

**Marcin Wolkiewicz, Czesław T. Kowalski**  
Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych

## **WPLYW NIESYMETRII ZASILANIA NA PROBLEM WYKRYWANIA ZWARCÍ ZWOJOWYCH W SILNIKU INDUKCYJNYM**

### **IMPACT OF SUPPLY VOLTAGE UNBALANCE ON STATOR WINDING FAULT DETECTION IN INDUCTION MOTOR**

**Abstract:** In this paper impact of supply anomalies on the machine diagnosis is presented. Diagnosis in sense of stator winding fault in case of turn to turn fault. The results of experimental in the case of physical modelling of stator short-circuits at different voltage asymmetry degree are presented. Damage of a stator winding was modelled by changing number of shorted turns in each phase. Supply voltage unbalance was modelled by increasing resistance in each motor phase. Analysis of symmetrical components of stator voltage and current was applied to investigation the asymmetry impact on shorted turns detection. Tests have been performed for the direct net supply at different load torques.

#### **1. Wstęp**

Napędy z silnikami indukcyjnymi są obecnie szeroko stosowane w wielu procesach przemysłowych, tym samym problemy wynikające z ich konserwacji oraz wykrywania uszkodzeń stają się coraz bardziej istotne. Według [1] uszkodzenia uzwojenia stojana są jedną z najczęstszych przyczyn awarii silników indukcyjnych i stanowią około 36% wszystkich uszkodzeń. Uszkodzenia uzwojeń stojana zaczynają się, jako niezauważalne zwarcie zwojowe, które w końcu rozprzestrzenia się na całe uzwojenie powodując zwarcie główne. Związane jest to z prądem powstającym w zwartym obwodzie, o wartości niekiedy kilkadziesiąt razy większej od prądu znamionowego, powodującego szybki wzrost temperatury, zniszczenie izolacji i rozprzestrzenienie się efektów zwarcia na całe uzwojenie. W końcowym efekcie prowadzi to do awaryjnego zatrzymania silnika i konieczność jego natychmiastowej wymiany lub naprawy, co wiąże się często z dużymi kosztami. Dlatego też, diagnozowanie tego typu uszkodzeń ma sens tylko w początkowej fazie powstawania uszkodzenia. Stosowane obecnie układy zabezpieczeń nie reagują na zwarcia małej liczby zwojów w uzwojeniu jednej fazy, gdyż powodują one zbyt małe zmiany ilościowe w prądach fazowych [6]. Dlatego poszukuje się innych rozwiązań opartych o pomiar i cyfrowe przetwarzanie sygnałów diagnostycznych, które umożliwiają prowadzenie monitorowania stanu maszyny na bieżąco i alarmowanie użytkownika w początkowej fazie powstawania zwarcia [1]. Interesującym podejściem jest metoda polegająca na nieinwazyjnym pomiarze napięć i prądów stojana, a następnie na

ich przetworzeniu do układu składowych symetrycznych za pomocą prostych zależności niewymagających dużych nakładów obliczeniowych [2], [4]. Głównym problemem w zastosowaniu tego typu metody jest fakt, że brak symetrii napięć zasilania, zmiany obciążenia silnika jak również wady konstrukcyjne uzwojeń stojana dają podobne objawy jak zwarcia zwojowe, co może zakłócić proces identyfikacji uszkodzenia i spowodować błędną ocenę faktycznego stanu uzwojenia stojana [5]. Dodatkowo konsekwencją asymetrycznego zasilania jest nadmierne grzanie się silników, zmniejszenie ich sprawności i momentu obrotowego oraz zwiększenie zużycia mechanicznego. Szczególnie istotny jest wzrost temperatury pracy silnika, który powoduje szybsze starzenie się izolacji uzwojeń stojana, co w konsekwencji może powodować dalszy rozwój zwarcí zwojowych. Dlatego też niezbędne wydaje się określenie symptomów wywołanych asymetrią napięcia zasilania oraz porównanie ich z symptomami związanymi ze zwarciami zwojowymi.

W artykule przedstawiono analizę wpływu asymetrii napięcia zasilania na skuteczność wykrywania zwarcí zwojowych silnika indukcyjnego. badania wpływu niesymetrii zasilania zastosowano analizę składowych symetrycznych napięć i prądów stojana, a w szczególności zmiany amplitudy składowych przeciwnych prądu stojana oraz napięcia zasilającego.

