

Maciej Bogumił
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

PORÓWNANIE PARAMETRÓW SILNIKA DWUFAZOWEGO I TRÓJFAZOWEGO ZASILANYCH Z PRZEKSZTAŁTNIKÓW

COMPARISON OF PARAMETERS OF TWO-PHASE AND THREE-PHASE MOTORS POWERED FROM POWER INVERTER

Abstract: In this article has been presented researches results of drivers constructed on the base of typical three-phase induction cage motor with rated power 1500 W, shaft height 90 mm and one pole pair. There has been described changes concerning the types and parameters of windings used in experimental two-phase and three-phase motors. There has been presented parameters and characteristics of motors which are in cooperation with energoelectronic inverters powered from one-phase power grid 230 V and smoothly tuned the rotation speed. Additionally to comparison of motors parameters there has been presented also researches results of this machines powered from three-phase power grid 3×400 V appropriately. There has been comprised manners of motors powered from power grid and from inverters. Moreover, there has been performed costs analysis of motors and inverters produces. There have been performed also comparison analyses of two-phase and three-phase motors powered from power grid and from inverters. The comparison concerned the parameters of one motor powered from different power sources as well as parameters different motors powered from the same power source.

1. Wstęp

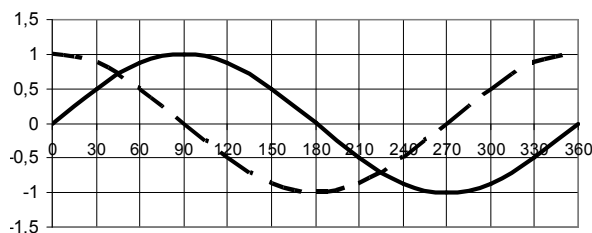
Silniki indukcyjne klatkowe są powszechnie stosowane w wielu rodzajach napędów. Wynika to z ich małej awaryjności, łatwości eksploatacji i przystępnej ceny. W połączeniu z przekształtnikami elektronicznymi silniki indukcyjne stanowią nowoczesne napędy o bardzo dobrych właściwościach regulacyjnych.

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych silnika indukcyjnego dwufazowego i trójfazowego zasilanych z przekształtników oraz z sieci trójfazowej 3×400V. Istotnym elementem porównawczym było określenie kosztu obu napędów.

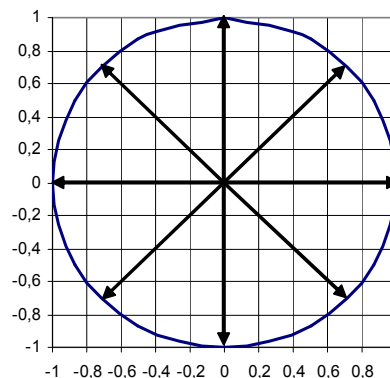
Szczególną uwagę należy zwrócić na zasilanie silnika dwufazowego z uzwojeniem symetrycznym. Przy zasilaniu napięciami sinusoidalnymi zgodnymi w fazie każde z uzwojeń maszyny wytwarza pole pulsujące, które nie powoduje powstania momentu obrotowego. Poprawną pracę tego silnika zapewnia zasilanie uzwojeń dwoma napięciami o tej samej amplitudzie przesuniętymi względem siebie o kąt fazowy 90° (rys.1). Przy takim zasilaniu pole wypadkowe wytwarzane przez uzwojenia jest polem wirującym kołowym (rys.2).

Jeżeli powstaną różnica amplitud napięć lub przesunięcie fazowe różne od 90° (rys.3), to pole magnetyczne silnika zmienia się w pole

eliptyczne (rys.4), a w skrajnym przypadku w pole pulsujące.



