a motor; methods, based on the direct solution of equations with help of a computer; method, based on the diagram of decomposition of the machine into elementary machines). Different simplifications assumed in the methods and being the sources of errors (the so-called errors of method) are considered. Particular attention has been paid to the simplifications connected with the limitation of the number space harmonics taken into account, algebraical summing of parasitic torque-components, neglecting of parasitic torques of II order and the approximate calculations or differential leakage reactances. As an example, the parasitic torques have been determined for the motor Sg 132 S-6 and the influence of the simplifications on the results of calculations has been evaluated.