

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Roman MIKSIEWICZ

Instytut Maszyn
i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

KRYTYCZNA ANALIZA ZAŁOŻEŃ UPRASZCZAJĄCYCH PRZYJMOWANYCH PRZY OBLICZANIU MOMENTÓW PASOŻYTNICZYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

Streszczenie. W pracy dokonano przeglądu założeń upraszczających przyjmowanych w analizie momentów pasożytniczych silników indukcyjnych. Na przykładzie silnika Sg 132 S-6 dokonano oszacowania udziału błędów, wynikających z poszczególnych założeń upraszczających w całkowitym błędzie obliczeń amplitud pasożytniczych momentów synchronicznych. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi nieliniowości obwodu magnetycznego dla strumienia głównego i dla strumienia rozproszenia oraz oddziaływaniu prądów poprzecznych pomiędzy prętami klatki wirnika. Pokazano również, że uwzględnienie wpływu ukosowania żłobków wirnika na synchroniczne momenty pasożytnicze za pomocą współczynnika skosu, obliczonego dla fikcyjnej nitkowej strugi prądowej, skupionej w środku otwarcia żłobka może być źródłem istotnych błędów.

1. Wstęp

Istnieje wiele różnych metod obliczania momentów pasożytniczych, powstających w silnikach indukcyjnych, lecz uzyskiwane na ich podstawie wyniki odbiegają znacznie od wartości momentów uzyskiwanych na drodze pomiarowej. Obliczane wartości momentów są mniejsze i to nawet kilka razy od wartości mierzonych. Źródłem tych błędów są założenia upraszczające, przyjmowane przy formułowaniu równań (modeli matematycznych), maszyn, które nazywamy błędami modelu oraz uproszczenia, czynione przy rozwiązywaniu równań, czyli błędy metody rozwiązania.

Celem niniejszej pracy jest klasyfikacja, omówienie i ocena znaczenia poszczególnych błędów modelu, a więc tych błędów, które są wspólne dla różnych metod obliczania momentów pasożytniczych. Ponadto podjęta została próba ilościowego oszacowania ich udziału w całkowitym błędzie obliczeń momentów pasożytniczych. Dla dokonania tego przeprowadzono obliczenia i pomiary momentów pasożytniczych w kilku wybranych silnikach indukcyjnych serii G (Sg 132 S-4, Sg 132 S-6, Sg 132 S-8). Obliczenia wykonano opierając się na modelu silnika z wyższymi harmonicznymi przestrzennymi przepływu (tzw. schematy rozkładu maszyny na maszyny elementarne, omówione w pracy [3]) przy różnych założeniach upraszczających, co pozwoliło na przeanalizowanie

zowanie wpływu, jaki zjawiska fizyczne związane z poszczególnymi założeniami wywierają na końcowe wyniki obliczeń. Wpływ ten zilustrowano wynikami obliczeń dla silnika Sg 132 S-6 ($P_n = 3$ kW, $U_n = 380$ V, $2p = 6$, $z_1 = 36$, $z_2 = 33$). W silniku tym pasożytnicze momenty synchroniczne występują przy trzech różnych prędkościach obrotowych:

$$n_1 = 90,9 \frac{\text{obr}}{\text{min}}, \quad n_2 = 45,5 \frac{\text{obr}}{\text{min}} \quad \text{i} \quad n_3 = 0,$$

przy czym moment synchroniczny przy pracy hamulcowej jest momentem dominującym. Jego wartość zmierzona metodą dynamiczną wynosi 26,8 Nm, wartość obliczona przy powszechnie przyjmowanych założeniach upraszczających - 2,6 Nm. Tak znaczne rozbieżności wyników obliczeń i pomiarów są uzasadnione przyjętymi założeniami upraszczającymi.

Wydaje się, że wykorzystywanie do obliczenia pasożytniczych momentów synchronicznych klasycznego modelu maszyny o elementach skupionych, opartego na rozkładzie pola magnetycznego w szczelinie powietrznej w szereg Fouriera dotyka granic, a może nawet przekracza zakres stosowalności tego modelu, albowiem istotne wymiary geometryczne obwodu magnetycznego maszyny stają się porównywalne z okresem wyższych harmonicznych przestrzennych uczestniczących w powstaniu momentów pasożytniczych. Tylko krytyczna i wnikliwa analiza zjawisk fizycznych, zachodzących w maszynie, przeprowadzona od nowa dla takich właśnie harmonicznych wysokiego rzędu o małym okresie, stwarza szansę na przybliżenie wyników obliczeń, opartych na klasycznych modelach do wyników pomiarów.

Niniejsza praca ma wskazać na te spośród założeń upraszczających, które wydają się być z punktu widzenia harmonicznych przestrzennych wysokiego rzędu najbardziej dyskusyjne, budzą najwięcej wątpliwości i niosą prawdopodobieństwo największych błędów.

2. Przegląd założeń upraszczających

Przy formułowaniu modeli matematycznych maszyn indukcyjnych (modeli obwodowych, w których obwód magnetyczny maszyny traktuje się jako obwód o elementach skupionych) przyjmuje się następujące założenia upraszczające:

- a) liniowy obwód magnetyczny maszyny ($\mu = \text{const}$),
- b) skupienie okładu prądowego w środku szczyrbiny żłobka w postaci impulsu Diraca (założenie takiego wyidealizowanego rozkładu okładu prądowego oznacza, że rozkład krzywej przestrzennej przepływu magnetycznego wzdłuż obwodu szczeliny będzie krzywą schodkową),
- c) brak prądów poprzecznych pomiędzy sąsiadującymi prętami klatki wirnika (założenie idealnie izolowanej klatki wirnika),
- d) równomierny rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta wirnika (brak wypierania prądu),

- e) gładką szczelinę powietrzną (nieuźłobkowane powierzchnie stojana i wirnika),
- f) brak prądów wirowych w żelazie (idealne pakietowanie rdzenia) i brak strat mechanicznych.