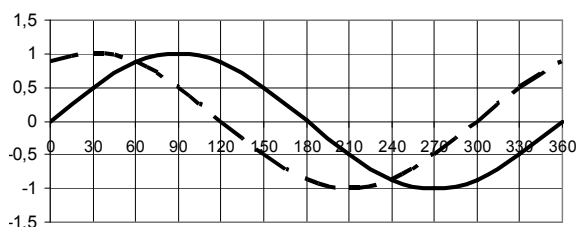
Rys. 1. Przebiegi czasowe napięć przesuniętych względem siebie o kąt fazowy 90°



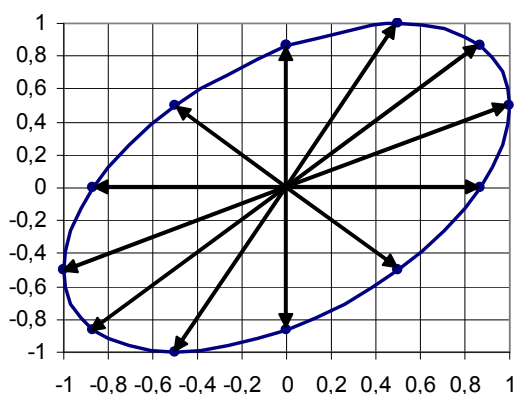
Rys. 2. Kolejne położenia przestrzenne wektora wypadkowego pola wirującego kołowego

Zasilanie takimi napięciami jest niewłaściwe. Wytworzone przez uzwojenia stojana pole eliptyczne ma różną wartość indukcji na obwo-

dzie szczeliny powietrznej silnika i nierównomierną prędkość wirowania, większą przy mniejszej krzywiznie elipsy i mniejszą przy większej krzywiznie elipsy.



Rys. 3. Przebiegi czasowe napięć przesuniętych względem siebie o kąt fazowy 60°



Rys. 4. Kolejne położenia przestrzenne wektora wypadkowego pola wirującego eliptycznego

W efekcie powstaje różnica pomiędzy prądami w obu uzwojeniach, a więc nierówne obciążenie uzwojeń. Jest to bardzo niepożądane zjawisko i może doprowadzić do trwałego uszkodzenia uzwojeń.

2. Prototypy napędów

Wykonano dwa modele napędów: jeden z silnikiem dwufazowym i jeden z silnikiem trójfazowym. Każdy napęd o mocy znamionowej 1,5 kW i regulowanej prędkości obrotowej do 3000 obr/min.

Silniki eksperymentalne współpracowały z falownikiem zasilanym z jednofazowej sieci o napięciu 230V. Taki sposób zasilania wymagał zaprojektowania i wykonania nietypowych uzwojeń. W tym celu zamówiono dwa typowe trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe o wzniosie wału 90 mm bez uzwojenia stojana.

Uzwojenia zostały zaprojektowane w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki. W jednym silniku umieszczono uzwojenie dwufazowe symetryczne na napięcie fazowe $U_f=220V$, a w drugim silniku uzwojenie trójfazowe jednowarstwowe na napięcie międzyfa-

zowe $U_p=220V$. Obydwa uzwojenia były dwubiegunowe.

Falownik trójfazowy został zakupiony, natomiast falownik dwufazowy wykonano w Zakładzie Napędów Obrabiarkowych Instytutu Elektrotechniki.

3. Badania

Badania silników przeprowadzono przy zasilaniu z falowników oraz przy zasilaniu z sieci.

Program badań:

- próba biegu jałowego,
- charakterystyka obciążenia,
- charakterystyka nagrzewania,
- wyznaczenie sprawności,
- pomiar drgań,
- pomiar hałasu.

Silnik dwufazowy wymagał dwóch napięć 220V przesuniętych o kąt 90° ze względu na symetryczne uzwojenie bez kondensatora rozruchowego. Uzyskanie takich napięć z sieci wymagało specjalnego układu zasilania (rys.5) pozwalającego na jednoczesną regulację wartości napięcia oraz kąta przesunięcia fazowego. Pomiar rezystancji wykonano za pomocą mostka pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie rezystancji uzwojenia bez odłączania zasilania silnika.

