

BADANIE WPŁYWU NIESYMETRII I NIESINUSOIDALNOŚCI NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO NA PRACĘ TRÓJFAZOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

The Effect of Asymmetry and Non-sinusoidality of Supply Voltage on the Operation of Three-phase Induction Motors

Jerzy FRĄCKOWIAK, Stanisław RAWICKI, Zbigniew STEIN, Mieczysław STOLPE
 Politechnika Poznańska

Streszczenie: W artykule omówiono różnorodne przypadki użytkowania trójfazowych silników indukcyjnych w warunkach różniących się do wyidealizowanych założeń upraszczających, wprowadzanych podczas projektowania i konstruowania silników. Zwrócono uwagę na zagadnienia związane z niezawodnością trójfazowych silników indukcyjnych. Omówiono problematykę powiększania niezawodności eksploatacyjnej silników przy niesymetrii napięcia zasilającego.

Przeanalizowano spektrum napięć i prądów silnika indukcyjnego zasilanego z trójfazowego falownika napięcia. Pokazano, że analiza częstotliwościowa prądu stojana może stanowić skuteczne narzędzie do diagnozowania stanu uzwojeń klatkowych silników indukcyjnych. Zamieszczono wyniki badań trakcyjnego trójfazowego silnika indukcyjnego zasilanego z falowników napięcia; w szczególności dokonano analizy spektrum napięć zasilających, prądów, momentu elektromagnetycznego oraz strumieni skojarzonych.

Summary: Various cases of utilization of three-phase induction motors in conditions other than the ones assumed for the design engineering of the motors are discussed. Problems connected with the reliability of three-phase induction motors are considered. Questions relating to improving the reliability of the motors under asymmetric supply voltage are discussed. The spectrum of voltages and currents of an induction motor fed from a three-phase voltage inverter is analysed. It is shown that frequency analysis may be used for diagnostics of the rotor winding of squirrel-cage induction motors. The results of tests of a traction three-phase induction motor fed from voltage inverters are given; particularly an analysis of the spectrum of supply voltages, currents, electromagnetic torque and magnetic fluxes.

1. WSTĘP

Maszyny indukcyjne należą do dużego zbioru elektromechanicznych przetworników energii nazywanych powszechnie maszynami elektrycznymi. Maszyny indukcyjne, a zwłaszcza trójfazowe silniki indukcyjne, są produkowane w bardzo dużych ilościach, w szerokim przedziale znamionowych mocy, napięć i prędkości obrotowych. Trójfazowe silniki indukcyjne są stosowane do napędu różnego rodzaju urządzeń i mechanizmów, przy czym większość ich jest produkowana do tzw. powszechnego zastosowania. Masowość produkcji tego typu silników, mimo dużej różnorodności zastosowań, powoduje, że są one projektowane do użytkowania w określonych, dość wyidealizowanych warunkach, których w praktyce na ogół nie udaje się dotrzymać.

Użytkownicy trójfazowych silników indukcyjnych często nie są nawet świadomi warunków jakie powinni spełnić, by eksploatować maszyny zgodnie z ustalonymi dla nich zasadami podanymi w Polskich Normach (np. PN-88/E-06701 czy PN-89/E-05012) oraz w przepisach eksploatacji. Niedotrzymanie przez użytkownika tzw. znamionowych warunków pracy maszyny jest na ogół korzystne dla producenta, bo praktycznie zwalnia go od odpowiedzialności (gwarancji) w przypadkach niespodziewanych i przedwczesnych uszkodzeń maszyny. Łatwo wtedy wykazać, że uszkodzenie nastąpiło z winy eksploatatora, a nie producenta czy konstruktora. Ponieważ dość często zdarza się, że silniki indukcyjne są użytkowane w warunkach, które trudno

jednoznacznie uznać za zgodne lub niezgodne z określonymi przez normy i przepisy, w artykule podjęto próbę przedstawienia zasad, wg których można oceniać wpływ różnego rodzaju wymuszeń zakłócających pracę silników. Omówienie ich wymagało stosunkowo obszernego wprowadzenia, w którym m. in. zwrócono uwagę na niektóre zagadnienia związane z niezawodnością trójfazowych silników indukcyjnych.

2. OGÓLNE ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z NIEZAWODNOŚCIĄ TRÓJFAZOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

Maszyny elektryczne należą do obszernego zbioru obiektów technicznych, które w tzw. łańcuchu działań przechodzą kolejno proces konstruowania, wytwarzania i eksploatacji. Celem procesu konstruowania i wytwarzania jest przygotowanie maszyny do procesu eksploatacji.

W teorii i praktyce dla scharakteryzowania gotowości maszyny elektrycznej do wykonywania bez zakłóceń zadań — do których jest przeznaczona — zawsze, gdy powstaje taka potrzeba, używa się pojęcia „niezawodność”. Pojęcie to definiuje się jako właściwość maszyny, charakteryzującą jej zdolność do wykonywania określonych funkcji, w określonych warunkach i w określonym przedziale czasu. Niezawodność jest właściwością kompleksową, obejmującą, w zależności od przeznaczenia maszyny i warunków jej eksploatacji, takie właściwości, jak: nieuszk-

działność, trwałość, przechowywalność, naprawialność. Ilościowo niezawodność maszyny elektrycznej, tak jak każdego innego obiektu technicznego, ocenia się za pomocą wskaźników wybieranych i wyznaczanych z uwzględnieniem właściwości maszyny oraz sposobów i warunków jej eksploatacji. Traktuje się ją jako obiekt techniczny dwustanowy, naprawialny, o szeregowej strukturze niezawodności, w procesie eksploatacji użytkowany i obsługiwany.

Aktualnie wskaźniki niezawodności maszyn elektrycznych można oceniać wyłącznie na podstawie wyników badań przeprowadzanych w trakcie eksploatacji, ponieważ wartości deklarowanych przez wytwórców bądź ustalonych przez przepisy lub normy na razie brak. Dopiero niedawno określono dla małych silników elektrycznych takie podstawowe wymagania niezawodności, jak czas „odporności na zużycie” (trwałość) oraz prawdopodobieństwo poprawnej pracy silnika, w podanym czasie, nie mniejsze niż 0,8. Jeśli wziąć pod uwagę, że jedyny podany czas odporności na zużycie, określony na 40 godzin, dotyczy silnika do zabawek, łatwo dojść do wniosku, że tego wymagania nie można odnieść do innych maszyn.

Brak w obowiązujących normach i przepisach postanowień dotyczących niezawodności maszyn elektrycznych bardzo utrudnia lub nawet uniemożliwia, ocenianie parametrów niezawodności w procesie eksploatacji. Jest to mankament istotny, zwłaszcza dlatego, że w obowiązującym systemie normalizacyjnym (np. norma PN-86/N-04041/01) żąda się formułowania wymagań co do niezawodności na wszystkich etapach łańcucha działań, a więc nawet już na etapie konstruowania (projektowania) wszelkich obiektów technicznych, a zatem również maszyn elektrycznych.

Posługiwanie się wartościami wskaźników niezawodności, zwłaszcza formułowanymi dla etapu eksploatacji, oraz porównywanie ich z wynikami w trakcie eksploatacji ma istotne, a nawet podstawowe znaczenie przy analizowaniu i ocenianiu wpływu różnego rodzaju wymuszeń zakłócających proces użytkowania maszyn elektrycznych, zwłaszcza zmieniających funkcje i warunki pracy maszyn elektrycznych, czy w szczególnych przypadkach poszczególnych silników.

Dominujące znaczenie pojęcia „wykonywanie przez silnik czy silniki określonych funkcji w określonych warunkach” wynika przede wszystkim z braku znormalizowanych wartości trwałości (określonego przedziału czasu), którą trzeba szacować lub uzgadniać. Chcąc możliwie długo eksploatować maszynę przy najkorzystniejszych wartościach wskaźników niezawodności, trzeba systematycznie sprawdzać, czy jest ona użytkowana w określonych dla niej warunkach i czy nie są zmienione (zakłócone) wyznaczone dla niej funkcje (zadania). Eksploatujący maszynę elektryczną, a w szczególności silnik, musi być świadomy tego, że każde odstępstwo od określonych dla maszyny warunków użytkowania czy wyznaczonych dla niej funkcji wpływa znacząco na obniżenie wartości wskaźników niezawodności, a zatem również na jej trwałość.

W niektórych przypadkach eksploatacyjnych, zwłaszcza gdy zmienia się, w stosunku do znamionowych, warunki pracy maszyny lub wyznaczone jej funkcje, próbuje się nie zmniejszać wskaźników niezawodności przez tzw. rezerwowanie realizowane poprzez nadmiar parametryczny lub funkcjonalny. „Określone warunki” użytkowania, czy pracy trójfazowych silników indukcyjnych wyznaczają przede wszystkim następujące parametry (wielkości):

- znamionowe napięcie i znamionowa moc,
- znamionowa częstotliwość napięcia zasilania,
- rodzaj pracy,
- miejsce użytkowania nie wyżej niż 1000 m n.p.m.,

- maksymalna temperatura powietrza otaczającego maszynę nie wyższa niż 40°C, a minimalna nie niższa niż -15°C,
- praktycznie sinusoidalna krzywa napięcia zasilającego,
- praktycznie symetryczny układ trójfazowych napięć zasilających,
- dopuszczalny przyrost temperatury wszystkich elementów maszyny,
- dopuszczalny poziom drgań.