Powyższe założenia dotyczące obwodu magnetycznego maszyny przyjmuje się nawet wówczas, gdy analiza maszyny jest ograniczona do harmonicznej głównej (p-tej harmonicznej pola magnetycznego). Wpływ, jaki założenia upraszczające wywierają na dokładność obliczeń związanych z harmoniczną główną, jest dobrze zbadany, a literatura, dotycząca tego zagadnienia - bardzo obszerna. W odniesieniu do każdego z wymienionych założeń upraszczających a-f istnieje szereg praktycznych metod, pozwalających na zmniejszenie błędów, wynikających z ich przyjęcia, poprzez odpowiednią korektę wartości parametrów równań (parametrów schematu zastępczego). Modyfikacje te wynikają bądź to ze ścisłych rozważań teoretycznych poszczególnych zjawisk (np. z rozwiązania równań cząstkowych pewnego fragmentu obwodu magnetycznego przy osłabionych założeniach upraszczających), bądź też są podyktowane wynikami badań doświadczalnych (przegląd różnych metod obliczania skorygowanych parametrów maszyn indukcyjnych jest zawarty w pracach [5], [6]). Błędy modelu, na wstępie duże, można więc w odniesieniu do zjawisk związanych z harmoniczną główną znacznie pomniejszyć. Wymaga to jednak doświadczenia w obliczaniu maszyn, albowiem korekty te w istotny sposób zależą od wielkości maszyny i od szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Przy obliczaniu zjawisk pasożytniczych, związanych z wyższymi harmonicznymi pola magnetycznego, zagadnienie wpływu założeń upraszczających na dokładność obliczeń ulega dalszej komplikacji.

Po pierwsze - przyjęte założenia upraszczające są źródłem znacznie większych błędów. O ile w odniesieniu do zjawisk; związanych z harmoniczną główną, były to błędy rzędu co najwyżej kilkunastu lub kilkudziesięciu %, to w odniesieniu do momentów pasożytniczych są to błędy, sięgające nawet kilkuset %.

Po drugie - waga poszczególnych założeń upraszczających jest zupełnie inna (odmienne założenia wysuwają się na plan pierwszy jako istotne źródła błędów).

Po trzecie - klasa zjawisk, które nie mogą być w zadowalający sposób uwzględnione na drodze parametrów, jest znacznie szersza.

Podkreślimy ponadto, że metody korekty parametrów schematów zastępczych zostały opracowane przede wszystkim z myślą o poprawie dokładności obliczeń dla harmonicznej głównej i przeniesione w sposób formalny poprzez analogię na zjawiska związane z wyższymi harmonicznymi, nie muszą w tym samym stopniu poprawiać (a mogą nawet wcale nie poprawiać) dokładności obliczeń momentów pasożytniczych. Mniejsza zaś skuteczność tych metod będzie miała w odniesieniu do momentów pasożytniczych niewspółmiernie większy wpływ na błąd, niż to miało miejsce w przypadku obliczeń, związanych z

harmoniczną główną, albowiem - jak podkreślono - wstępny błąd, wynikający z przyjmowania poszczególnych założeń upraszczających może w odniesieniu do zjawisk pasożytniczych sięgać kilkuset %.

3. Wpływ założenia upraszczającego a

Ze względu na to, że strumienie magnetyczne sprzężone z uzwojeniem dzielimy na strumienie główne i strumienie rozproszenia zamykające się wzdłuż różnych dróg magnetycznych, nasycenie obwodu magnetycznego w modelach maszyny z harmoniczną główną uwzględnia się za pomocą dwóch współczynników: współczynnika nasycenia dla strumienia głównego k_n oraz współczynnika nasycenia dla strumienia rozproszenia κ (tzw. metoda syntetyczna), pomniejszającego wartość indukcyjności rozproszenia żłobkowego i indukcyjności rozproszenia różnicowego.

Przy względnieniu wyższych harmonicznych przyjmuje się, że stan nasycenia obwodu magnetycznego może być również określony współczynnikami k_n i κ , jednakże określenie zastępczych, syntetycznych wartości tych współczynników napotyka na trudności wynikające z tego, że wyższe harmoniczne pola magnetyczne zamykają się wzdłuż różnych dróg magnetycznych i na różną głębokość wnikają do wnętrza maszyny. Takie podejście, oparte na współczynnikach nasycenia k_n i κ , pozwala na uwzględnienie tylko wpływu nasycenia na wartości amplitud harmonicznych pola, istniejących w maszynie przy obwodzie magnetycznym nienasyconym. Nie daje natomiast możliwości uwzględnienia nowych harmonicznych pola, powstających w szczelinie powietrznej maszyny przy nasycaniu się głównego obwodu magnetycznego, jak też harmonicznych przestrzennych, pojawiających się jako wynik zmiany przewodności magnetycznej szczeliny pod wpływem nasycania się dróg magnetycznych dla strumienia żłobkowego (pozornego powiększania się szczyrbiny żłobka) [1].

Aby zilustrować wpływ nieliniowości obwodu magnetycznego na pasożytnicze momenty synchroniczne, przeprowadzono obliczenia momentów w silniku Sg 132-S-6 dla trzech różnych wariantów:

- obwód magnetyczny główny nieliniowy ($k_n \neq 1$), obwód magnetyczny dla strumienia rozproszenia liniowy ($\kappa = 1$),
- obwód magnetyczny główny liniowy ($k_n = 1$), obwód magnetyczny dla strumienia rozproszenia nieliniowy ($\kappa \neq 1$),
- obwód magnetyczny główny nieliniowy ($k_n \neq 1$), obwód magnetyczny dla strumienia rozproszenia nieliniowy ($\kappa \neq 1$).