#### **2. Analiza składowych symetrycznych napięć i prądów stojana**

Brak równowagi w trójfazowych systemach może być oceniany za pomocą składowych sy-

metrycznych prądu i napięcia. Ogólna zależność przekształcenia napięć i prądów fazowych stojana z układu współrzędnych  $ABC$  na składowe symetryczne  $012$  w stanie ustalonym pracy silnika ma postać [4]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

$i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}$  - odpowiednio prądy fazowe stojana w fazach A, B, C,

$u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}$  - odpowiednio napięcia fazowe stojana w fazach A, B, C,

$i_0, i_1, i_2$  - odpowiednio składowa zerowa, zgodna i przeciwna prądu stojana,

$u_0, u_1, u_2$  - odpowiednio składowa zerowa, zgodna i przeciwna napięcia stojana,

$a$  - zespolony operator obrotu o kąt  $2\pi/3$ .

Jak wykazano w [2], [4], [6] możliwe jest odfiltrowanie harmonicznych zakłócających procedurę obliczania składowych symetrycznych napięć i prądów stojana przy wykorzystaniu analizy widmowej sygnałów. Należy wówczas dokonać transformacji układu współrzędnych  $ABC$  do układu składowych symetrycznych  $012$  w dziedzinie czasu. W tym celu należy zastąpić zespolony operator obrotu  $a$  operatorem  $S_{90}$  przesunięcia fazowego o kąt  $90^\circ$  w dziedzinie czasu [3]. Wówczas równania przekształceń składowych symetrycznych napięć i prądów otrzymują postać:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sA} - \frac{1}{2}(u_{sB} + u_{sC}) + \frac{\sqrt{3}}{2}S_{90}(u_{sB} - u_{sC}) \\ u_{sA} - \frac{1}{2}(u_{sB} + u_{sC}) - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{90}(u_{sB} - u_{sC}) \\ u_{sA} + u_{sB} + u_{sC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{sA} - \frac{1}{2}(i_{sB} + i_{sC}) + \frac{\sqrt{3}}{2}S_{90}(i_{sB} - i_{sC}) \\ i_{sA} - \frac{1}{2}(i_{sB} + i_{sC}) - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{90}(i_{sB} - i_{sC}) \\ i_{sA} + i_{sB} + i_{sC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie:

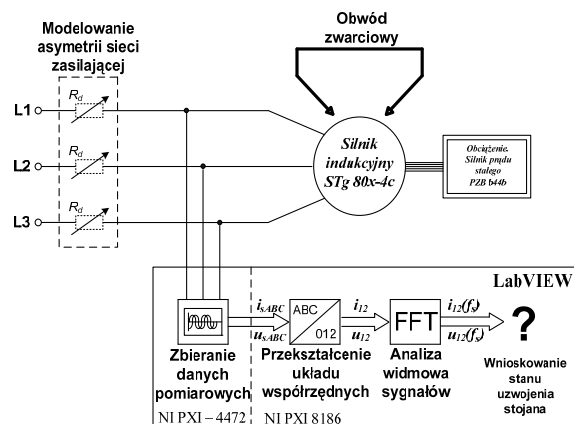
$S_{90}$  - operator przesunięcia fazowego o kąt  $90^\circ$  w dziedzinie czasu.

W trójfazowych silnikach indukcyjnych składowa zerowa prądu  $i_0$  nie występuje, dlatego obliczenia składowych symetrycznych sprowadzają się do wyznaczenia składowych  $i_1, i_2$  oraz  $u_1, u_2$  z równań (4) i (5). Obliczone w ten sposób składowe symetryczne oraz wyznaczone przy użyciu analizy widmowej zmiany wartości amplitudy składowej kolejności przeciwnej napięcia i prądu stojana dla składowej podstawowej napięcia zasilania są bardzo przydatne z punktu widzenia monitorowania uszkodzenia uzwojeń stojana.