Dla trwałości i niezawodności całego układu elektromechanicznego, obejmującego silnik elektryczny i napędzany przez niego zespół mechanizmów (układ mechaniczny), istotne znaczenie ma szczególna właściwość trójfazowych silników elektrycznych, użytkowanych w znamionowych warunkach pracy ustalonej (przy $\omega = \text{const}$), polegająca na stałej w czasie wartości momentu elektromagnetycznego ($M_{em}(t) = \text{const}$). Tą stałą w czasie wartość momentu może wytworzyć silnik tylko wtedy, gdy:

- jest zasilany symetrycznym układem napięć trójfazowych,
- przez uzwojenia stojana i wirnika płyną prądy o sinusoidalnej zmienności w czasie tworzące symetryczny układ trój- lub wielofazowy,
- pole magnetyczne w szczelinie powietrznej ma rozkład sinusoidalny.

Niedotrzymanie któregokolwiek z podanych warunków powoduje pojawienie się w czasowym przebiegu momentu elektromagnetycznego silnika składowych tętniących o pulsacjach zależnych od rodzaju zakłócenia. Składowe tętniące momentu oddziałują bardzo niekorzystnie na trwałość silnika. Przyczyną, powodującą wystąpienie składowych tętniących momentu, a nie wynikającą bezpośrednio z tzw. „określonych warunków” użytkowania trójfazowych silników indukcyjnych, jest między innymi stan niesymetryczny występujący w obwodzie wtórnym (zwykle w wirniku). Powodem wystąpienia takiego stanu jest np. pęknięty pręt klatki w wirniku klatkowym bądź niesymetria rezystancji rozrusznika silnika pierścieniowego, w wielu przypadkach ruchowych tworzona celowo. Stan niesymetryczny w obwodzie wtórnym silnika zakłóca, w sposób bardzo wyraźny, czasowy przebieg prądów stojana. Mniej zorientowany obserwator takich zniekształconych przebiegów prądów stojana może niekiedy błędnie interpretować przyczynę tego zjawiska, tłumacząc ją zakłóceniem w napięciu zasilającym wywołanym, pracą układów przekształtnikowych.

W przypadku trójfazowych silników indukcyjnych produkowanych wielkoseryjnie i masowo dużą trudność, przede wszystkim w aspekcie niezawodności, sprawia sprawdzenie, czy silnik wykonuje bądź będzie wykonywał, określone dla niego funkcje. Trudność ta polega przede wszystkim na tym, że większość silników jest konstruowana do tzw. ogólnego przeznaczenia, a tylko pewna grupa maszyn ma z góry wyznaczone przez konstruktora zadania, np. silnik dźwignicowy, głębinowy, trakcyjny itp. W przypadku silników indukcyjnych ogólnego przeznaczenia szczególnego znaczenia nabiera m.in. ten fragment normy (PN-89/E-05012), który określa, że do napędzania urządzeń wymagających regulacji prędkości obrotowej należy stosować:

- dla silników indukcyjnych klatkowych – energoelektroniczny układ regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilania,
- dla silników pierścieniowych – energoelektroniczny układ regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę rezystancji (napięcia) w wirniku.

Zasilanie silników indukcyjnych poprzez układy przekształtnikowe wymusza pewne nowe warunki pracy, które w dotychczas wydanych normach i przepisach nie są w sposób wyczerpujący opisane i określone. Stąd wydaje się uzasadniona podana w

normie sugestia, że zastosowanie wymienionych rodzajów regulacji prędkości obrotowej powinno być poprzedzone analizą techniczno-ekonomiczną, uwzględniającą również oszczędność energii elektrycznej w czasie całego okresu eksploatacji silników. Można domniemywać, że sformułowanie „analiza techniczno-ekonomiczna” obejmuje również analizę trwałości silnika oraz innych parametrów niezawodności. Przy analizie i badaniach wpływu układów energoelektronicznych na pracę silników indukcyjnych istotne znaczenie ma uwzględnianie typu czy rodzaju półprzewodnikowego przyrządu mocy (np. tyrystory, tranzystory) oraz typu całego układu energoelektronicznego, a w szczególności wyróżnienie bezpośrednich i pośrednich przemenników częstotliwości oraz regulatorów napięcia.

Producenci maszyn elektrycznych są świadomi istotnego wpływu warunków pracy maszyn oraz spełnianych przez nie funkcji na wskaźniki niezawodności. Dlatego, zwłaszcza w normach, dość szczegółowo określono warunki, w jakich maszyny powinny pracować. Ponieważ autorzy norm i przepisów zdawali sobie sprawę, że w warunkach eksploatacyjnych wszystkich, często wyidealizowanych, parametrów nie można dotrzymać, wprowadzono dla niektórych z nich warunki umowne. Stąd pojawiły się w normie (PN-88/E-06701) takie określenia, jak „praktycznie sinusoidalna krzywa napięcia zasilającego” czy „praktycznie symetryczny układ trójfazowych napięć zasilających”. W normie podano, że napięcie przyjmuje się za praktycznie sinusoidalne, jeśli przy zasilaniu nim silnika prądu przemiennego, obciążonego znamionowo, kształt fali jest taki, że różnica między jej wartością chwilową a wartością chwilową podstawowej harmonicznej nie przekracza 5% amplitudy podstawowej harmonicznej. Równocześnie podano, że układ napięć trójfazowych uznaje się za praktycznie symetryczny, jeżeli składowa symetryczna przeciwna napięcia nie przekracza 1% składowej zgodnej w długim okresie lub 1,5% w krótszym okresie, nie przekraczającym kilku minut, i jeżeli składowa zerowa nie przekracza 1% składowej zgodnej.

W normach wprowadzono też inne uściślenia, dotyczące pewnych wybranych warunków użytkowania (pracy) poszczególnych typów maszyn. Poniżej wymieniono niektóre:

- nie zaleca się stosowania silników o przewietrzaniu własnym do głębokiej regulacji obrotów,
- uruchamiany, a także pracujący, silnik nie może wywierać ujemnego wpływu na pracę innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci,
- rodzaj i parametry energoelektronicznego układu regulacyjnego muszą być brane pod uwagę w analizie warunków pracy silnika, a także przy jego uruchamianiu,
- przyrosty temperatury lub dopuszczalne temperatury maszyn zasilanych z układów specjalnych (np. tyrystorowych) nie powinny przekraczać odpowiednich wartości podanych w normie dla maszyn o zasilaniu typowym.

O ile można uznać za oczywiste wymaganie, że „przyrosty temperatury maszyn zasilanych z układów specjalnych nie powinny przekraczać odpowiednich wartości podanych w normie dla maszyn o zasilaniu typowym” to trudno na tym tle jednoznacznie zinterpretować sformułowanie, że „temperatury powinny być mierzone przy obciążeniu znamionowym i w znamionowych warunkach pracy przy nagrzewaniu prądem przemienным o współczynniku kształtu wynikającym z warunków zasilania”. Wydaje się, że odnośny fragment trzeba interpretować następująco: „pomiar temperatury powinien zmierzać do określenia (wyznaczenia np. metodą doświadczalną) takiego obciążenia — przy współczynniku kształtu wynikającym z rodzaju zastosowanego układu energoelektronicznego — by przyrost temperatury był taki jak w przypadku zasilania typowego”.

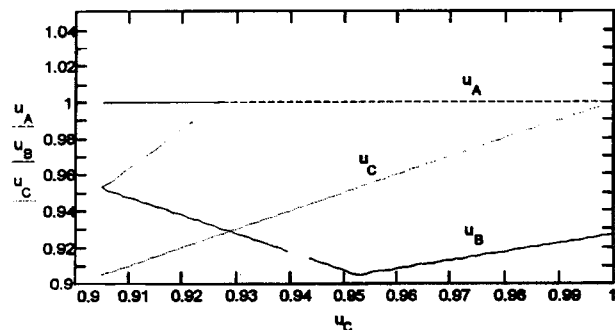
3. POWIĘKSZANIE NIEZAWODNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ TRÓJFAZOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PRZY NIESYMETRII NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

Problem ustalania dopuszczalnego obciążenia trójfazowych silników indukcyjnych podczas pracy z niesymetrią układu napięć zasilających nie został rozstrzygnięty w obowiązujących w kraju przepisach. W Polskiej Normie (PN-88/E-06701) przyjęto, że trójfazowe maszyny indukcyjne są użytkowane w warunkach praktycznie symetrycznego układu napięć zasilających (tzn. składowa symetryczna przeciwna napięcia nie przekracza 1% składowej zgodnej w długim okresie lub 1,5% w krótszym okresie, nie przekraczającym kilku minut; składowa zerowa nie przekracza 1% składowej zgodnej). Powyższy warunek korzystny jest dla konstruktorów i wytwórców silników, natomiast niedogodny dla użytkowników, większość bowiem eksploatowanych silników użytkowana jest w warunkach różniących się od znamionowych; bardzo często w sieci elektroenergetycznej układ napięć różni się znacznie od układu praktycznie symetrycznego.

Bardziej realne są ustalenia Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC Report 892/1987) wyznaczające ograniczenie mocy obciążenia silnika w zależności od procentowej niesymetrii napięciowej. W raporcie tym określono względną niesymetrię napięciową w_n jako stosunek największej odchyłki napięcia od wartości średniej do średniej wartości napięcia. Równocześnie podano, że jeśli względna niesymetria napięciowa jest większa od 5%, należy przeanalizować pracę silnika z uwzględnieniem składowej symetrycznej napięcia kolejności przeciwniej. Jeśli względna niesymetria napięciowa nie przekracza 5%, nie wymaga się szczegółowej analizy warunków pracy silnika, należy jednak ograniczyć jego obciążenie w stopniu zależnym od względnej niesymetrii napięciowej (np. do wartości 0,9 mocy znamionowej przy 3% niesymetrii napięcia i aż do 0,75 mocy znamionowej przy 5% niesymetrii napięcia).