Należy zwrócić uwagę, że wartości współczynników nasycenia, a zwłaszcza współczynnika κ zmieniają się wraz z poślizgiem w szerokich granicach. Przykładowo, przy przejściu od punktu pracy znamionowej do stanu zwarcia wartość współczynnika κ zmienia się z 0,93 do 0,397, a współczynnika k_n z

1,34 do 1,14. Stąd w programie obliczeń momentów wartości współczynników nasycenia są wyznaczone dla każdego poślizgu s osobno i są różne dla różnych prędkości synchronicznych.

Wyniki obliczeń amplitud wszystkich synchronicznych momentów pasożytniczych zestawiono w tabeli 1. Wynika z niej, że duże znaczenie posiada uwzględnienie wpływu nasycenia się obwodu magnetycznego na wartość reaktancji rozproszenia. Dominujący synchroniczny moment pasożytniczy uległ na skutek uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego głównego i rozproszenia powiększeniu o ok. 80%.

Tabela 1

Prędkości synchroniczne n_s [obr/min]	Momenty pasożytnicze [Nm] przy		
	$k_n \neq 1, \kappa = 1$	$k_n = 1, \kappa \neq 1$	$k_n \neq 1, \kappa \neq 1$
- 90,9	1,41	2,71	2,62
45,5	0,26	0,63	0,57
0	0,00054	0,00054	0,00051

4. Wpływ założenia upraszczającego b

Założenie to przyjmuje się przy wyprowadzeniu wzorów na współczynniki grupy, skrótu i skosu (dla harmonicznej głównej). Można wycofać się z założenia o nitkowym rozkładzie przepływu i przyjąć, że okład jest stały wzdłuż otwarcia żłobka poprzez wprowadzenie do obliczeń dodatkowego współczynnika - współczynnika szczyrbiny.

Wzory na współczynniki grupy, skrótu, skosu i szczyrbiny można w łatwy, czysto formalny sposób rozszerzyć na harmoniczne pola o dowolnym rzędzie ν . Przy obliczaniu amplitudy harmonicznej ν -tej pojawia się wówczas złudzenie, że amplitudę tę obliczamy dokładnie, albowiem posługujemy się wzorami, zawierającymi w jawnej postaci rząd ν . Złudzenie to pogłębia dodatkowo wprowadzenie do analizy współczynnika szczyrbiny, co sprawia wrażenie, że w obliczeniach uwzględnia się nawet rzeczywiste rozłożenie okładu prądu wzdłuż podziałki żłobkowej. Tymczasem obliczenia te są słuszne tylko dla harmonicznych, dla których okres jest znacznie (wielokrotnie) większy od otwarcia żłobka i tracą sens, gdy długości fali pola magnetycznego stają się porównywalne z otwarciem żłobka. Obrazowo mówiąc, dla harmonicznej przestrzennej o okresie porównywalnym z otwarciem żłobka b_0 pręt klatki wirnika stanowi po prostu płytę o wymiarach $b_0 \times l$ (l - długość wirnika). Oddziaływanie takiej wyższej harmonicznej przestrzennej na płytę

nie powinno być rozważane na gruncie teorii elementów skupionych, a zastąpienie płyty nieskończenie cienką nitką wydaje się niedopuszczalne. Dla zilustrowania tego zagadnienia na rys. 1 przedstawiono rozkład przestrzenny harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego: 69 i 129, a więc harmonicznych, odgrywających zasadniczą rolę w formowaniu pasywnych momentów synchronicznych w silniku Sg 132 S-6 na tle fragmentu przekroju poprzecznego tego silnika.