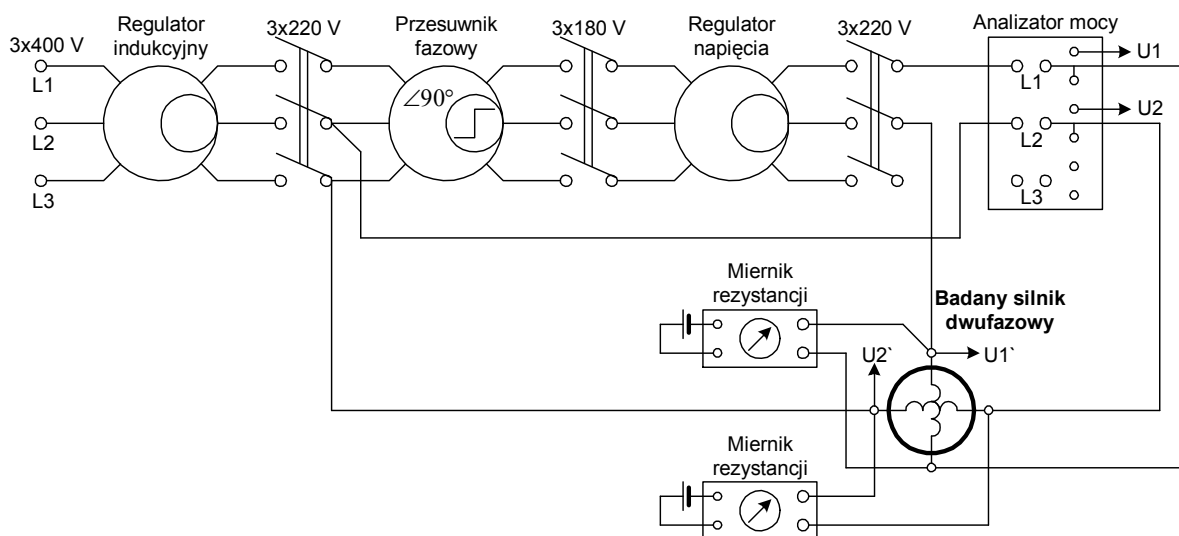
Zasilając silniki z falownika wykonano próby przy częstotliwości $f=50$ Hz, tzn.: znamionowej prędkości obrotowej, co umożliwia porównanie parametrów silników przy zasilaniu z sieci oraz z falownika.

4. Wyniki badań

Ze względu na dużą ilość wykonanych badań przedstawiono tylko wyniki porównawcze wybranych parametrów napędów.

4.1. Bieg jałowy

Silnik 2-fazowy zasilany z sieci przy biegu jałowym miał w stosunku do silnika 3-fazowego o blisko 21% mniejszy prąd fazowy ale pobierał o ponad 11% większą moc co oznacza o przeszło 40% większy współczynnik mocy. Zaś przy zasilaniu z falownika silnik 2-fazowy miał o blisko 14% większy prąd w uzwojeniu, pobierał o ponad 52% większą moc, co oznacza niespełna 3% większy współczynnik mocy od silnika 3-fazowego.

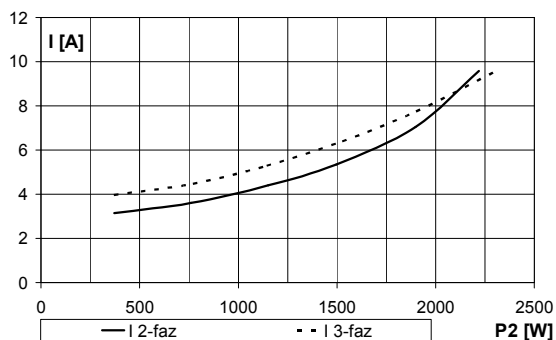


Rys.5. Schemat układu zasilania silnika z uzwojeniem dwufazowym symetrycznym

Porównując bieg jałowy silnika 2-fazowego zasilanego z sieci oraz z falownika można zauważyć, że prąd pobierany z falownika był o 29% większy, a pobierana moc była większa o blisko 33% co oznacza o ponad 30% mniejszy współczynnik mocy. Przy zasilaniu z falownika prąd w uzwojeniu stojan silnika 3-fazowego był o 10% mniejszy, a moc pobierana była o ponad 3% mniejsza niż przy zasilaniu z sieci, co oznacza o blisko 4% mniejszy współczynnik mocy.

4.2. Charakterystyka obciążenia

Podczas badania silników zasilanych z sieci i obciążonych mocą znamionową moc na wale silnika 2-fazowego była o 2% mniejsza niż moc oddawana przez silnik 3-fazowy. Wynika to z możliwości technicznych dokładnego obciążenia silników.