Można wyróżnić co najmniej dwa rodzaje działań mających na celu zwiększenie niezawodności eksploatacyjnej silników użytkowanych w stanach niesymetrycznych. Jeden ze sposobów, który można nazwać nadmiarem parametrycznym, polega na zwiększeniu mocy znamionowej silnika w stosunku do mocy zapotrzebowanej lub powiększenie klasy układu izolacyjnego uzwojeń tak, by można było zwiększyć przyrost temperatury uzwojeń w stosunku do przyrostu temperatury silnika użytkowanego w stanie symetrycznym. Inny sposób, nazywany niedomiarem parametrycznym, polega na ograniczeniu dopuszczalnego obciążenia silnika w stosunku do obciążenia znamionowego, tak by nie został przekroczony dopuszczalny dla danej klasy izolacji przyrost temperatury poszczególnych elementów silnika.

Zespół Eksploatacji Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej zajmuje się różnorodnymi zagadnieniami dotyczącymi



Rys. 1. Względne wartości napięć zasilających przy niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC

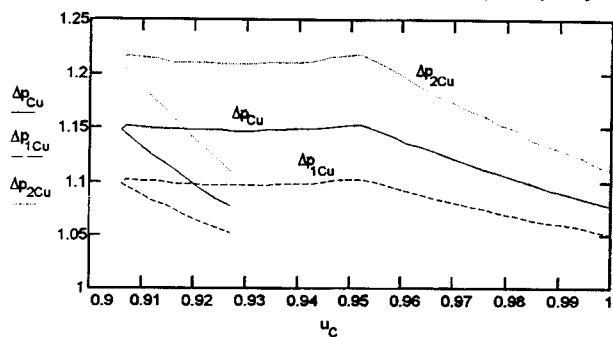
stanów niesymetrycznych w trójfazowych silnikach indukcyjnych, np. nagrzewaniem się maszyny, drganiem i hałasem, diagnostyką. W niniejszym rozdziale omówiono niektóre zagadnienia, związane z ustalaniem dopuszczalnego obciążenia trójfazowych silników indukcyjnych podczas pracy z niesymetrią napięć zasilających.

Dla istotnej, granicznej, względnej niesymetrii napięciowej (wg IEC) równej 5% wyznaczono (rys. 1), przy jakich wartościach napięć zasilających otrzymuje się taki stopień niesymetrii, przy czym założono, że napięcie fazy A (U_A) ma wartość znamionową U_n , a napięcia faz B i C zmieniają się w przedziale (U_{min}, U_n).

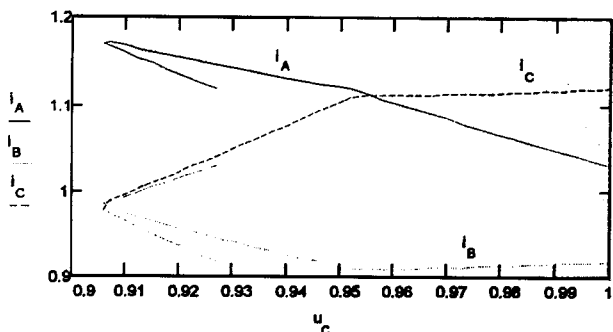
Dla stałej względnej niesymetrii napięć zasilających $w_n=5\%$ wykonano obliczenia dla następujących przypadków pracy silnika indukcyjnego:

- przy znamionowej mocy obciążenia,
- przy znamionowym momencie obciążenia,
- przy założeniu, że suma strat mocy w uzwojeniach jest taka sama jak przy obciążeniu znamionowym dla symetrii zasilania,
- przy kryterium nieprzekraczania przez żaden z prądów fazowych stojana wartości znamionowej.

Obliczenia przeprowadzono za pomocą metody składowych symetrycznych na przykładzie silnika o następujących danych znamionowych: moc $P_n = 3,3$ kW, napięcie $U_n = 380$ V (połączenie uzwojenia stojana w trójkąt), prąd $I_n = 9,5$ A, prędkość $n_n = 940$ obr/min. Dla przyjętego kryterium znamionowej mocy obciążenia, na rysunku 2a przedstawiono wyniki obliczeń względnych wartości strat mocy Δp_{1Cu} w uzwojeniu stojana, strat mocy Δp_{2Cu} w uzwojeniu wirnika oraz łącznych strat mocy Δp_{Cu} w uzwojeniach silnika indukcyjnego, a na rysunku 2b wykresy względnych wartości prądów fazowych stojana i_A, i_B, i_C . Wyniki obliczeń są odniesione do odpowiednich wielkości przy obciążeniu znamionowym i zasilaniu napięciem symetrycznym.



Rys. 2a. Zależność względnych wartości strat mocy w uzwojeniach stojana, strat mocy w uzwojeniach wirnika oraz łącznych strat mocy w uzwojeniach przy znamionowej mocy obciążenia od względnej wartości napięcia zasilającego u_c dla niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC



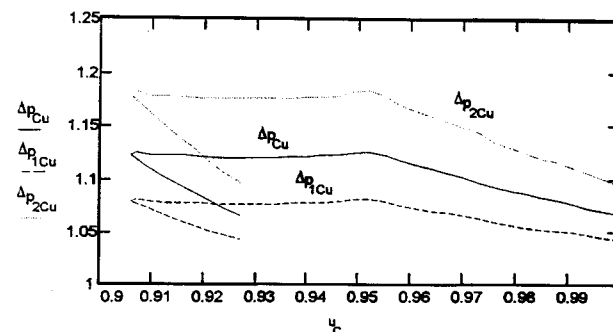
Rys. 2b. Zależność względnych wartości prądów fazowych przy znamionowej mocy obciążenia, od względnej wartości napięcia zasilającego u_c dla niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC

Jak wynika z rysunku 2a, straty mocy w uzwojeniu wirnika wzrosły w stanie niesymetrycznym w granicach od 12% do 22%, a w uzwojeniach stojana powiększyły się o 5% do 11%. Przyrost łącznych strat mocy w uzwojeniach wynosi od 8% do 15%. Należy brać pod uwagę również to, że przy niesymetrii tylko w obwodzie stojana prądy wirnika mają jednakowe wartości skuteczne dla wszystkich faz, natomiast w stojanie występuje niesymetria prądów fazowych (największy wzrost wartości natężenia prądu fazowego na rysunku 2b wynosi 17,5% w stosunku do prądu znamionowego). Zamieszczone wyniki obliczeń strat mocy stanowią punkt wyjścia do obliczeń nagrzewania się uzwojeń, przyrostu temperatury uzwojeń, dopuszczalnego, skróconego czasu pracy silnika indukcyjnego przy zasilaniu napięciem niesymetrycznym. Należy tutaj zwrócić uwagę na to, że przy niesymetrii prądów fazowych stojana następuje tylko częściowe wyrównywanie się potencjałów cieplnych drogą przepływu ciepła z miejsc bardziej nagrzanych do miejsc mniej nagrzanych.

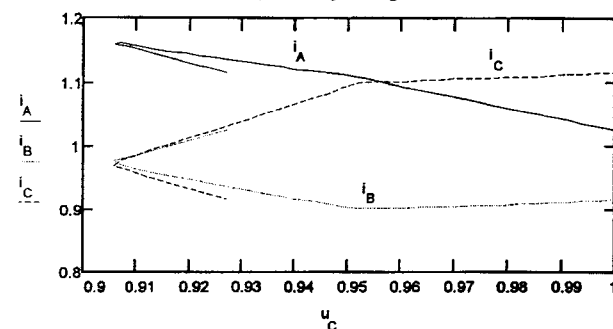
Dla założonego warunku znamionowego momentu obciążenia, na rysunku 3a zamieszczono wyniki obliczeń względnych strat mocy w uzwojeniach stojana (wzrost w granicach od 4% do 8%), strat mocy w uzwojeniach wirnika (wzrost od 9% do 18%) i łącznych strat mocy w uzwojeniach silnika indukcyjnego (przyrost od 7% do 13%). Przyrosty strat mocy są tutaj mniejsze niż przy kryterium znamionowej mocy obciążenia. Stopień niesymetrii prądów fazowych stojana na rysunku 3b jest jednak prawie taki sam jak dla wariantu pracy przy znamionowej mocy obciążenia.

Rysunki 4a i 4b przedstawiają wyniki obliczeń przy założeniu, że suma strat mocy w uzwojeniach jest taka sama jak przy obciążeniu znamionowym dla symetrii zasilania. W tym przypadku moc obciążenia należy obniżyć o 3,5% do 6%, moment obciążenia zmniejszyć o 3,5% do 5,5%, największy wzrost natężenia prądu fazowego wynosi 11,5%.