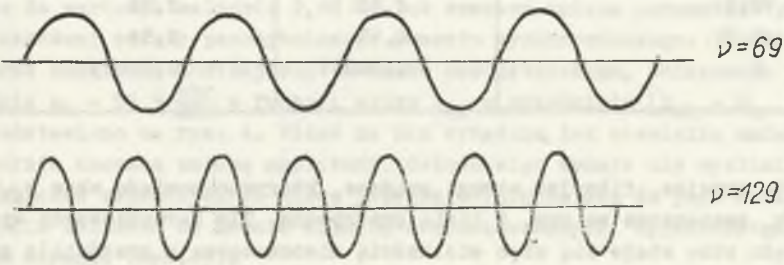
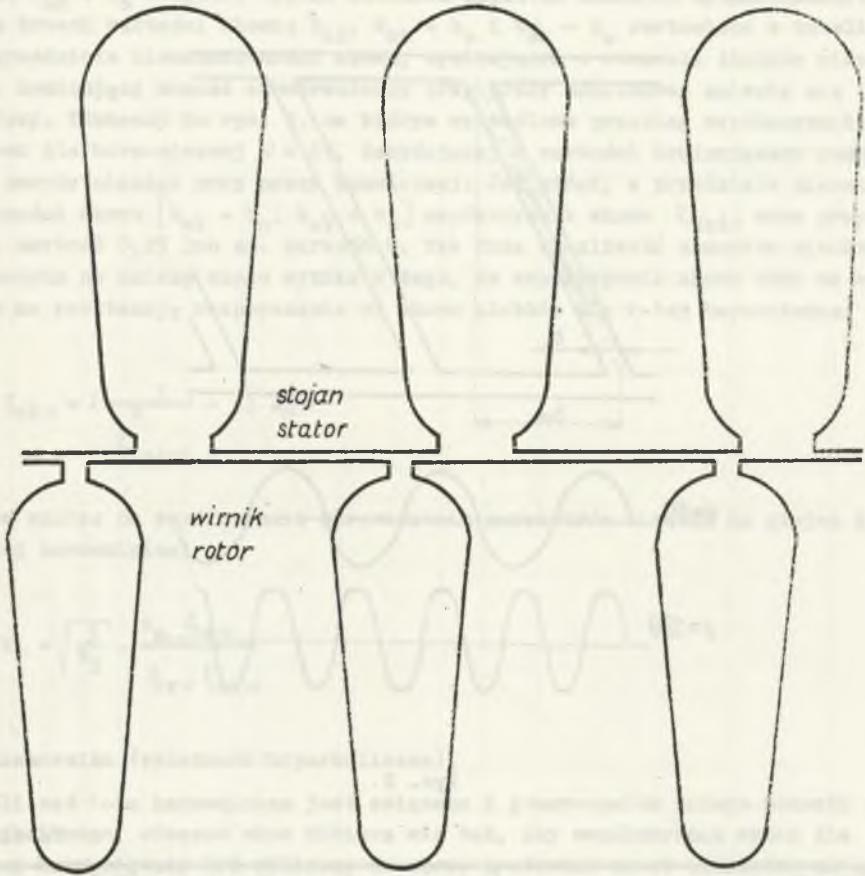
Wątpliwości, związane z założeniem o nitkowym rozkładzie okładu prądowego, potęgują się przy rozważaniu wpływu skosu żłobków wirnika na momenty pasywnicze. Skos żłobków wirnika w istotny sposób oddziałuje na zjawiska pasywnicze i jest jednym z podstawowych środków ograniczania momentów pasywniczych. Dla przykładu, amplitudy synchronicznych momentów pasywniczych dla silnika Sg 132 S-6 przy skosie rzeczywistym $b_{sk} = 0,491$ (skos względny, odniesiony do podziałki żłobkowej stojana) oraz przy założeniu, że wirnik posiada żłobki bez skosu ($b_{sk} = 0$) zestawiono w tabeli 2 (w tabeli podano również rzędy harmonicznych w dominujący sposób uczestniczących w formowaniu poszczególnych momentów pasywniczych).

Na skutek ukosowania wszystkie pasywnicze momenty synchroniczne maleją, chociaż w różnym stopniu. Dominujący moment synchroniczny związany z pracą hamulcową zmalał 30 razy, a moment synchroniczny przy pracy silnikowej - 7 razy. Skos żłobków w silniku Sg 132 S-6 został tak dobrany, aby przede wszystkim ograniczyć 69 harmoniczną, która decyduje o wartości momentu synchronicznego przy prędkości $n_1 = 90,9 \frac{\text{obr.}}{\text{min}}$.

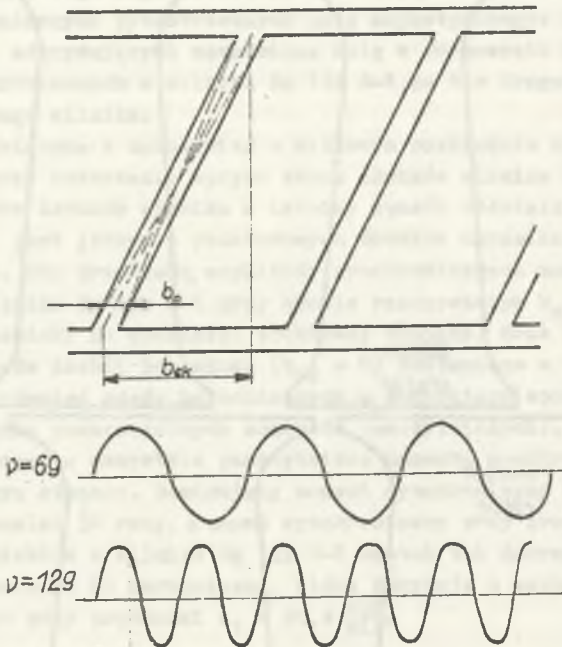
Tabela 2

Prędkość synchroniczna n_s [obr/min]	moment synchroniczny [Nm]		rzędy harmonicznych
	bez skosu	ze skosem	
- 90,9	78	2,6	3,69
45,5	4,4	0,57	3,129
			21,111
0	0,05	0,00051	75,123

Rozważmy teraz fragment obwodu magnetycznego wirnika silnika Sg 132 S-6, przedstawiony na rys. 2. Wydaje się, że w odniesieniu do harmonicznych przestrzennych wysokiego rzędu (np. $v = 69, 129$) traci sens posługiwanie się skosem, związanym z nitką prądową, przebiegającą w środku otwarcia żłobka, albowiem w aluminiowej "płycie" o wymiarach $b_0 \times l$ (b_0 - otwarcie żłobka wirnika, l - długość wirnika) możliwe są różne strugi prądowe.