### 3. Metodyka badań

#### 3.1. Charakterystyka obiektu badań

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na silniku indukcyjnym małej mocy (1.1kW, liczba zwojów w jednej fazie stojana  $N_s=292$ ) zasilanego bezpośrednio z sieci. Badania wykonano dla silnika obciążonego różnymi wartościami momentu obciążenia.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu pomiarowo-diagnostycznego

Schemat ideowy systemu pomiarowo diagnostycznego przedstawiono na rys. 1. Do pomiarów prądów fazowych oraz napięć międzyfazowych stojana wykorzystano przetworniki typu LEM. Akwizycję danych pomiarowych zrealizowano z wykorzystaniem komputera przemysłowego NI PXI 8186 z kartą pomiarową NI PXI-4472. Obliczenia składowych symetrycznych napięcia i prądu stojana oraz dokładnej oceny poszczególnych amplitud składowych dokonano za pomocą wirtualnego przyrządu opracowanego w środowisku LabVIEW.

### 3.2. Modelowanie zwarć zwojowych uzwojenia stojana

Uzwojenia stojana silnika zostały przezwojone w taki sposób, aby możliwe było fizyczne modelowanie zwarć zwojowych stojana niezależnie w każdej z trzech faz silnika. Badania przeprowadzono przy zwarciu maksymalnie 8 zwojów w jednej z faz, czyli do około 3% całego uzwojenia. Prąd zwarciovowy płynący w obwodzie zwarciovym nie był ograniczany dodatkową rezystancją, tym samym rezystancja punktu zwarcia odpowiadała rezystancji przewodu zastosowanego do zwarcia odpowiedniej grupy zwojów.

### 3.3. Modelowanie asymetrii napięcia zasilającego

Badania eksperymentalne obejmowały również analizę wpływu asymetrii napięcia zasilającego na pracę silnika. Stopień asymetrii modelowano poprzez zwiększanie dodatkowej zewnętrznej rezystancji  $R_d$  umieszczonej w każdej z faz sieci zasilającej. Zgodnie z normą [7] do określenia stopnia asymetrii napięcia zasilania niezbędne jest wyznaczenie współczynnika asymetrii:

$$n_{u2} = \frac{u_2}{u_1} \cdot 100\%, \quad (6)$$

gdzie:

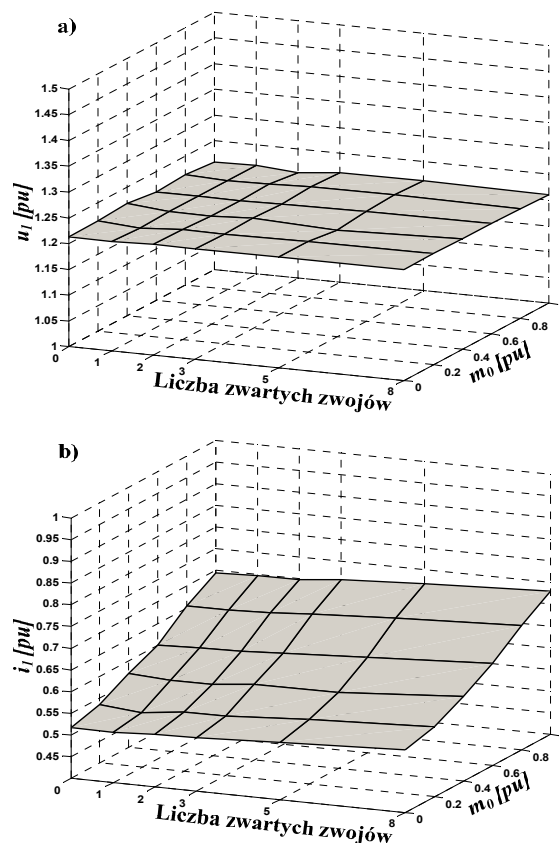
$n_{u2}$  – współczynnik asymetrii napięcia zasilania.

Badania wykonano dla asymetrii napięcia zasilania do  $n_{u2}=3\%$ .