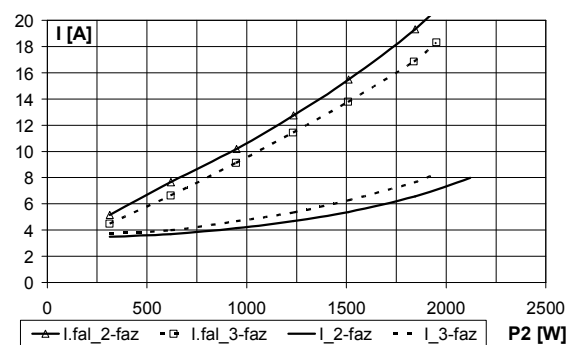


Rys. 6. Charakterystyka prądu w uzwojeniu stojana silnika 2-fazowego i 3-fazowego przy zasilaniu z sieci

Zarejestrowany prąd w uzwojeniu silnika 2-fazowego (rys.6) był o blisko 16% mniejszy, zaś moment obrotowy na wale był o niespełna 10% mniejszy niż silnika 3-fazowego. Silnik 2-

fazowy miał o blisko 9% większy poślizg, sprawność o ponad 4% mniejszą, zaś współczynnik mocy o blisko 5% większy niż silnik 3-fazowy.

Przy zasilaniu silników z falownika moc oddawana na wale silnika 2-fazowego była o 0,3% większa niż moc wydawana silnika 3-fazowego. Prąd w uzwojeniu stojana silnika 2-fazowego był o ponad 14% mniejszy, a współczynnik mocy o przeszło 15% mniejszy niż w uzwojeniu silnika 3-fazowego. Moment obrotowy był jednakowy w obu maszynach. Silnik 2-fazowy miał o ponad 4% mniejszy poślizg oraz o blisko 7% mniejszą sprawność niż silnik 3-fazowy.



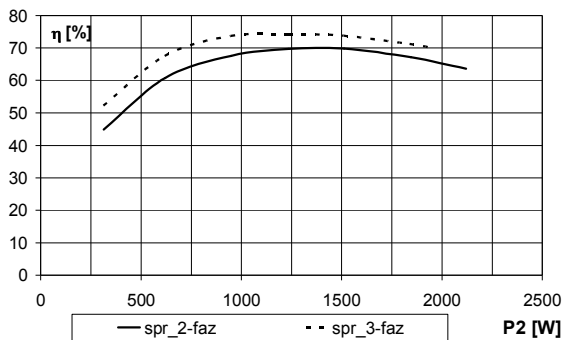
Rys. 7. Charakterystyka prądu w uzwojeniu stojana silnika 2-fazowego i 3-fazowego przy zasilaniu z falownika oraz prądu pobieranego przez falownik

Falownik 2-fazowy pobierał z sieci o blisko 6% większą moc oraz ponad 12% większy prąd (rys.7) niż falownik 3-fazowy. Sprawność całego napędu 2-fazowego (falownik + silnik) (rys.8) była o przeszło 5% mniejsza niż napędu

3-fazowego. Sprawność falownika 2-fazowego wyniosła około 94%, zaś falownika 3-fazowego około 93%, więc sprawność falownika 2-fazowego była o około 1% większa niż falownika 3-fazowego.

Badania silnika 2-fazowego zasilanego z sieci lub z falownika wykazały, że przy zasilaniu z falownika był o około 0,7% większy prąd w uzwojeniu stojana oraz moment obrotowy o około 8% większy niż przy zasilaniu z sieci.

Moc wydawana na wale silnika była o 1% większa przy zasilaniu z falownika. Poślizg silnika 2-fazowego zasilanego z falownika był o ponad 20% mniejszy, a współczynnik mocy aż o 28% mniejszy, natomiast sprawność o 0,4% większa niż przy zasilaniu z sieci.