Rys. 1



Rys. 2

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

Takie dwie skrajne, fikcyjne strugi prądowe, którym odpowiada skos $b_{sk}-b_o$ i $b_{sk}+b_o$ zaznaczono na rys. 2 linią przerywaną. Dla harmonicznych wysokiego rzędu skos staje się więc wielkością nieoznaczoną w przedziale geometrycznego otwarcia żłobka i można jedynie stwierdzić, że skos ten dla różnych możliwych strug prądowych mieści się w przedziale $b_{sk} \in [b_{sk}-b_o, b_{sk}+b_o]$. Dla zbadania znaczenia tego wniosku wykonano więc obliczenia

dla silnika Sg 132 S-6 przy założeniu, że skos wynosi: $b_{sk} - b_0 = 0,409$ oraz $b_{sk} + b_0 = 0,573$. Wyniki obliczeń amplitud momentów synchronicznych dla trzech wartości skosu: b_{sk} , $b_{sk} + b_0$ i $b_{sk} - b_0$ zestawiono w tabeli 3. W przedziale nieoznaczoności skosu, wynikającym z otwarcia żłobków wirnika, dominujący moment synchroniczny przy pracy hamulcowej zmienia się 6 razy. Tłumaczy to rys. 3, na którym wykreślono przebieg współczynnika skosu dla harmonicznej $\nu = 69$, decydującej o wartości dominującego momentu pasożytniczego przy pracy hamulcowej. Jak widać, w przedziale nieoznaczoności skosu $[b_{sk} - b_0, b_{sk} + b_0]$ współczynnik skosu ξ_{sk69} może przyjąć np. wartość 0,25 lub np. wartość 0. Tak duża wrażliwość momentów synchronicznych na zmianę skosu wynika z tego, że współczynnik skosu tkwi we wzorze na reaktancję rozproszenia od skosu żłobków dla ν -tej harmonicznej

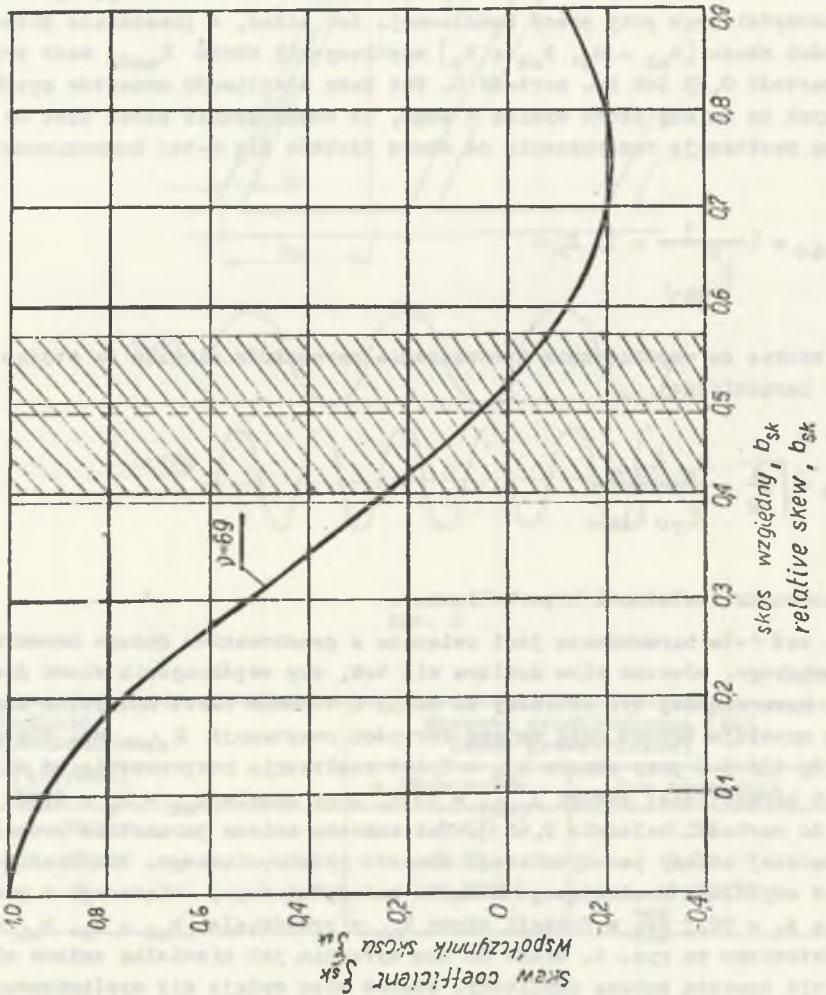
$$X_{sk\nu} = \left(\frac{1}{2} - 1 \right) X_{\mu\nu} \xi_{sk\nu}$$

i we wzorze na współczynnik sprowadzenia parametrów wirnika na stojan dla ν -tej harmonicznej

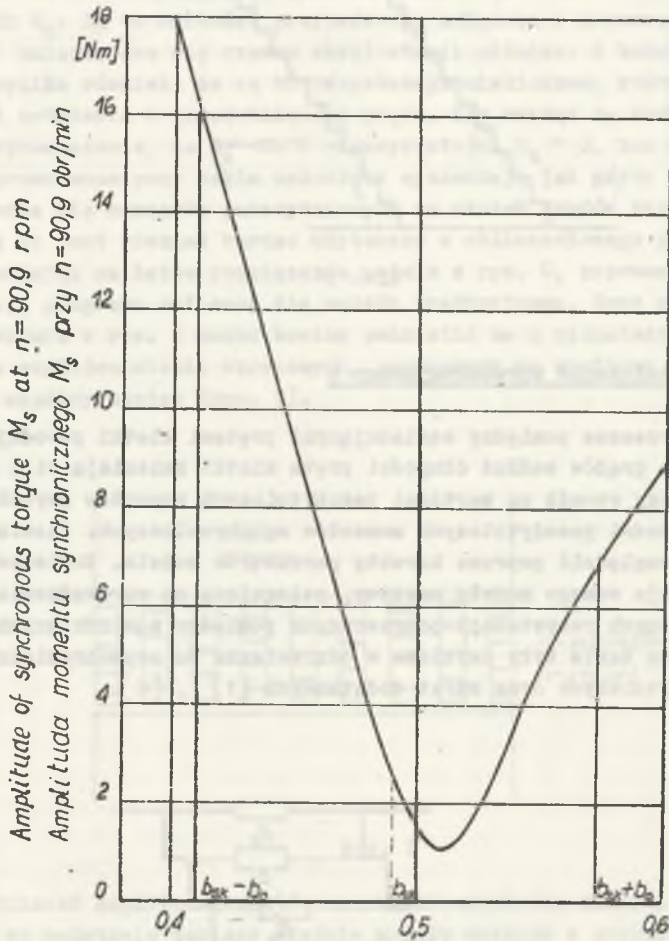
$$k_\nu = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{x_s \xi_{s\nu}}{\xi_{r\nu} \xi_{sk\nu}}$$

w mianowniku (zależność hiperboliczna).