## 4. Wyniki badań

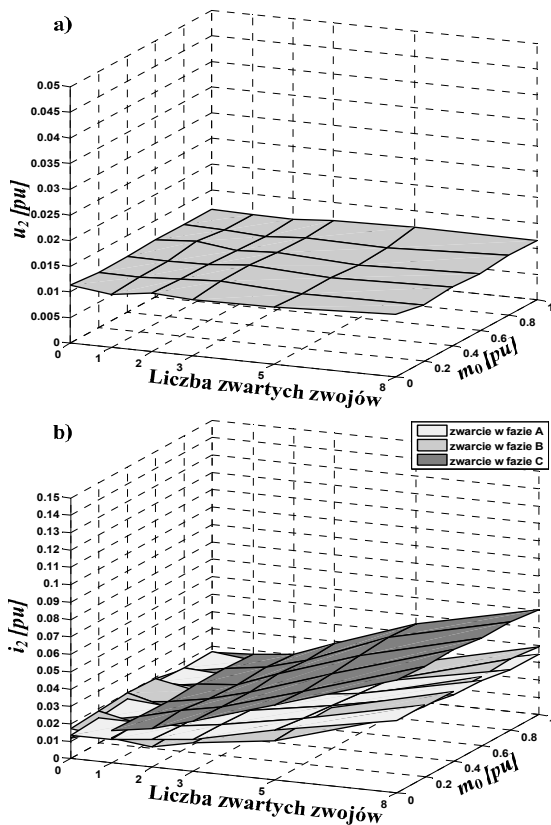
### 4.1. Uszkodzenie uzwojenia stojana

Przebadano następujące przypadki uszkodzeń uzwojenia stojana osobno w każdej z faz silnika: od 1 do 8 zwartych zwojów. Na rys. 2 przedstawiono zmiany wartości amplitudy składowej zgodnej napięcia i prądu stojana w zależności od stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana (liczby zwojów zwartych w uzwojeniu fazowym stojana) modelowanego w fazie A silnika dla różnych obciążeń maszyny roboczej. Jak wynika z rys. 2 wraz ze zwiększaniem liczby zwartych zwojów amplituda składowej zgodnej  $u_1$  i  $i_1$  praktycznie nie ulega zmianie. Widoczna jest tylko zależność składowej zgodnej prądu stojana od wartości obciążenia silnika. Analogiczny charakter zmian amplitudy składowych  $u_1$  i  $i_1$  jest w przypadku modelowania zwarć w pozostałych dwóch fazach silnika.



Rys. 2. Zależność składowej kolejności zgodnej a) napięcia zasilania  $u_1$  oraz b) prądu stojana  $i_1$  od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika

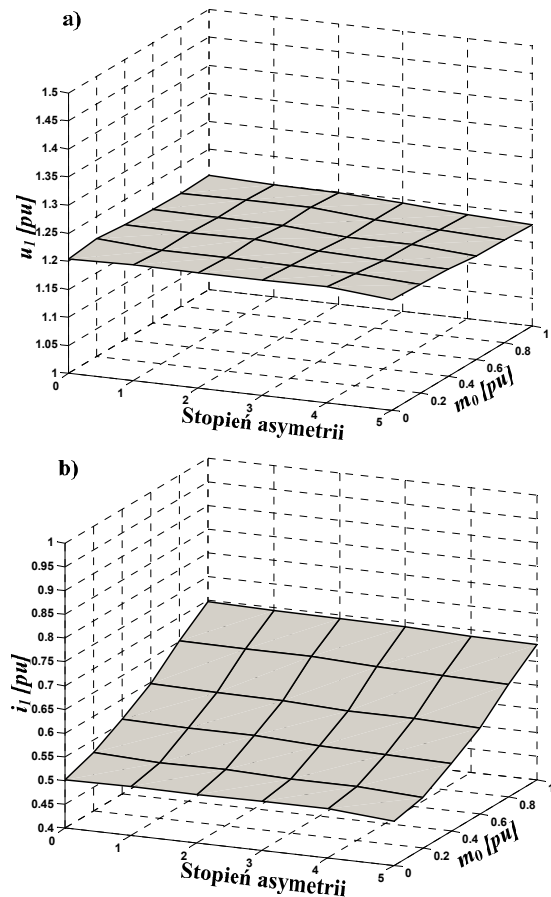
Na rys. 3 przedstawiono zmiany wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia i prądu stojana w zależności od fazy wystąpienia oraz liczby zwartych zwojów dla różnych obciążeń silnika. Wraz ze zwiększaniem liczby zwartych zwojów amplituda składowej przeciwnej napięcia  $u_2$  praktycznie nie zmienia się. Pozostaje na poziomie około 0,01, co świadczy, że podczas wykonywania badań laboratoryjnych występowała asymetria sieci zasilającej na poziomie  $n_{u2}=1\%$ . Wartość amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana  $i_2$  rośnie wraz ze zwiększaniem liczby zwartych zwojów. Największy wzrost składowej  $i_2$  zaobserwowano przy zwarciu modelowanym w fazie C. Można również zauważyć, że wartości amplitudy składowych przeciwnych zarówno napięcia  $u_2$  jak i prądu stojana  $i_2$  praktycznie nie zależą od obciążenia silnika. Wobec powyższego można stwierdzić, że do oceny stopnia uszkodzenia stojana, wywołanymi zwarciami zwojowymi wystarczy monitorowanie zmian wartości amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana  $i_2$ .