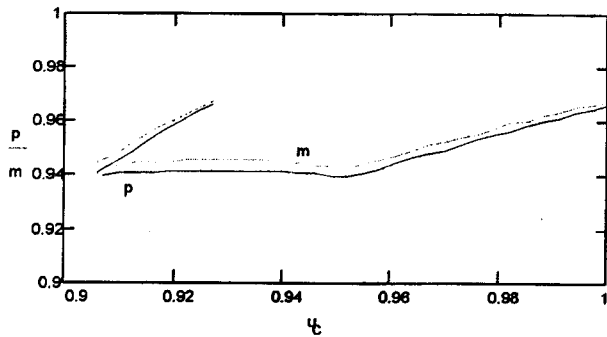
Wydaje się, że najłatwiejszym do oceny i weryfikacji doświadczalnej jest kryterium nieprzekraczania w żadnym z uzwo-



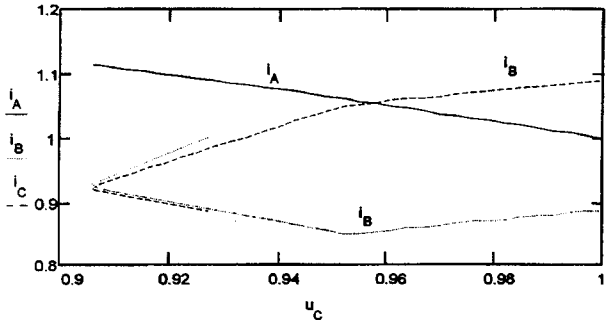
Rys. 3a. Zależność względnych wartości strat mocy w uzwojeniach stojana, strat mocy w uzwojeniach wirnika oraz łącznych strat mocy w uzwojeniach przy znamionowym momencie obciążenia od względnej wartości napięcia zasilającego u_c dla niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC



Rys. 3b. Zależność względnych wartości prądów fazowych przy znamionowym momencie obciążenia od względnej wartości napięcia zasilającego u_c dla niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC



Rys. 4a. Zależność względnej wartości mocy i momentu obciążenia — przy założeniu, że suma strat mocy w uzwojeniach, przy niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC, jest taka sama jak przy obciążeniu znamionowym dla symetrycznego zasilania — od względnej wartości napięcia fazy u_c



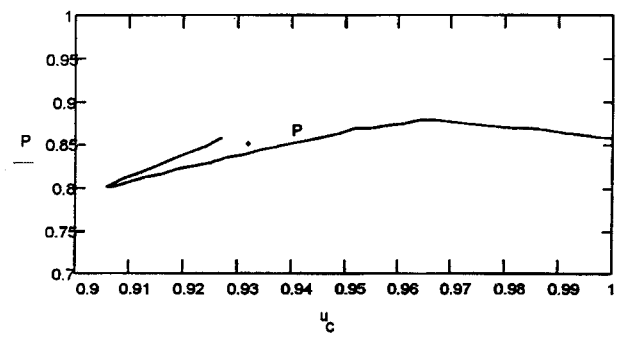
Rys. 4b. Zależność względnych wartości prądów fazowych — przy założeniu, że przy niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC i obciążeniu silnika takim, że suma strat mocy w uzwojeniach jest taka sama jak przy obciążeniu znamionowym dla symetrycznego zasilania — od względnej wartości napięcia fazy u_c

jeń fazowych silnika znamionowej wartości prądu (rys. 5a i 5b). Celem analiz jest poszukiwanie takiej wartości mocy obciążenia — mniejszej od znamionowej — przy której, dla konkretnej wartości współczynnika niesymetrii, natężenie prądu w najbardziej obciążonej fazie, lub najbardziej obciążonych fazach, osiągnie wartość znamionową. Z rysunku 5a wynika, że przy stałej względnej niesymetrii napięcia równej 5% obciążenie graniczne przy zastosowanym kryterium może się zmieniać od 80% do 88% obciążenia znamionowego (niedomiar parametryczny). Przez dokonanie interpretacji wyników w odwrotnym kierunku można również obliczyć, że jeżeli przewiduje się pracę silnika indukcyjnego przy względnej niesymetrii napięcia zasilającego równej 5%, znamionowa moc silnika powinna być większa o 14% do 25% (nadmiar parametryczny) w stosunku do mocy zapotrzebowanej.

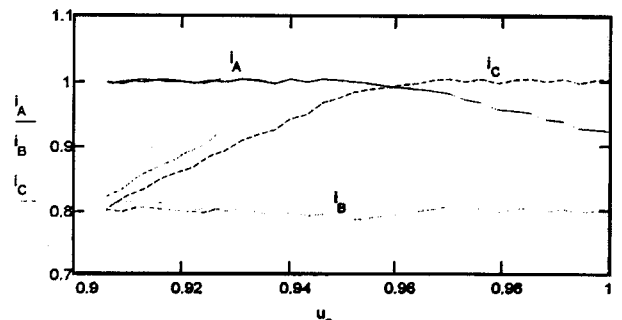
4. ANALIZA SPEKTRUM NAPIĘĆ I PRĄDÓW TRÓJFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO Z FAŁOWNIKA NAPIĘCIA

Badania przeprowadzono na przykładzie trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego o następujących danych znamionowych: moc 4 kW, napięcie 380 V (połączenie uzwojeń stojana w trójkąt), prąd 8,5 A, częstotliwość 50 Hz, prędkość obrotowa 1435 obr/min. Fałownik napięcia, z którego zasilano trójfazowy silnik indukcyjny, miał regularną modulację jednobiegunową.

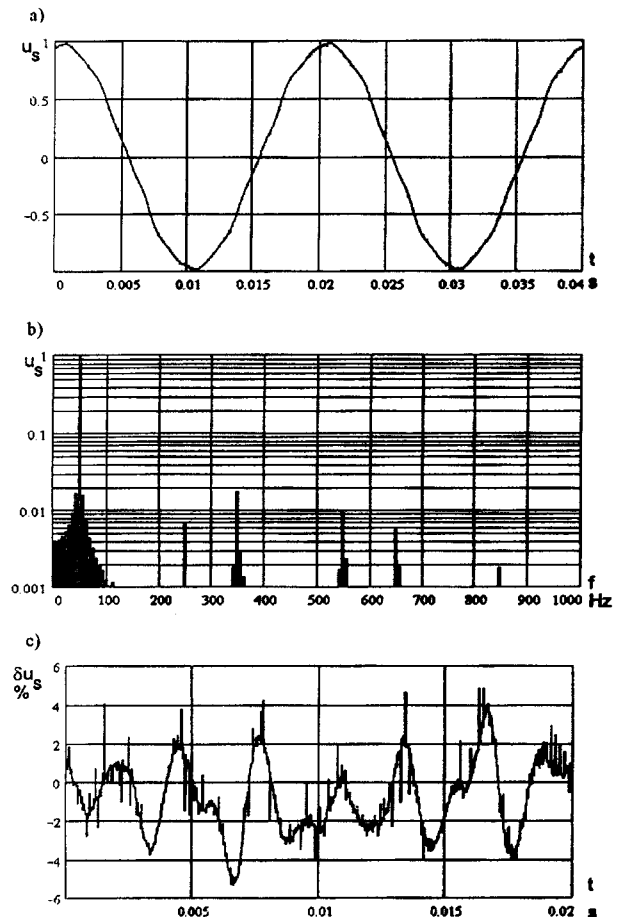
Dla zasilającego napięcia przewodowego sieci u_s , przedstawiono jego przebieg czasowy (rys. 6a), wyniki obliczeń analizy częstotliwościowej (rys. 6b) oraz przebieg czasowy względnych (procentowych) odchyłek δu_s wartości chwilowych od wartości pierwszej harmonicznej (rys. 6c). Należy stwierdzić interesujący fakt, że w czasie pomiarów obserwowano częste zmiany spektrum napięcia zasilającego u_s . Krzywą badanego przemiennego



Rys. 5a. Zależność względnej wartości dopuszczalnej mocy obciążenia — przy założeniu, że przy niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC żaden z prądów fazowych nie przekracza wartości znamionowej — od względnej wartości napięcia fazy u_c

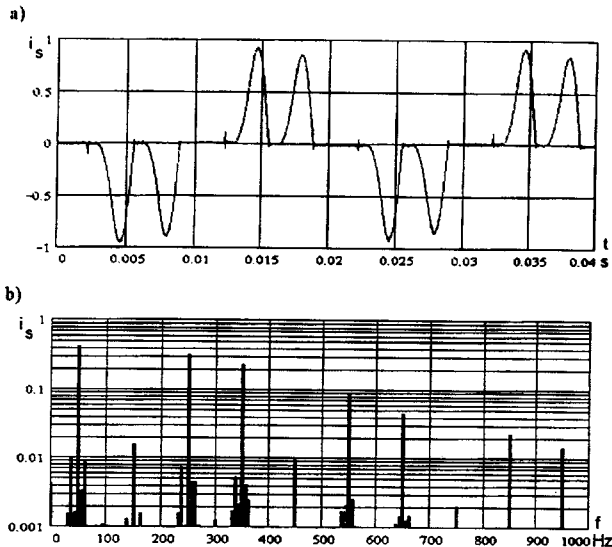


Rys. 5b. Zależność względnych wartości prądów fazowych — przy założeniu, że przy niesymetrii wynoszącej 5% wg ustaleń IEC i obciążeniu silnika takim, że żaden z nich nie przekracza wartości znamionowej — od względnej wartości napięcia zasilającego u_c