Jeśli zaś ν -ta harmoniczna jest związana z generowaniem dużego momentu pasożytniczego, wówczas skos dobiera się tak, aby współczynnik skosu dla ν -tej harmonicznej był zbliżony do zera, a wówczas nawet niewielka zmiana skosu wywołuje bardzo dużą zmianę wartości reaktancji $X_{sk\nu}$, np. dla silnika Sg 132 S-6 przy skosie $b_{sk} = 0,491$ reaktancja rozproszenia od skosu dla 69 harmonicznej wynosi $X_{sk69} = 53 \Omega$, przy skosie $b_{sk} - b_0 = 0,409$ maleje do wartości zaledwie $2,68 \Omega$. Tak znaczna zmiana parametrów prowadzi do znacznej zmiany pasożytniczego momentu synchronicznego. Przykładowo, wykres amplitudy dominującego momentu pasożytniczego, związanego z prędkością $n_1 = 90,9 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$ w funkcji skosu b_{sk} w przedziale $[b_{sk} - b_0, b_{sk} + b_0]$ przedstawiono na rys. 4. Widać na nim wyraźnie, jak niewielka zmiana skosu wywołuje znaczną zmianę amplitudy. Celowe więc wydaje się wyeliminowanie z obliczeń współczynnika skosu poprzez cofnięcie się do jego definicji i oparcie obliczeń na modelu silnika z niuskosowanymi "zygzakowatymi" prętami wirnika (rys. 5).

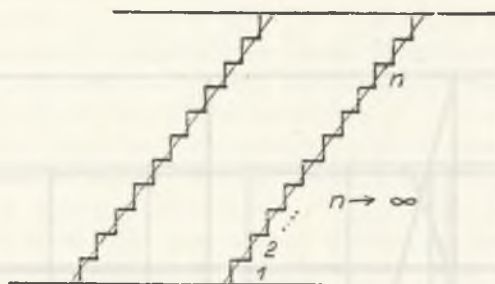


Rys. 3



skos względny, b_{sk}
 relative skew, b_{sk}

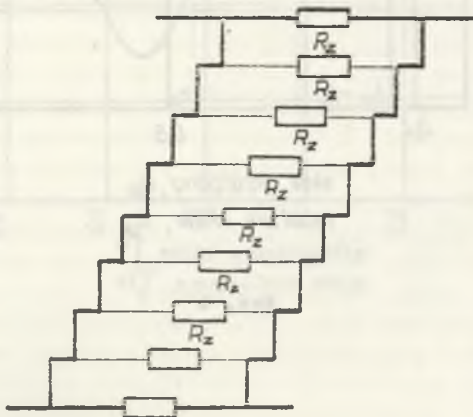
Rys. 4



Rys. 5

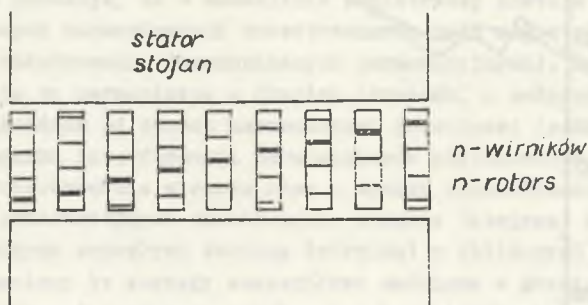
5. Wpływ założenia upraszczającego c

Prądy poprzeczne pomiędzy sąsiadującymi prętami klatki powodują, że fazy i wartości prądów wzdłuż długości pręta klatki zmieniają się. Wpływa to w zasadniczy sposób na wartości pasożytniczych momentów asynchronicznych, jak i na wartości pasożytniczych momentów synchronicznych. Zjawiska tego nie da się uwzględnić poprzez korektę parametrów modelu. Konieczna staje się modyfikacja samego modelu maszyny, polegająca na wprowadzeniu pewnej liczby skupionych rezystancji poprzecznych pomiędzy sąsiadującymi prętami wirnika. Próby takie były czynione w odniesieniu do asynchronicznych momentów pasożytniczych oraz strat dodatkowych [1] , [4] .



Rys. 6

Aby uwzględnić prądy poprzeczne w wirniku, a równocześnie uniknąć stosowania w obliczeniach współczynnika skosu, można przyjąć model przedstawiony na rys. 6. Istotną trudność sprawia określenie wartości rezystancji poprzecznych R_z . Są to wartości przypadkowe, związane z procesem wytwarzania maszyny i zmieniające się czasem eksploatacji silnika. Z badań laboratoryjnych wynika również, że są to rezystancje nieliniowe, których wartości zależą od natężenia i częstotliwości prądu. Aby ominąć tę trudność, można przyjąć uproszczenie, że $R_z \rightarrow 0$. W rzeczywistości $R_z > 0$, tak więc obliczenia przeprowadzone przy takim założeniu wyznaczają jak gdyby górną granicę powiększenia się momentów pasożytniczych na skutek prądów poprzecznych. Założenie to jest również bardzo użyteczne z obliczeniowego punktu widzenia, pozwalając na łatwe rozwiązanie modelu z rys. 6, poprzez pewną tylko modyfikację programu obliczeń dla modelu tradycyjnego. Przy założeniu, że $R_z \rightarrow 0$, wirnik z rys. 6 można bowiem podzielić na n niezależnych wirników, wzajemnie względem siebie skręconych, osadzonych na wspólnym wale i posiadających wspólny stojan (rys. 7).