Rys. 3. Zależność składowej kolejności przeciwnej a) napięcia zasilania  $u_2$  oraz b) prądu stojana  $i_2$  od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika

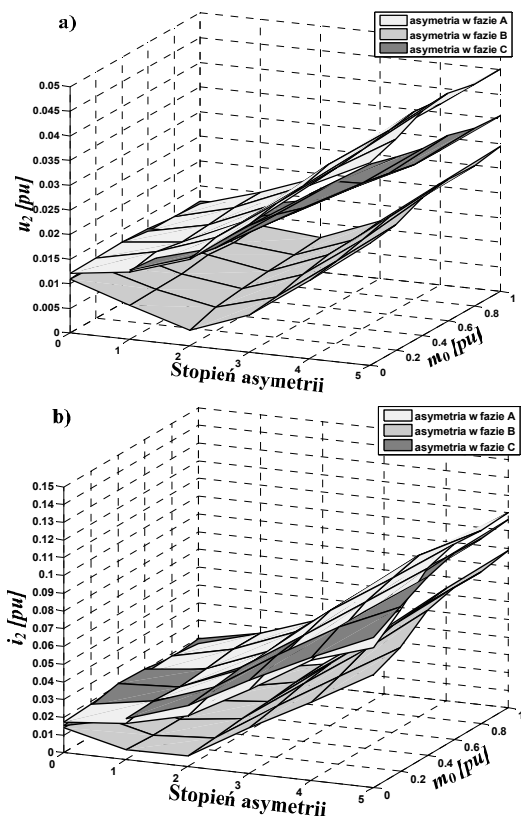
#### 4.2. Asymetria napięcia zasilania

Według [7] maksymalna dopuszczalna wartość asymetrii napięcia zasilania w trójfazowych sieciach odbiorczych nie powinna przekraczać wartości 3% wskaźnika obliczonego z zależności (6). Przebadano pięć różnych stopni asymetrii napięcia zasilania osobno w każdej z faz silnika. W celu uzyskania stałej asymetrii dla danych warunków pracy silnika utrzymywano stałą wartość napięcia na rezystorze dodatkowym  $R_d$ . Wykonano serię badań eksperymentalnych, w których badano wpływ asymetrii napięcia zasilania na zmiany amplitudy składowej zgodnej (rys. 4) oraz przeciwnej (rys. 5) napięcia i prądu stojana dla różnych wartości momentu obciążenia. Amplitudy składowej zgodnej napięcia zasilania (rys. 4a) i prądu stojana (rys. 4b) nieznacznie zmieniają swoją wartość przy zwiększaniu asymetrii zasilania w fazie A silnika. Dodatkowo składowa  $i_1$  silnie zależy od obciążenia silnika. Analogiczny charakter zmian amplitudy składowych  $u_1$  i  $i_1$  jest w przypadku modelowania asymetrii zasilania w pozostałych dwóch fazach silnika.



Rys. 4. Zależność składowej kolejności zgodnej a) napięcia zasilania  $u_1$  oraz b) prądu stojana  $i_1$  od stopnia asymetrii napięcia zasilania dla różnych wartości obciążenia silnika