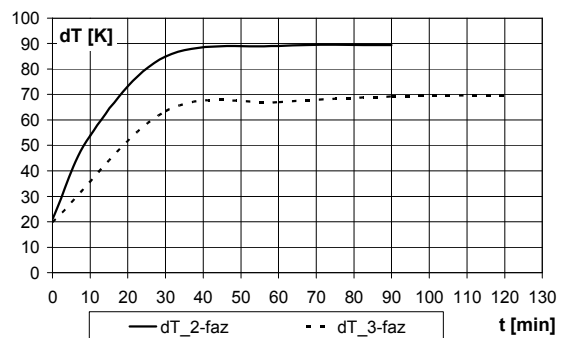


Rys. 8. Charakterystyka sprawności napędów przy zasilaniu z falownika

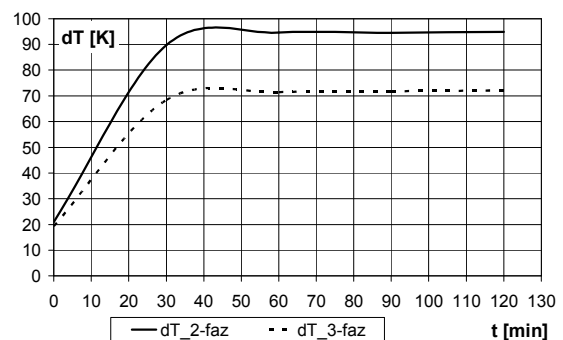
Badania silnika 3-fazowego zasilanego z sieci lub z falownika wykazały, że przy zasilaniu z falownika był o blisko 2% mniejszy prąd w uzwojeniu stojana oraz moment obrotowy o ponad 2% mniejszy niż przy zasilaniu z sieci. Moc wydawana na wale maszyny była o ponad 1% mniejsza przy zasilaniu z falownika. Silnik 3-fazowy przy zasilaniu z falownika miał o blisko 10% mniejszy poślizg oraz o ponad 11% mniejszy współczynnik mocy, zaś sprawność o 3% większą niż przy zasilaniu z sieci.

4.3. Charakterystyka nagrzewania

Z próby nagrzewania silników przy zasilaniu z sieci i obciążeniu znamionowym otrzymano o ponad 28% wyższy przyrost temperatury silnika 2-fazowego w porównaniu do 3-fazowego. Natomiast przy zasilaniu z falownika silnik 2-fazowy osiągnął o blisko 32% większy przyrost temperatury niż silnik 3-fazowy.



Rys. 9. Nagrzewanie silników zasilanych z sieci



Rys. 10. Nagrzewanie silników zasilanych z falowników

Silnik 2-fazowy przy zasilaniu z falownika osiągnął o 6% większy przyrost temperatury w porównaniu do zasilania z sieci. Natomiast silnik 3-fazowy osiągnął o ponad 3% większy przyrost temperatury przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci.

4.4. Straty w silnikach

Silnik 2-fazowy przy zasilaniu z sieci i obciążeniu znamionowym miał o blisko 20% większe straty w uzwojeniu stojana oraz o prawie 13% większe straty w klatce wirnika niż silnik 3-fazowy zasilany z sieci. Straty w rdzeniu silnika 2-fazowego przy zasilaniu z sieci były o ponad 5% mniejsze, niż silnika 3-fazowego. Przy zasilaniu z sieci suma strat w rdzeniu, uzwojeniu stojana i wirnika oraz strat mechanicznych była o blisko 17% większa w silniku 2-fazowym niż w silniku 3-fazowym.

Silnik 2-fazowy przy zasilaniu z falownika i obciążeniu znamionowym miał o około 26% większe straty w uzwojeniu stojana oraz o blisko 2% mniejsze straty w klatce wirnika niż silnik 3-fazowy zasilany z falownika. Straty w rdzeniu silnika 2-fazowego przy zasilaniu z falownika były o ponad 74% większe niż silnika 3-fazowego. Przy zasilaniu z falownika suma strat w rdzeniu, uzwojeniu stojana i wirnika

oraz strat mechanicznych była o około 26% większa w silniku 2-fazowym niż w silniku 3-fazowym.

Straty mechaniczne silnika 2-fazowego były o około 26% większe niż silnika 3-fazowego przy obu rodzajach zasilania. Straty mechaniczne wyznaczono na podstawie badań biegu jałowego silników zasilanych z sieci i wartości tych strat przyjęto do wyznaczania pozostałych strat przy zasilaniu z falowników.

Silnik 2-fazowy miał o ponad 116% większe straty w rdzeniu przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci. Zasilanie falownikowe powoduje w uzwojeniu stojana straty o blisko 2% większe, a straty w uzwojeniu wirnika o prawie 25% mniejsze niż zasilanie z sieci. Suma strat w rdzeniu, uzwojeniu stojana i wirnika oraz strat mechanicznych silnika 2-fazowego była o przeszło 4% większa przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci. Silnik 3-fazowy miał o ponad 17% większe straty w rdzeniu przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci. Zasilanie falownikowe powoduje w uzwojeniu stojana straty o blisko 4% mniejsze, a straty w uzwojeniu wirnika o około 14% mniejsze niż zasilanie z sieci. Suma strat w rdzeniu, uzwojeniu stojana i wirnika oraz strat mechanicznych silnika 3-fazowego była o ponad 3% mniejsza przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci.

4.5. Drgania

Silnik 3-fazowy zasilany z sieci ma średnio o 56% mniejsze drgania, a zasilany z falownika ma średnio o 65% mniejsze drgania niż silnik 2-fazowy przy analogicznym zasilaniu. Natomiast przy zasilaniu z sieci silnik 2-fazowy ma średnio o 39% mniejsze drgania, a silnik 3-fazowy ma średnio o 45% mniejsze drgania niż przy zasilaniu z falownika. Jako wartość średnią drgań przyjęto sumę drgań zmierzonych w trzech kierunkach: wzdłuż osi wału, w płaszczyźnie promieniowej pionowej oraz poziomej, podzieloną przez ilość punktów pomiarowych.

4.6. Hałas

Badania akustyczne silników wykazały, że przy zasilaniu z falownika silnik 2-fazowy emituje o około 7% większy poziom dźwięku niż silnik 3-fazowy. Natomiast silnik 3-fazowy zasilany z falownika emituje o około 0,15% mniejszy poziom dźwięku niż przy zasilaniu z sieci. Tak

niewielka różnica mieści się w granicach błędu pomiaru.

4.7. Koszty

Zakup oraz uzwojenie rdzenia silnika 2-fazowego jest o ponad 11% tańsze niż silnika 3-fazowy. Różnica kosztu wynika z ceny drutu nawojowego potrzebnego do wykonania uzwojeń. Koszt uzwojenia silnika 2-fazowego jest o przeszło 25% mniejszy niż koszt uzwojenia silnika 3-fazowego.

Napęd 2-fazowy jest droższy od 3-fazowego o ponad 48%.

Trzeba zaznaczyć że falownik 3-fazowy jest wykonany w wielkoseryjnej produkcji, natomiast falownik 2-fazowy został wykonany jednostkowo na potrzeby badań. Ponadto falownik 2-fazowy ma ponad 3,5-krotnie większą moc od falownika 3-fazowego.

5. Podsumowanie

Z próby nagrzewania wynika, że przy obciążeniu tą samą mocą silnik 2-fazowy nagrzewa się bardziej niż silnik 3-fazowy zarówno przy zasilaniu z sieci jak i z falownika.

Falownik 2-fazowy ma nieco większą sprawność od falownika 3-fazowego, ale silnik 2-fazowy ma znacznie mniejszą sprawność od silnika 3-fazowego. Badania napędów (falownik + silnik) przy obciążeniu wykazały mniejszą sprawność napędu 2-fazowego niż napędu 3-fazowego.

Straty w rdzeniu obydwu silników są większe przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci. Natomiast silnik 2-fazowy w porównaniu do silnika 3-fazowego ma mniejsze straty w rdzeniu przy zasilaniu z sieci, a większe przy zasilaniu z falownika.

Straty w uzwojeniu stojana silnika 2-fazowego są większe niż silnika 3-fazowego zarówno przy zasilaniu z sieci jak i z falownika, zaś straty w klatce wirnika silnika 2-fazowego są przy zasilaniu z sieci większe, a przy zasilaniu z falownika mniejsze niż silnika 3-fazowego.

Straty w uzwojeniu stojana silnik 2-fazowy ma większe, a silnik 3-fazowy mniejsze przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci, zaś straty w klatce wirnika obydwu silniki mają mniejsze przy zasilaniu z falownika niż przy zasilaniu z sieci.

Silnik 3-fazowy ma ponad dwukrotnie mniejsze drgania niż silnik 2-fazowy zarówno przy zasilaniu z sieci jak i z falownika. Natomiast obydwie silniki przy zasilaniu z sieci mają znacznie

mniejsze drgania niż przy zasilaniu z falownika. Ponadto silnik 2-fazowy emituje nieco większy hałas niż silnik 3-fazowy.

Wykonanie charakterystyk biegu jałowego silników zasilanych z falownika nie było możliwe ze względu na stały stosunek napięcia do częstotliwości falownika $U/f = \text{const}$, dlatego wyznaczono jedynie punkt pracy przy napięciu znamionowym falownika.