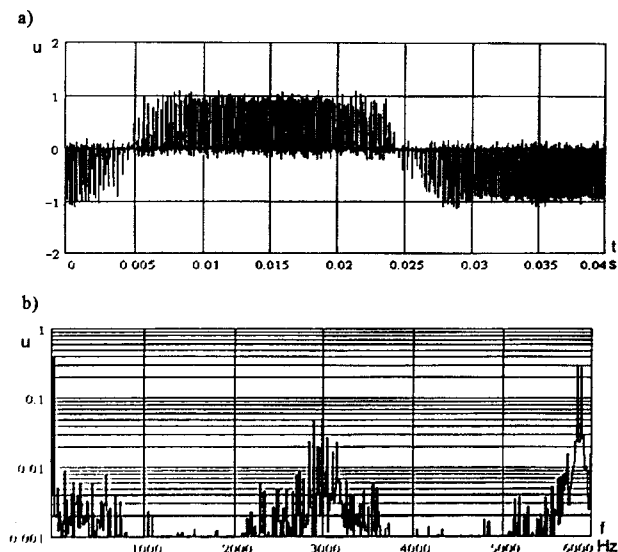
Rys. 6. Przewodowe napięcie sieci: a — przebieg czasowy, b — analiza częstotliwościowa, c — przebieg czasowy względnych odchyłek wartości chwilowych od wartości pierwszej harmonicznej

napięcia zasilającego sieci można określić jako praktycznie sinusoidalną, gdyż wartość chwilowa tego napięcia nie różni się od odpowiedniej wartości pierwszej harmonicznej więcej niż o 5% amplitudy pierwszej harmonicznej (rys. 6c). W badaniach zilustrowanych na rys. 6, przy jednoczesnym pomiarze wartości średniej i skutecznej, współczynnik kształtu wynosił 1,1136, a więc różnił się tylko o 0,32% od wartości 1,11 związanej z idealną sinusoidą.

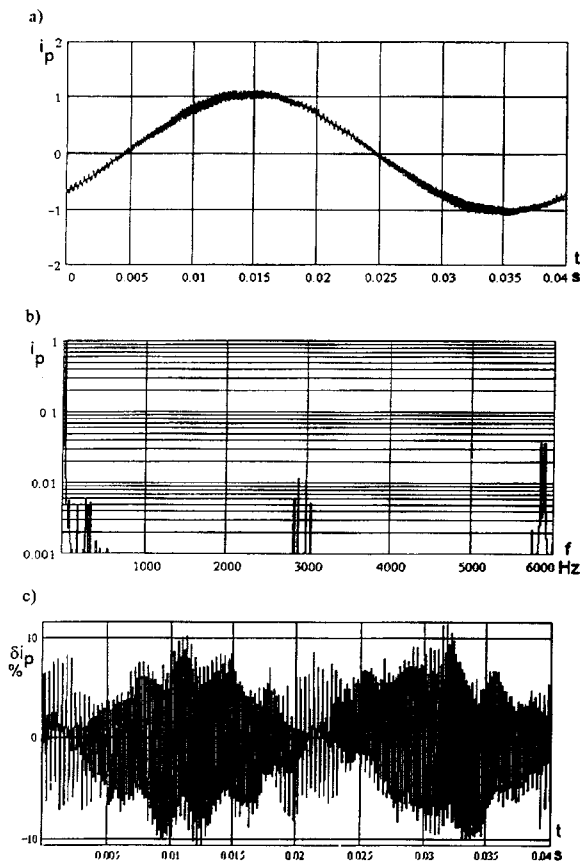


Rys. 7. Prąd przewodowy sieci zasilającej: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa

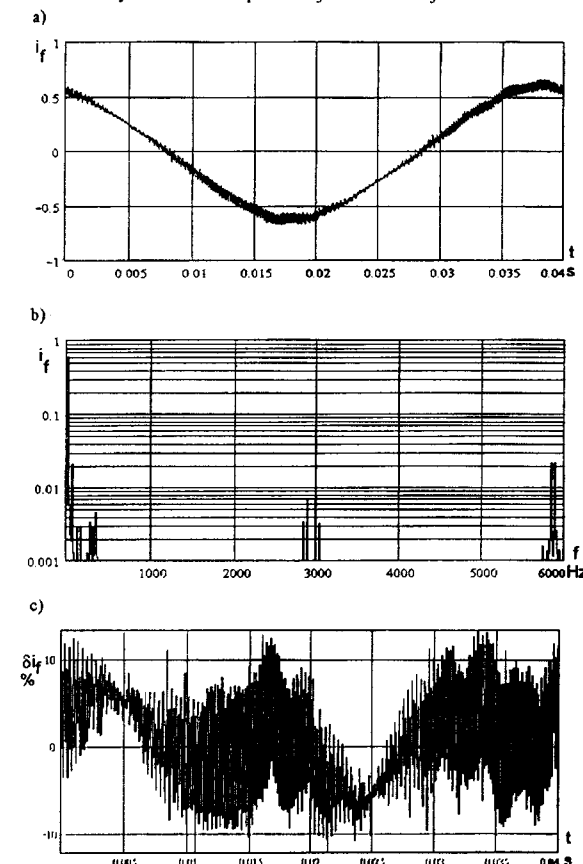
Przykładowy prąd przewodowy i_s , dopływający z sieci zasilającej jest silnie odkształcony (rys. 7); współczynnik kształtu wynosi tutaj 1,6549 i różni się aż o 49,1% od wartości 1,11. Przewodowe napięcie wyjściowe u falownika (rys. 8) charakteryzuje się współczynnikiem kształtu równym 1,6179 (różnica 45,8% w stosunku do wzorcowej wartości 1,11). Dla przykładowego prądu przewodowego i_p (rys. 9) badanego silnika indukcyjnego zasilanego z falownika napięcia, obliczony współczynnik kształtu wynosi 1,1114, czyli różni się zaledwie o 0,13% od wartości 1,11. O 1,19% różni się od bazowej wartości 1,11 prąd fazowy i_f



Rys. 8. Przewodowe napięcie wyjściowe falownika: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa



Rys. 9. Prąd przewodowy silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa, c – przebieg czasowy względnych odchyłek wartości chwilowych od wartości pierwszej harmonicznej



Rys. 10. Prąd fazowy silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa, c – przebieg czasowy względnych odchyłek wartości chwilowych od wartości pierwszej harmonicznej

(rys. 10) analizowanego silnika indukcyjnego. Należy zaznaczyć, że na rysunkach 6–10 podano wartości napięć i prądów w jednostkach względnych, przy czym napięcia odniesiono do amplitudy pierwszej harmonicznej przewodowego napięcia sieci zasilającej, natomiast prądy obliczono w odniesieniu do amplitudy pierwszej harmonicznej prądu przewodowego silnika indukcyjnego. Na rysunkach 8–10 częstotliwość harmonicznej podstawowej wynosiła 25 Hz.

Przy modulacji regularnej jednobiegunowej wyższe harmoniczne napięcia i prądu mają wysokie częstotliwości, pulsacje momentu elektromagnetycznego — również, dzięki czemu momenty tętniące mogą być skuteczniej tłumione przez bezwładność wirnika, nie powodując tym samym znaczących wahań jego prędkości kątowej.

5. SPEKTRUM PRĄDU STOJANA PRZY USZKODZENIACH UZWOJENIA KLATKOWEGO

Analiza częstotliwościowa prądu stojana może stanowić skuteczne narzędzie do diagnozowania stanu uzwojeń klatkowych trójfazowych silników indukcyjnych. Mamy tutaj do czynienia z czułą, a jednocześnie subtelną metodą pomiarową, która z dużym prawdopodobieństwem pozwala stwierdzić istnienie uszkodzenia także wtedy, gdy słabe są zewnętrzne oznaki niesprawności (zwłaszcza w początkowym stadium rozwoju uszkodzenia). Występowanie wielu harmonicznych w funkcji czasowej prądu stojana jest wynikiem generowania tych składowych przez silnik indukcyjny, przy czym źródłem tego procesu jest niesymetria w obwodzie wirnika.

Uszkodzone uzwojenie klatkowe wirnika trójfazowego silnika indukcyjnego wytwarza pole magnetyczne różniące się od pola magnetycznego maszyny zdanej. Wynikiem deformacji pola magnetycznego są różne efekty dodatkowe, m. in. zmiana spektrum prądu stojana, występowanie dodatkowych sił wewnętrznych zmiennych w czasie i drgań mechanicznych. Komplikuje się również przebieg zjawiska interakcji wyższych harmonicznych rozkładu przestrzennego pola magnetycznego.

Przykładowo opisane zostanie zjawisko generowania składowych prądu stojana o różnych częstotliwościach przy uszkodzeniu uzwojenia wirnika klatkowego. Skrótno będą przedstawione interakcje pierwszej (podstawowej, związanej z jedną parą biegunów głównych) oraz piątej harmonicznej przestrzennej pola magnetycznego. Wieloharmoniczną maszynę indukcyjną traktuje się jako składającą się z szeregu odpowiednio połączonych maszyn jednoharmonicznych.

W układzie pierwszej harmonicznej płyną w wirniku prądy o pulsacji $\omega_1 - \omega$, gdzie ω_1 oznacza pulsację napięcia zasilającego, ω — elektryczną prędkość wirnika. Powstająca wskutek niesymetrii składowa symetryczna przeciwna pola wirnika, wirująca względem wirnika z prędkością $\omega_1 - \omega$ w kierunku ujemnym, generuje w stojanie nową składową prądu o pulsacji:

$$\omega_1 - \omega - \omega = \omega_1 - 2\omega,$$

której odpowiada częstotliwość $(1-2s)f_1$, gdzie s — poślizg, f_1 — częstotliwość napięcia zasilającego. Dla piątej harmonicznej przestrzennej płyną w wirniku prądy o pulsacji $\omega_1 + 5\omega$ (pole stojana wiruje dla tej harmonicznej w kierunku ujemnym). Składowa przeciwna wirnika o pulsacji $\omega_1 + 5\omega$ indukuje w stojanie prąd o pulsacji:

$$\omega_1 + 5\omega + 5\omega = \omega_1 + 10\omega$$

W wyniku sprzężenia pierwszej i piątej harmonicznej pola prąd wirnika o pulsacji $\omega_1 - \omega$ generuje w stojanie prądy o następujących pulsacjach:

$$\omega_1 - \omega + 5\omega = \omega_1 + 4\omega$$

$$\omega_1 - \omega - 5\omega = \omega_1 - 6\omega$$

Ponadto prąd wirnika o pulsacji $\omega_1 + 5\omega$ wywołuje w stojanie prądy o pulsacjach:

$$\omega_1 + 5\omega + \omega = \omega_1 + 6\omega$$

$$\omega_1 + 5\omega - \omega = \omega_1 + 4\omega$$

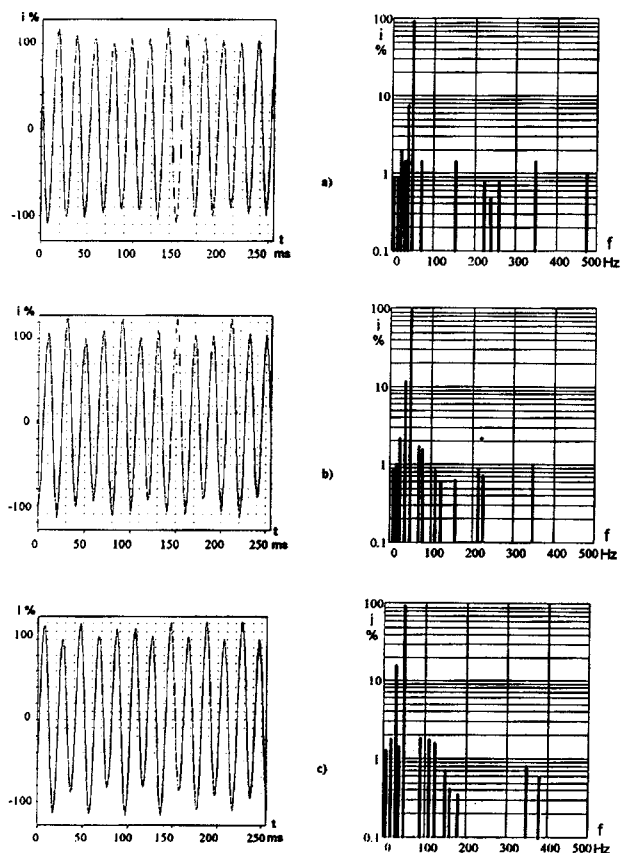
Pokazano wyżej, w jaki sposób przy uszkodzeniu uzwojenia wirnika powstają w stojanie składowe prądu o pulsacjach: $\omega_1 - 2\omega$, $\omega_1 + 4\omega$, $\omega_1 + 6\omega$, $\omega_1 - 6\omega$, $\omega_1 + 10\omega$.

Dla trzech różnych prędkości wirnika przedstawiono (rys. 11) wyznaczone doświadczalnie przebiegi funkcji czasowych oraz spektrum prądu stojana trójfazowego silnika indukcyjnego z pękniętym jednym prętem wirnika klatkowego. Pomiary wykonano dla 4-biegunowego silnika o mocy 0,8 kW i napięciu 380 V.

Widmo prądu stojana zależy od prędkości silnika. Widoczny jest znaczny udział składowej prądu stojana o częstotliwości $(1-2s)f_1$, która nie występuje przy zdatnym silniku. Na rysunku 11 prądy podano jako procentowe wartości względne odniesione do głównej składowej prądu stojana o częstotliwości 50 Hz.

6. BADANIE TRAKCYJNEGO, TRÓJFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO

Nowoczesne pojazdy trakcyjne budowane przez czołowe firmy europejskie są wyposażone w układy napędowe z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falowników. W Polsce prowadzi się obecnie prace mające na celu zastosowanie trójfazowych silników indukcyjnych do napędu tramwaju. Na Polite-



Rys. 11. Funkcje czasowe i spektrum prądu stojana silnika indukcyjnego z pękniętym jednym prętem wirnika: a — prędkość znamionowa (poślizg $s=0,08$), b — poślizg $s=0,16$, c — poślizg $s=0,79$

chnice Śląskiej [1, 6] zaprojektowano modelowy układ napędowy składający się z 2 falowników napięcia i 4 silników indukcyjnych klatkowych na bazie tramwaju 105N, przy czym silnik indukcyjny ma parametry i charakterystyki elektromechaniczne takie, jak stosowany obecnie silnik prądu stałego LT-200. Dla prototypu polskiego tramwaju napędzanego trójfazowymi silnikami indukcyjnymi przeprowadzono na Politechnice Poznańskiej [3-5] badania dotyczące energooszczędnego sterowania.

Kompletne parametry trakcyjne trójfazowego silnika indukcyjnego o mocy 40 kW, napięciu 380 V, liczbie par biegunów $p=2$ oraz częstotliwości znamionowej 60 Hz podaje Glinka i Kochanowski [6]. Parametry schematu zastępczego silnika indukcyjnego są następujące: rezystancja uzwojenia fazowego stojana $R_1 = 0,07714 \Omega$, rezystancja wirnika sprowadzona do obwodu stojana $R_2 = 0,129 \Omega$, reaktancja rozproszenia stojana $X_{1r} = 0,244 \Omega$, reaktancja rozproszenia wirnika sprowadzona do obwodu stojana $X_{2r} = 0,276 \Omega$, reaktancja główna $X_\mu = 13,11 \Omega$.

Do opisu zjawisk zachodzących w trójfazowej maszynie indukcyjnej przyjęto następujące założenia:

- maszyna jest symetryczna magnetycznie,
- pomija się wpływ żłobków,
- nie uwzględnia się nasycenia magnetycznego,
- pomija się straty mocy w rdzeniu magnetycznym oraz wyższe harmoniczne rozkładu przestrzennego pola magnetycznego,
- uzwojenia stojana i wirnika zastępuje się uzwojeniami skupionymi,
- rezystancje i reaktancje uzwojeń uważa się za stałe.

Równania modelu matematycznego silnika indukcyjnego zapisano w układzie współrzędnych $\alpha\beta$, nieruchomym względem stojana.

Zakłada się, że połączenia pomiędzy wałami silników a osiami napędowymi pojazdu trakcyjnego są sztywne oraz przyjmuje się, że pojazd jest bryłą sztywną. Model matematyczny pojazdu trakcyjnego napędzanego przez trójfazowe silniki indukcyjne stanowi następujący układ równań:

$$\frac{d\Psi_{\alpha 1}}{dt} = u_\alpha - \omega_1 \alpha'_s \Psi_{\alpha 1} + \omega_1 \alpha'_r k_r \Psi_{\alpha 2}$$

$$\frac{d\Psi_{\beta 1}}{dt} = u_\beta - \omega_1 \alpha'_s \Psi_{\beta 1} + \omega_1 \alpha'_r k_r \Psi_{\beta 2}$$

$$\frac{d\Psi_{\alpha 2}}{dt} = -\omega_1 \alpha'_r \Psi_{\alpha 2} + \omega_1 \alpha'_s k_s \Psi_{\alpha 2} - \omega \Psi_{\beta 2}$$

$$\frac{d\Psi_{\beta 2}}{dt} = -\omega_1 \alpha'_r \Psi_{\beta 2} + \omega_1 \alpha'_s k_s \Psi_{\beta 2} + \omega \Psi_{\alpha 2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{pz^2\eta}{k_w m r^2} \left[n_s M_{em} - \frac{r}{z\eta} W(v) \right]$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} p \omega_1 \frac{k_r}{X_{1s}\sigma} (\Psi_{\alpha 2} \Psi_{\beta 1} - \Psi_{\alpha 1} \Psi_{\beta 2})$$

$$\alpha'_s = \frac{\alpha_s}{\sigma} \quad \alpha'_r = \frac{\alpha_r}{\sigma}$$

$$\alpha'_s = \frac{R_1}{X_{1s}} \quad \alpha'_r = \frac{R_2}{X_{2s}}$$

$$X_{1s} = \omega_1 (L_1 - M_1) \quad X_{2s} = \omega_1 (L_2 - M_2) \quad X_\mu = \frac{3}{2} \omega_1 M_{12}$$

$$X_{1s} = X_\mu + X_{1r} \quad X_{2s} = X_\mu + X_{2r}$$

$$k_s = \frac{X_\mu}{x_{1s}} \quad k_r = \frac{X_\mu}{x_{2s}}$$

$$\sigma = 1 - k_r k_s$$

gdzie występują nowe oznaczenia:

- 1, 2 – indeksy dotyczące odpowiednio stojana i wirnika,
- Ψ – strumień skojarzony,
- L_1, L_2 – indukcyjność fazy stojana i wirnika,
- M_1, M_2 – indukcyjność wzajemna dwóch dowolnych uzwojeń fazowych stojana i wirnika,
- M_{12} – wartość maksymalna indukcyjności wzajemnej między dowolnymi uzwojeniami stojana a dowolnymi uzwojeniami wirnika,
- r – promień koła napędowego,
- z – przełożenie przekładni mechanicznej,
- n_s – liczba silników napędowych,
- m – masa pojazdu trakcyjnego,
- k_w – współczynnik mas wirujących,
- η – sprawność przekładni mechanicznej,
- $W(v)$ – opory ruchu pojazdu trakcyjnego.

Droge s przebytą przez pojazd trakcyjny oblicza się przez całkowanie prędkości v względem czasu. Zależności pomiędzy wielkościami reprezentującymi silnik — prędkością kątową ω , przyspieszeniem kątowym ϵ , momentem elektromagnetycznym M_{em} a wielkościami charakterystycznymi dla pojazdu trakcyjnego — prędkością pojazdu v , przyspieszeniem a , siłą pociągową mierzoną na kołach napędnych F_p przedstawiają poniższe wzory:

$$v = \frac{\omega \cdot r}{p \cdot z} \quad a = \frac{\epsilon \cdot r}{p \cdot z}$$

$$F_p = \frac{n_s \cdot M_{em} \cdot z \cdot \eta}{r}$$

Istnieje cały szereg metod uzyskiwania zmodulowanego przebiegu napięcia falownika trójfazowego. Ostatnio, w związku z rozwojem technik mikrokomputerowych, rozpowszechniła się regularna modulacja jednobiegunowa [12]. Ten rodzaj modulacji szerokości impulsów, przy dużej częstotliwości łączeń (dla tranzystorów IGBT: 1–20 kHz), powoduje, że przebiegi czasowe prądów oraz strumienia magnetycznego w rdzeniu silnika są tylko nieznacznie odkształcone w stosunku do przebiegu sinusoidalnego. Ma to duże znaczenie, jeśli chodzi o tzw. straty dodatkowe silnika. Dla stosunkowo małych mocy silników pojazdów tramwajowych falowniki napięcia zbudowane są z tranzystorów, głównie typu IGBT, a stosowany zakres częstotliwości pracy to od jednego do kilkunastu kHz. Symulację cyfrową generatora napięcia modelującego falownik z regularną modulacją jednobiegunową opisał szczegółowo H. Nowacki [12]. Generator cyfrowy wytwarza funkcje czasowe napięć fazowych falownika u_{Af} , u_{Bf} , u_{Cf} . Na ich podstawie oblicza się napięcia przewodowe u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , zasilające silnik indukcyjny:

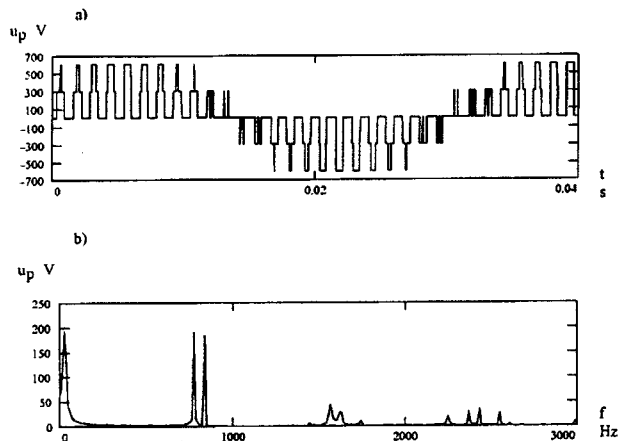
$$u_{AB} = u_{Af} - u_{Bf} \quad u_{BC} = u_{Bf} - u_{Cf} \quad u_{CA} = u_{Cf} - u_{Af}$$

Napięcia zasilające u_α , u_β w zastępczym układzie dwufazowym matematycznego modelu silnika indukcyjnego z trójfazowym uzwojeniem stojana połączonym w gwiazdę są równe:

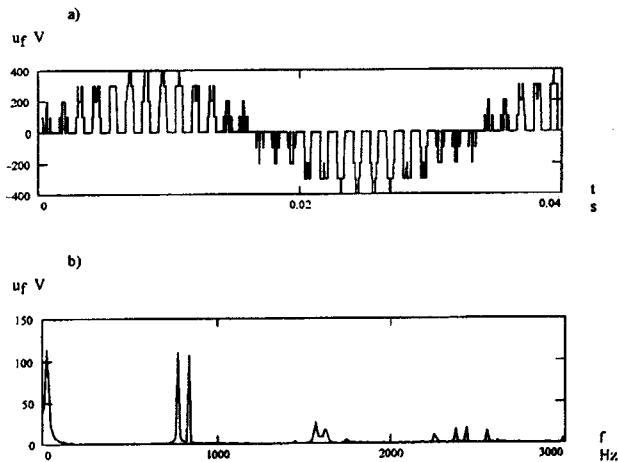
$$u_\alpha = \frac{1}{3} (u_{AB} - u_{CA}) \quad u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} u_{BC}$$

Na rysunkach 12–16 przedstawiono przebiegi czasowe napięcia przewodowego, napięcia zasilającego w zastępczym układzie dwufazowym, prądu, momentu elektromagnetycznego i strumienia magnetycznego skojarzonego. Na rysunku 15 moment obciążenia ma wartość znamionową, częstotliwość modulująca wynosi $f_m=30$ Hz, natomiast częstotliwość nośna f_n jest równa 800 Hz; dla każdego przebiegu czasowego dołączono wyniki obliczeń analizy częstotliwościowej. W celu umożliwienia analizy porównawczej, dla takiej samej częstotliwości modulującej ($f_m=30$ Hz), ale innej częstotliwości nośnej ($f_n=2500$ Hz) zamieszczono na rysunkach 17–19 obliczone przebiegi czasowe prądu, momentu elektromagnetycznego i strumienia magnetycznego skojarzonego. Zwiększenie częstotliwości nośnej umożliwia zmniejszenie amplitudy dodatkowej składowej tętniącej prądu i momentu, co umożliwia zmniejszenie drgań układu napędowego. Szczegółowe badania doświadczalne [6] pokazują jednak, że zagadnienie doboru najdogodniejszej wartości częstotliwości nośnej falownika napięcia wymaga jeszcze dodatkowych prac badawczych, związanych z optymalizowaniem zarówno falownika, jak i układu napędowego.

Dla obliczonych funkcji czasowych różnych wielkości silnika indukcyjnego istotne jest to, że największa amplituda pulsacji występuje dla przebiegu czasowego momentu elektromagnetycznego, mniejsze są tętnienia dla przebiegu prądu fazowego

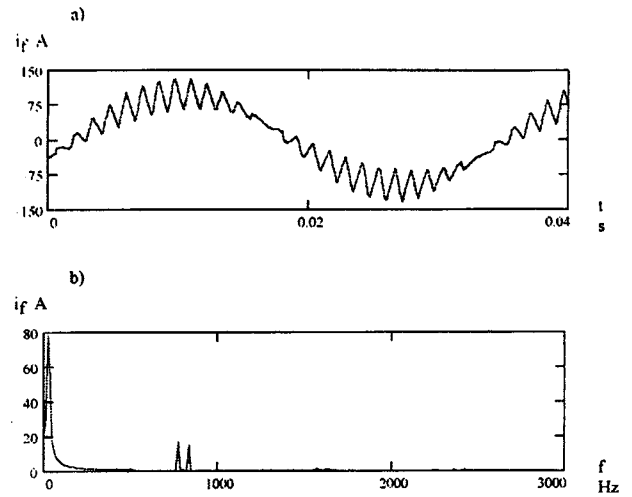


Rys. 12. Napięcie przewodowe silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=800$ Hz

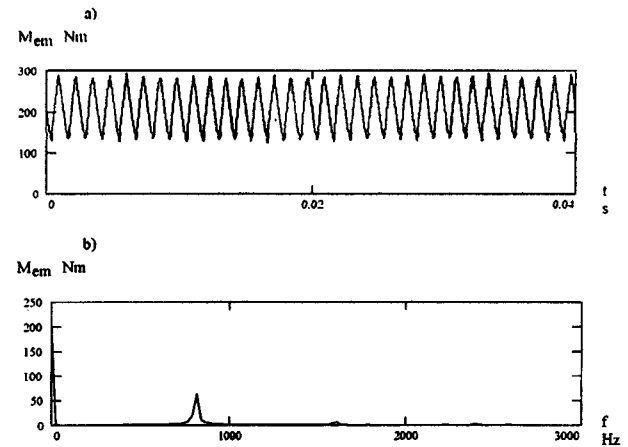


Rys. 13. Napięcie fazowe silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=800$ Hz

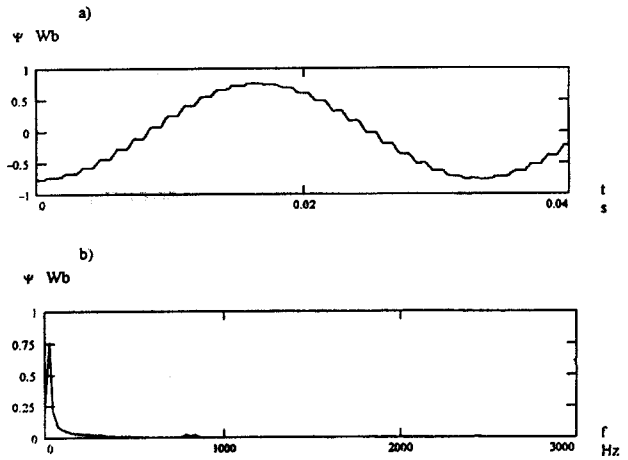
silnika, natomiast najmniejsze są pulsacje strumienia skojarzonego.