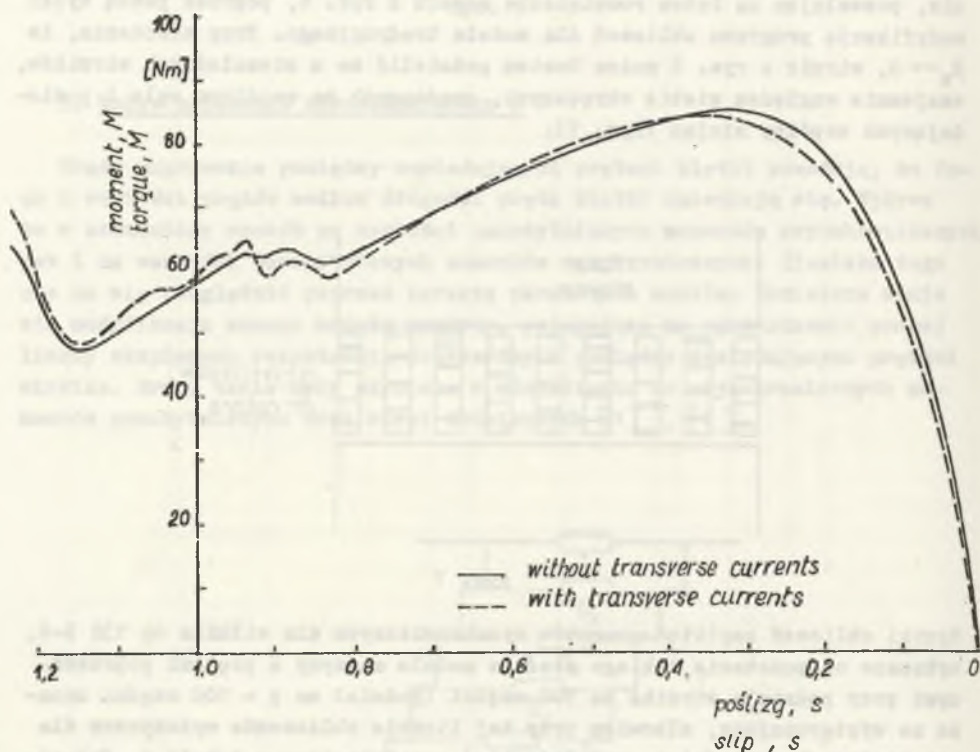
Rys. 7

Wyniki obliczeń amplitud momentów synchronicznych dla silnika Sg 132 S-6, wykonane na podstawie takiego właśnie modelu maszyny z prętami poprzecznymi przy podziale wirnika na 100 części (podział na $n = 100$ części uznano za wystarczający, albowiem przy tej liczbie obliczenia wykonywane dla wzrastających wartości n , ustalają się) przedstawiono w tabeli 4. Jak widać, uwzględnienie prądów poprzecznych w wirniku posiada istotne znaczenie dla zbliżenia wyników obliczeń i pomiarów.

Na rys. 8 zestawiono dodatkowo wykresy charakterystyk mechanicznych momentów pasożytniczych dla modelu bez prądów poprzecznych i z prądami poprzecznymi.

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



Rys. 8

6. Wpływ założenia upraszczającego d

Zjawisko wypierania prądu w prętach klatki wirnika zmienia przede wszystkim charakterystykę mechaniczną, związaną z harmoniczną główną, co powoduje, że w silnikach 2-kłatkowych lub głębokożłobkowych wpływ momentów pa-

sożytnicznych na wypadkową charakterystykę mechaniczną jest relatywnie mniejszy. Zagadnienie uwzględniania wypierania prądu jest w literaturze technicznej bardzo dobrze opracowane. Znanych jest wiele metod, pozwalających na uwzględnienie wypierania prądu bądź też poprzez uzmiennienie wraz z poślizgiem wartości parametrów wirnika, bądź też poprzez przyjęcie wieloklatkowego modelu silnika (wielu gałęzi równoległych w schemacie zastępczym wirnika). Przy obliczaniu momentów pasożytnicznych w silnikach głębokożłobkowych trudność sprawia określenie wartości parametrów wirnika dla prądów obcych częstotliwości.

7. Wpływ założenia upraszczającego e

Wpływ użłobkowania uwzględnia się w modelach maszyny z harmoniczną główną za pośrednictwem współczynników Cartera k_{c1} i k_{c2} , powiększających pozornie szczelinę powietrzną. Takie podejście pozwala wyłącznie na ujęcie wpływu żłobkowania na harmoniczne pola magnetyczne - wywołane harmonicznymi przepływami stojana i wirnika. W rzeczywistości użłobkowanie stojana i wirnika powoduje, że w szczelinie powietrznej zostaje wygenerowany cały szereg nowych harmonicznymi przestrzennymi polami magnetycznymi tzw. harmonicznymi użłobkowania (harmonicznymi permeancyjnymi). Szczególne znaczenie posiadają tu harmoniczne o długich okresach, a zwłaszcza harmoniczne o okresie dłuższym od okresu harmonicznej pracującej (podharmoniczne), powstające w wyniku interferencji harmonicznymi użłobkowania stojana i harmonicznymi użłobkowania wirnika oraz w wyniku oddziaływania na siebie harmonicznymi przestrzennymi użłobkowania wirnika (stojana) i harmonicznymi przestrzennymi przepływami stojana (wirnika) o zbliżonych do siebie okresach. Mechanizmy te zostały szczegółowo omówione w pracy [1]. Wynikiem tych oddziaływań jest zniekształcenie charakterystyki mechanicznej, polegające na jej podniesieniu w części hamulcowej i obniżeniu w części silnikowej. Uwzględnienie obu stron użłobkowania szczeliny prowadzi do znacznego skomplikowania modelu matematycznego silnika. Model taki, dla stanów ustalonych, został przedstawiony w pracy [7] i rozwiązany dla silnika w stanie zwarcia. Dla stanów nieustalonych model taki został sformułowany w pracy [2]. Są to jak na razie pierwsze podejmowane w tym zakresie próby, z których nie płyną dość wyraźne i ogólne wnioski, co do wpływu użłobkowania na własności eksploatacyjne silnika.