Moc oddawaną na wale silnika określano na podstawie pomiaru jego momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej przy napięciu znamionowym wg zależności:

$$P_2 = \frac{Mn}{9,55} \quad (1)$$

M – moment obrotowy na wale silnika
n – prędkość obrotowa

Badane silniki miały różną wartość współczynnika uzwojenia k_f : silnik 2-fazowy $k_f = 0,903$ zaś silnik 3-fazowy $k_f = 0,958$. Mniejszy (około 6%) współczynnik uzwojenia 2-fazowego powoduje indukowanie niższego napięcia w tym uzwojeniu, więc do osiągnięcia mocy znamionowej (1,5kW) silnik potrzebuje większego prądu w uzwojeniu. Oznacza to, że straty w uzwojeniu będą także większe, ponieważ zmieniają się z wraz z drugą potęgą prądu.

Porównując poszczególne składniki strat w silnikach trzeba zaznaczyć, że falownik generuje zupełnie inne parametry zasilania niż sieć. Napięcie sieci jest sinusoidalne, zaś falownik wytwarza prostokątne impulsy napięcia o takim wypełnieniu, aby prąd w uzwojeniu silnika miał kształt zbliżony do sinusoidalnego. Z tego powodu straty w silniku zasilanym z falownika są wywoływane wieloma przebiegami harmonicznymi pola magnetycznego wzbudzanego odkształconymi przebiegami napięcia i prądu. Wyznaczenie tych strat jest kłopotliwe ze względu na możliwości pomiaru wartości skutecznej przebiegów odkształconych generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne. W obwodzie pośredniczącym falownika napięcie jest prostowane i filtrowane przez kondensator o dużej pojemności, dlatego napięcie skuteczne na wyjściu falownika jest wyższe niż napięcie sieci. Wynikiem podwyższonego napięcia zasilania mogła być wyższa sprawność silników zasilanych z falownika.

Drgania występujące w silnikach pochodzą w większości od czynników mechanicznych takich jak niedokładne wyważenie lub niecen-

tryczność wirnika, itp. Są to drgania niskiej częstotliwości. Natomiast wyższe harmoniczne pola magnetycznego wywołują w silniku wibracje znacznie większej częstotliwości niż podstawowa harmoniczna pola magnetycznego. Te wibracje ujawniają się bardziej w postaci hałasu niż drgań silnika. Hałas wytwarzany przez silnik 3-fazowy zasilany z sieci przy biegu jałowym jest bardzo zbliżony do hałasu rejestrowanego przy zasilaniu z falownika.

Wyznaczanie momentu obrotowego silników w zależności od częstotliwości zasilania jest kłopotliwe, ponieważ moment obrotowy znacząco zależy od temperatury silnika. W czasie wykonywania pomiaru uzwojenia stojana i wirnika nagrzewają się, powodując zmianę rezystancji prętów klatki, a więc także poślizgu silnika i momentu obrotowego. Zjawisko to jest bardziej intensywne przy częstotliwościach mniejszych od 50Hz, ponieważ pogarszają się warunki chłodzenia silnika. Wyznaczenie charakterystyk momentu obrotowego przy założeniu stałej pracy silnika z częstotliwością mniejszą niż 50Hz, wymagałoby wykonania próby nagrzewania silnika pracującego ze stałym momentem i częstotliwością. Po nagraniu temperatura ustalona silnika nie powinna przekraczać temperatury dopuszczalnej danej klasy izolacji.

6. Literatura

- [1]. Dąbała K.: *Straty dodatkowe we współczesnych silnikach indukcyjnych klatkowych i ich wpływ na sprawność silników*. Prace Instytutu Elektrotechniki, nr 186, 1995, s. 59-71.
- [2]. Dąbrowski M.: *Analiza obwodów magnetycznych. Straty mocy w obwodach*. PWN, Warszawa-Poznań 1981.
- [3]. Mukosiej J., Zapaśnik R.: *Badania cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1964.
- [4]. Pustoła J., Śliwiński T.: *Budowa i działanie silników jednofazowych*. WNT, Warszawa 1964.
- [5]. Śliwiński T., Głowacki A.: *Parametry rozruchowe silników indukcyjnych*. PWN, Warszawa 1982.
- [6]. Śliwiński T.: *Straty mocy w silnikach indukcyjnych. Nowe aspekty i dylematy*. Materiały XXXIX Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Gdańsk-Jurata 2003.