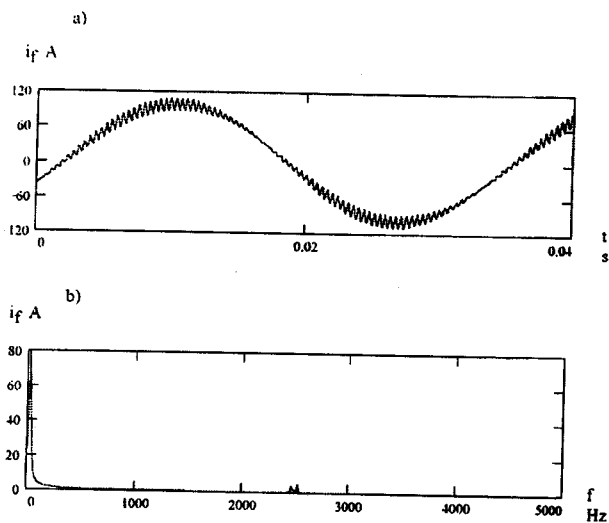
Rys. 14. Prąd fazowy silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=800$ Hz



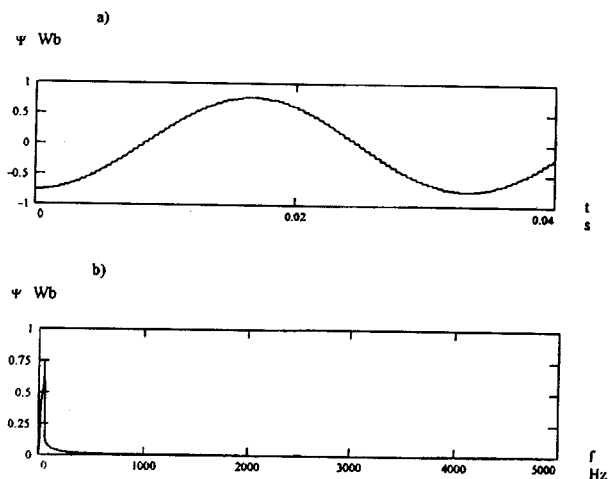
Rys. 15. Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=800$ Hz



Rys. 16. Strumień skojarzony stojana silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=800$ Hz



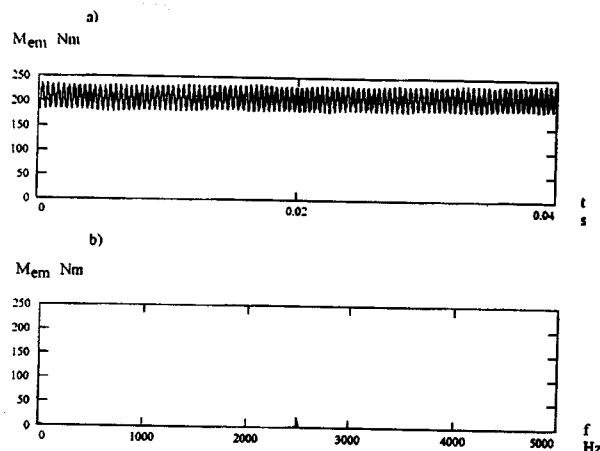
Rys. 17. Prąd fazowy silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=2500$ Hz



Rys. 19. Strumień skojarzony stojana silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=2500$ Hz

LITERATURA

1. Czakański M.: *Układ sterowania napędem głównym tramwaju z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Badania modelowe i symulacyjne w trakcji elektrycznej, Warszawa 1993.
2. Filippetti F., Franceschini G., Martelli M., Tassoni C.: *An approach to a knowledge representation about induction machine diagnostics in expert systems*. Proc. of ICEM'88 Pisa 1988.
3. Frąckowiak J.: *Symulacja hamowania odzyskowego pojazdu tramwajowego napędzanego przez silniki indukcyjne zasilane z falownika*. Materiały VI Konferencji Naukowej SEMTRAK, Zakopane 1994.
4. Frąckowiak J., Rawicki S., Stein Z., Stolpe M.: *Metoda analizy pracy trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych z falownika w układzie napędowym tramwaju*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kazimierz Dolny 1994.
5. Frąckowiak J., Rawicki S., Stein Z.: *Digital simulation of traction vehicle driven by three-phase induction motors*. XIII Symposium „Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits”, Poznań 1994.
6. Glinka T., Kochanowski W.: *Silnik indukcyjny przeznaczony do napędu tramwaju*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1994, 1247.
7. Handke A.: *Analiza harmonicznych prądu i napięcia generowanych w elektroenergetycznej sieci zasilającej przez niektóre układy tyrystorów*. Rozprawy Elektrotechniczne 1975, 3.
8. Handke A.: *Analiza harmonicznych prądu generowanych w elektroenergetycznej sieci zasilającej przez trójfazowy tyrystorowy prostownik mostkowy*. Rozprawy Elektrotechniczne 1977, 3.
9. Kowalski Z.: *Asymetria w układach elektroenergetycznych*. PWN, Warszawa 1987.
10. Leith D., Deans N. D., Stewart I. D.: *Condition monitoring of electrical machines using a real-time expert system*. Proc. of ICEM'88, Pisa 1988.
11. Mitkowski E., Grzybowski A., Plenzler G., Stiller J.: *Reaction of the controller of I2-pulse inverter to asymmetry of the sup-*



Rys. 18. Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego: a – przebieg czasowy, b – analiza częstotliwościowa; częstotliwość nośna $f_n=2500$ Hz

ply network. Proc. of XII Symposium „Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits”, Poznań 1991.

12. Nowacki Z.: *Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego*. PWN, Warszawa 1991.
13. Penman J., Tait A. J., Smith J. R., Bryan W. E.: *The development of a machine condition monitoring system for electrical drives*. Proc. of the Conference on Drives (Motors) Control, Paris 1985.
14. Plenzler G.: *Wpływ asymetrii parametrów systemu elektroenergetycznego na warunki wysterowania i wyłączania tyrystorów trójfazowego falownika mostkowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej ELEKTRYKA 1992, 41.
15. Rawicki S.: *Investigation of the influence of the space harmonics interaction phenomenon on transient and steady state characteristics of a three-phase slip-ring induction machine*. Archiv für Elektrotechnik 1985, 68.
16. Rawicki S.: *Calculation of current for internal short-circuits in a stator of a three-phase slip-ring induction machine*. Archiv für Elektrotechnik, 1985, 68.
17. Rawicki S., Stein Z., Stolpe M.: *Powiększanie niezawodności eksploatacyjnej 3-fazowych silników indukcyjnych użytkowanych w stacjach niesymetrycznych przez nadmiar parametryczny*. Materiały XXIII Zimowej Szkoły Niezawodności „Metody podwyższania niezawodności rezerwowaniem”, Szczryk 1995.
18. Stein Z.: *Zagadnienia stanów niesymetrycznych trójfazowych maszyn indukcyjnych*. Rozprawy, WPP, Poznań 1976, 79.
19. Stein Z., Stolpe M., Szybiński R.: *Praca trójfazowych silników indukcyjnych w stacjach niesymetrycznych*. Skrypty Szkoły Niezawodności RELEMA, Bydgoszcz-Warszawa 1985, XXII.
20. Zach F.C., Ertl H.: *Efficiency optimal control for AC drives with PWM inverters*. IEEE Trans. 1985, IA-21, 4.



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Stein

Pracuje na stanowisku profesora zwyczajnego w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej. Pełni funkcję Dziekana Wydziału Elektrycznego. Jest autorem wielu podręczników i skryptów w ramach specjalności: maszyny elektryczne i napęd elektryczny. Był kierownikiem wielu prac naukowo-badawczych, z których znaczna część znalazła zastosowanie w praktyce przemysłowej. Zajmuje się problematyką niezawodności i eksploatacji maszyn elektrycznych, matematycznym modelowaniem maszyn elektrycznych, diagnostyką, energooszczędnym sterowaniem pojazdów trakcyjnych.



Dr hab. inż. Stanisław Rawicki

Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej. Jego specjalnością naukową są maszyny elektryczne. Był stypendystą Fundacji im. A. Humboldta. Podczas stażu naukowego w Niemczech współpracował z Prof. H. O. Seinsch oraz Prof. A. Kremser, natomiast w Portugalii pracował razem z Prof. J. Fellipe de Souza oraz Prof. V. Gliđić. Zajmuje się sterowaniem i diagnostyką maszyn elektrycznych oraz energooszczędnym sterowaniem pojazdów trakcyjnych.



Dr inż. Mieczysław Stolpe

Pracuje na stanowisku starszego wykładowcy w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej. Pełni funkcję zastępcy Dyrektora d/s dydaktycznych. Jest autorem wielu opracowań badawczych i projektowych, które zostały wdrożone w praktyce przemysłowej. Zajmuje się problematyką transportu płynnych metali, diagnostyką maszyn elektrycznych, sterowaniem pojazdów trakcyjnych, komputeryzacją metod badawczych.



Dr inż. Jerzy Frąckowiak

Pracuje na stanowisku asystenta w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej. Ukończył studia wyższe w zakresie fizyki oraz elektrotechniki (automatyka). Zajmuje się matematycznym modelowaniem maszyn elektrycznych oraz energooszczędnym sterowaniem pojazdów trakcyjnych. Praca doktorska dotyczyła energooszczędnego sterowania pojazdu tramwajowego napędzanego przez trójfazowe silniki indukcyjne.