8. Wpływ założenia upraszczającego f

Prądy wirowe oddziałują na wiele różnych zjawisk zachodzących w maszynie i ich wpływ może być uwzględniony w różnych parametrach, np. przyjmuje się, że prądy wirowe wygaszają pola magnetyczne, wywołane prądami poprzecz-

nymi w żelazie wirnika, co pozwala na zaniechanie reakcji poprzecznej i przyjęcie jako impedancji - rezystancji poprzecznej. Prądy wirowe wpływają również na głębokość wnikania do wnętrza maszyny wyższych harmonicznych przestrzennych, związanych z obcymi częstotliwościami.

9. Wnioski

Istniejące metody obliczania pasożytniczych momentów synchronicznych są obciążone poważnymi błędami. Tak znaczne błędy wynikają z przyjmowania takich samych założeń upraszczających co przy analizie zjawisk, związanych z harmoniczną główną. Założenia te są przy obliczaniu amplitud pasożytniczych momentów synchronicznych niedopuszczalne. Dotyczy to przede wszystkim pomijania oddziaływania prądów poprzecznych w wirniku oraz przybliżonego uwzględniania wpływu skosu żłobków wirnika za pomocą współczynnika skosu, obliczanego dla fikcyjnej nitkowej strugi prądowej skupionej w środku otwarcia żłobka. Istotne znaczenie posiada również nieliniowość obrotu magnetycznego, zwłaszcza dla strumienia rozproszenia. Konieczne jest również kontynuowanie badań dotyczących wpływu użłobkowania szczeliny powietrznej na pasożytnicze momenty synchroniczne. Wydaje się, że poprawne uwzględnienie powyżej wymienionych zagadnień zapewni dostateczną zgodność wyników obliczeń i pomiarów.

LITERATURA

- [1] HELLER V., HAMATA V.: Harmonic field effects in induction machines, Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1977.
- [2] HOMMES E., PAAP G.C.: The analysis of the 3-phase squirrel-cage induction motor with space harmonics. Archiv für Elektrotechnik, 1984, z. 67, ss. 217 - 236.
- [3] KLUSZCZYŃSKI K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. "Elektryka", z. 102, Gliwice 1986.
- [4] KRZYMIŃSKI L.: Wpływ niezolowania klatki na asynchroniczne momenty pasożytnicze w silnikach indukcyjnych. Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1963.
- [5] SLIWŃSKI T., GŁOWACKI A.: Parametry rozruchowe silników indukcyjnych. PWN, Warszawa 1982.
- [6] TUROWSKI J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.
- [7] RUSEK J.: Analiza harmoniczna stanu ustalonego silnika asynchronicznego. Zeszyty Naukowe AGH "Elektrotechnika", z. 9, Kraków 1986.
- [8] WACH P.: Niesymetrie wewnętrzne maszyn indukcyjnych. Zeszyty Naukowe WSI, z. 19, Opole 1982.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Bohdan Narolski

Wpłynęło do Redakcji dnia 3 lutego 1989 r.

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРОЩАЮЩИХ ДОПУЩЕНИЙ ПРИ РАСЧЁТЕ
ПАРАЗИТНЫХ МОМЕНТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В работе проведен обзор упрощающих допущений принимаемых в анализе паразитных моментов асинхронных двигателей. На примере двигателя Сг 132-С6 дана оценка доли ошибок, вытекающих из отдельных упрощающих допущений, в полной ошибке расчёта амплитуд паразитных синхронных моментов. Особое внимание обращено на влияние нелинейности магнитной цепи для главного потока рассеяния, а также на воздействие поперечных токов текущих между стержнями клетки ротора. Показано тоже, что учёт влияния скоса пазов ротора на синхронные паразитные моменты с помощью коэффициента скоса рассчитанного для фиктивной струи тока сосредоточенной в середине открытия паза, может быть источником существенных погрешностей.

CRITICAL ANALYSIS OF SIMPLIFYING ASSUMPTIONS RELATED TO THE CALCULATION
OF PARASITIC TORQUES IN INDUCTION MOTORS

S u m m a r y

A survey of the simplifying assumptions relates to the calculation of parasitic torques in induction motors has been made in the paper. The magnitudes of synchronous parasitic torques have been calculated under the different conditions for the motor Sg 132 S-6, in order to estimate errors resulting from the individual simplifying assumptions. Particular attention has been paid to the influence of saturation of magnetic circuit for main flux and for leakage flux as well as to the reaction of transverse currents between the adjacent bars of a rotor. It has also been shown, that the influence of skewing on the synchronous parasitic torques cannot be taken into account by means of skew coefficient calculated for fictitious infinitely thin current filament concentrated in the middle of the rotor slot opening because such an approach can be the source of considerable errors.