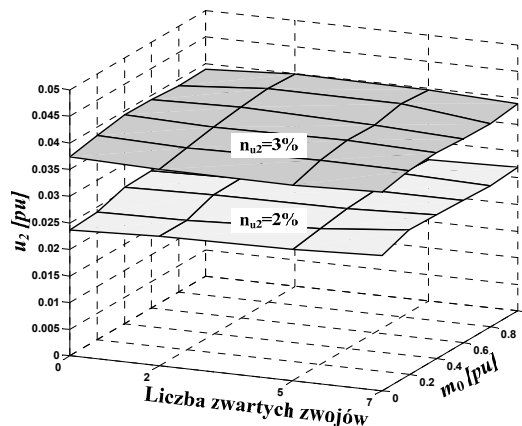
Jak wynika z rys. 5 wraz ze zwiększaniem stopnia asymetrii napięcia zasilania zwiększa się wartość amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana. Zakres zmian amplitudy składowej  $i_2$ , wywołany asymetrią napięcia zasilania (rys. 5b), zasadniczo różni się od zakresu zmian wywołanych zwarciami zwojowymi (rys. 3b). Dodatkowo, w odróżnieniu do zwarc zwojowych widoczny jest również wzrost wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia (rys. 5b) w przypadku zwiększania stopnia asymetrii napięcia zasilania. W przypadku asymetrii modelowanej w fazie A i C widoczny jest wyraźny wzrost wartości  $u_2$  i  $i_2$ . W przypadku asymetrii w fazie B zauważalny jest początkowy spadek amplitudy  $u_2$  i  $i_2$ , a następnie ich wzrost. Modelowana asymetria napięcia początkowo (do 2 stopnia asymetrii) przeciwdziała „wrodzonej” asymetrii konstrukcyjnej silnika oraz istniejącej asymetrii sieci zasilającej w laboratorium powodując początkową symetryzację maszyny.



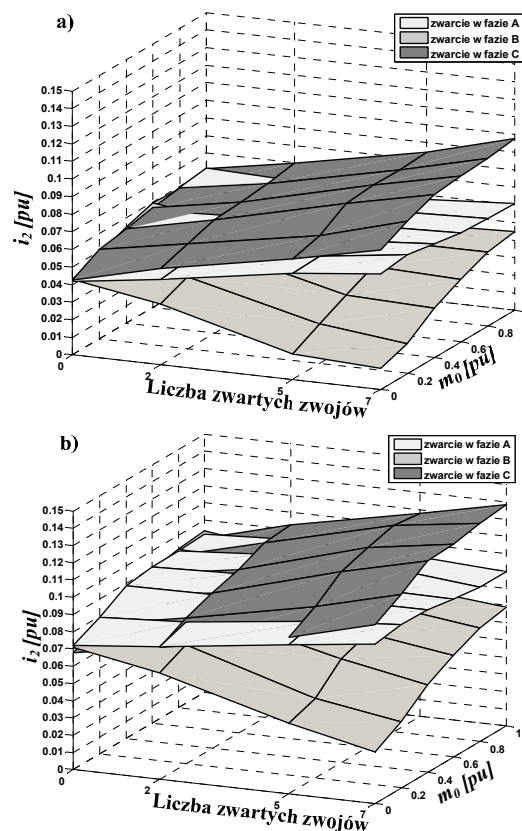
Rys. 5. Zależność składowej kolejności przeciwnej a) napięcia zasilania  $u_2$  oraz b) prądu stojana  $i_2$  od stopnia asymetrii napięcia zasilania dla różnych wartości obciążenia silnika

#### 4.3. Uszkodzenie uzwojenia stojana przy różnym stopniu asymetrii napięcia zasilania

Kolejna analiza dotyczyła badania uszkodzenia uzwojenia stojana przy różnym stopniu asymetrii napięcia zasilania. Jak wykazano wcześniej podczas badań eksperymentalnych istniała w laboratorium asymetria napięcia zasilania na poziomie  $n_{u2}=1\%$  (rys. 3a). Przebadano następujące przypadki uszkodzeń uzwojenia stojana osobno w każdej z faz silnika: od 2 do 7 zwartych zwojów przy asymetrii napięcia zasilania modelowanej w fazie A silnika o wartości  $n_{u2}=2\%$  oraz  $n_{u2}=3\%$ . Na rys. 6 przedstawiono zmiany wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia zasilania w zależności od liczby zwojów zwartych w uzwojeniu fazowym stojana modelowanych w fazie A silnika oraz dla różnych obciążeń maszyny roboczej. Podobnie jak w pkt. 4.1 uszkodzenie uzwojenia stojana nie wpływa na zmiany wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia zasilania  $u_2$ . Analogiczny charakter zmian amplitudy składowej  $u_2$  jest w przypadku modelowania zwarć w pozostałych dwóch fazach silnika.



Rys. 6. Zależność składowej kolejności przeciwnej napięcia zasilania  $u_2$  od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika oraz asymetrii napięcia zasilania modelowanej w fazie A



Rys. 7. Zależność składowej kolejności przeciwnej prądu stojana  $i_2$  od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika oraz asymetrii napięcia zasilania modelowanej w fazie A na poziomie a)  $n_{u2}=2\%$ , b)  $n_{u2}=3\%$

Jak wykazano wcześniej (rys. 5b) wzrost asymetrii napięcia zasilania powoduje wzrost amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana  $i_2$ . Tym samym dla silnika nieuszkodzonego

i wymuszonej asymetrii napięcia zasilania na poziomie  $n_{u2}=2\%$  oraz  $n_{u2}=3\%$  widoczna jest duża początkowa wartość amplitudy składowej  $i_2$  (rys. 7). Zwiększanie stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana, dla różnej wartości asymetrii napięcia zasilania powoduje zmiany wartości składowej  $i_2$ . Charakter tych zmian zależy nie tylko od stopnia, ale również od fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenie. Zawarcia zwojowe modelowane w fazie A powodują nieznaczny wzrost wartości amplitudy  $i_2$ . Zwiększanie stopnia uszkodzenia stojana w fazie B powoduje zmniejszanie wartości  $i_2$ , a tym samym wpływ asymetrii napięcia zasilania zostaje pomniejszony, bez zmiany wartości składowej  $u_2$  (rys. 6). Natomiast zawarcia w fazie C powodują największy wzrost amplitudy składowej  $i_2$ , co sprawia, że początkowa asymetria napięcia zasilania jest dodatkowo wzmacniana. Tym samym można stwierdzić, że w celu oceny stanu uzwojenia stojana konieczne jest oprócz monitorowania zmian wartości amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana  $i_2$ , również monitorowanie wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia  $u_2$ . Wyznaczenie amplitudy składowej  $u_2$  umożliwia początkową ocenę stanu silnika, a tym samym pozwala na określenie charakteru zmian składowej  $i_2$  w przypadku wystąpienia uszkodzenia uzwojenia stojana.

## 5. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania wykazały, że amplituda składowej przeciwnej prądu stojana  $i_2$  w ograniczonym stopniu zależy od obciążenia silnika, a zmiany jej wartości w miarę wzrostu stopnia uszkodzenia uzwojeń stojana (liczba zwartych zwojów) są bardzo korzystne z punktu widzenia monitorowania uszkodzenia. Dodatkowo monitorowanie zmian wartości amplitudy składowej przeciwnej napięcia  $u_2$  przy zasilaniu silnika bezpośrednio z sieci pozwala na określenie stopnia asymetrii napięcia zasilającego oraz eliminuje jej wpływ na ocenę faktycznego stanu uzwojenia stojana.

## 6. Literatura

- [1] GRUBIC S., ALLER J.M., BIN LU, HABETLER T.G., *A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, 2008, pp. 4127-4136.
- [2] HENAO H., ASSAF T., CAPOLINO G.A., *The discrete Fourier transform for computation of symmetrical components harmonics*. Power Tech Conf. Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Vol. 4, 2003.
- [3] IRAVANI M.R., KARIMI-GHARTEMANI M., *Online estimation of steady state and instantaneous symmetrical components*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 5, 2003, pp. 616-622.
- [4] KOWALSKI Cz.T., WOLKIEWICZ M., *Stator faults diagnosis of the converter-fed induction motor using symmetrical components and neural networks*. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2009, Spain.
- [5] WOLKIEWICZ M., *Wpływ niesymetrii konstrukcyjnej uzwojenia stojana oraz asymetrii napięcia zasilania na wykrywanie zwarć zwojowych silnika indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały. 2010, nr 30, s.321-331.
- [6] WOLKIEWICZ M, KOWALSKI Cz.T., *Nieinwazyjne metody wczesnego wykrywania zwarć zwojowych w silniku indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości, cz. I*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2010, nr 87, s. 145-150.
- [7] PN-EN 50160, *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy Nr R0101403*

## Autorzy

dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWr.

E-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl

mgr inż. Marcin Wolkiewicz

E-mail: marcin.wolkiewicz@pwr.wroc.pl

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

## Recenzent

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec