

**Maciej Bogumił**  
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

## PORÓWNANIE NAPĘDÓW Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM DWUFAZOWYM I TRÓJFAZOWYM Z LITYM RDZENIEM WIRNIKA

### COMPARISON OF DRIVES WITH TWO-PHASE AND THREE-PHASE INDUCTION MOTORS WITH SOLID ROTOR CORE

**Abstract:** The article presents researches results of one-phase drivers equipped with two- and three-phase induction cage motors with solid rotor core. The motors have been constructed on the base of typical three-phase induction cage motor with two-poles and shaft height 90 mm.

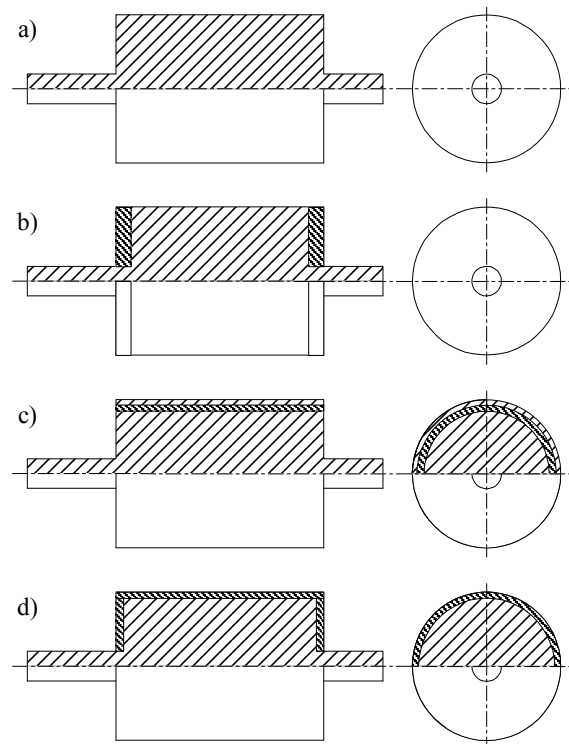
Typical sliced core was removed from shaft and replaced with solid core. The solid rotor was tested in two- and three-phase stators of experimental motors powered from electronic inverter.

There are presented comparative researches results of drivers at continuous work with decreased load due to highest temperature growth and torques characteristics at different frequency. All comparisons were preformed for several air gap value.

#### 1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe są najbardziej rozpowszechnionym rodzajem maszyn elektrycznych zarówno w przemyśle, jak i w gospodarstwach domowych. Wynika to z małej awaryjności tych silników, stosunkowo prostej konstrukcji i mało kosztownej eksploatacji. Główne wady tych maszyn to duży prąd rozruchowy oraz pakietowanie rdzenia stojana i wirnika w celu zmniejszenia strat mocy. Zastąpienie pakietowanego rdzenia wirnika wraz z klatką, rdzeniem wykonanym z litej stali eliminuje te wady. Ponadto zastosowanie litego wirnika zwiększa niezawodność, trwałość i wytrzymałość mechaniczną, umożliwia łatwe zmniejszenie poziomu drgań i hałasu oraz polepszenie stabilności pracy w całym zakresie prędkości obrotowej [1].

Silnik z litym wirnikiem w porównaniu do silnika klatkowego o tych samych wymiarach ma mniejszą moc, sprawność, współczynnik mocy oraz większy poślizg i moment bezwładności wirnika [1]. Jest to głównie spowodowane dużą impedancją wirnika oraz znacznie większym oddziaływaniem wyższych harmonicznych niż w silniku klatkowym. W literaturze [1] można spotkać zalecenia, aby wady te częściowo eliminować przez odpowiednią konstrukcję, np.: wykonanie wirnika z materiału ferromagnetycznego o dużej przewodności elektrycznej (stal) lub utworzenia struktury warstwowej. Najprostsze i najczęściej spotykane konstrukcje wirników litych przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Konstrukcje wirników litych

- walec pełny,
- walec z pierścieniami z miedzi;
- walec pokryty na powierzchni przyszczelinowej miedzią, a następnie warstwą stali,
- walec pokryty miedzią na powierzchni przyszczelinowej lub na wszystkich powierzchniach

Odpowiednią strukturę wirnika można zastosować znając rozkład pola elektromagnetycznego w silniku o danej konstrukcji.

Z punktu widzenia przewodności elektrycznej oraz przenikalności magnetycznej materiałów, w silniku występuje środowisko liniowe przewodzące (miedź) i nie przewodzące (powietrze) oraz nieliniowe środowisko przewodzące (stalowy rdzeń wirnika). Rozkład pola elektromagnetycznego w takiej strukturze opisują równania Maxwella [1]:

$$\operatorname{rot}H = J \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div}B = 0 \quad (1.3)$$

ponadto należy uwzględnić zależności materiałowe w postaci równań:

$$B = \mu H \quad (1.4)$$

$$J = \gamma E \quad (1.5)$$

Dla uproszczenia modelu przyjmuje się:

$$\frac{\partial \varepsilon E}{\partial t} = 0 \quad (1.6)$$

$$\operatorname{div}E = 0 \quad (1.7)$$

Dokładna analiza rozkładu pola elektromagnetycznego w przedstawionych strukturach jest dość trudna ze względu na dużą złożoność zależności parametrów materiałowo-polowych.

W tej pracy przedstawiono badania porównawcze napędów z silnikiem dwu- i trójfazowym ze stalowym rdzeniem wirnika, opartych na tej samej konstrukcji bazowej i przy różnej grubości szczeliny powietrznej. Wykorzystanie silników indukcyjnych z litym wirnikiem można upatrywać do pracy wykonawczej przy obracaniu zaworów hydraulicznych, przesuwaniu ciężkich zasuw, itp. tam, gdzie jest konieczny duży moment przy małej prędkości obrotowej, a po chwilowej pracy następuje stygnięcie. Badania służą określeniu, który napęd (2- czy 3-fazowy) lepiej spełnia wymagania stawiane silnikom wykonawczym w omawianym trybie pracy i jaki wpływ na parametry silników ma grubość szczeliny powietrznej.

## 2. Badania silników

Badania przeprowadzono na dwóch silnikach indukcyjnych z litym rdzeniem wirnika, wzniosie wału 90 mm i jednej parze biegunów. Jeden z silników miał uzwojenie stojana dwufazowe symetryczne na napięcie fazowe  $U_f = 230$  V, zaś drugi silnik miał uzwojenie trójfazowe na napięcie przewodowe  $U_p = 230$  V, przy skoja-

zeniu uzwojenia w gwiazdę. Konstrukcja maszyn opierała się na typowym silniku indukcyjnym klatkowym Sh90S-2 o mocy 1500 W i trójfazowym zasilaniu. Średnica wewnętrzna rdzenia stojana wynosiła  $\varnothing = 69$  mm.

W silnikach eksperymentalnych pakiet blach wirnika wraz z klatką zastąpiono litym rdzeniem metalowym o tej samej długości. Średnicę rdzenia zmieniano przez obróbkę skrawaniem. Wykonano jeden wirnik, który współpracował z jednym lub drugim stojanem. Takie rozwiązanie zapewniało jednakową szczelinę powietrzną w obu stojanach (tab.2.1).

Tabela. 2.1.

Średnica rdzenia badanych wirników oraz grubości szczeliny powietrznej

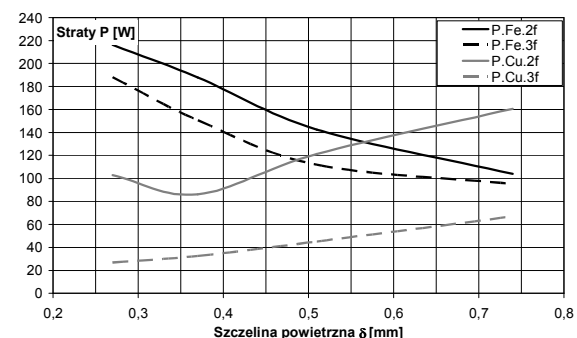
średnica zewnętrzna rdzenia wirnika [mm]	68,46	68,26	67,98	67,52
grubość szczeliny powietrznej [mm]	0,27	0,37	0,51	0,74

Silniki zasilano odpowiednio z falownika dwufazowego lub trójfazowego, zaś falownik był zasilany z sieci jednofazowej  $U_f = 230$  V. Zastosowanie przekształtników elektronicznych zasilanych jednofazowo znacznie upraszcza obsługę napędów i umożliwia ich stosowanie przy braku sieci trójfazowej. Program badań obejmował próbę biegu jałowego, obciążenia oraz charakterystyki nagrzewania i momentów obrotowych przy różnych częstotliwościach. Wszystkie pomiary wykonano przy kilku grubościach szczeliny powietrznej.

## 3. Wyniki badań

### 3.1. Bieg jałowy

Podczas próby biegu jałowego silnik 2-fazowy pobierał z falownika większy prąd, ale mniejszą moc niż silnik 3-fazowy (rys.3.1). Wynika to głównie z różnych współczynników mocy.

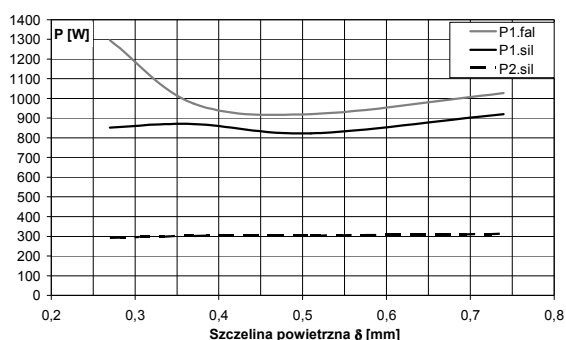


Rys. 3.1. Straty mocy w rdzeniu  $P_{Fe}$  i w uzwojeniu stojana  $P_{Cu}$  w zależności od grubości szczeliny powietrznej

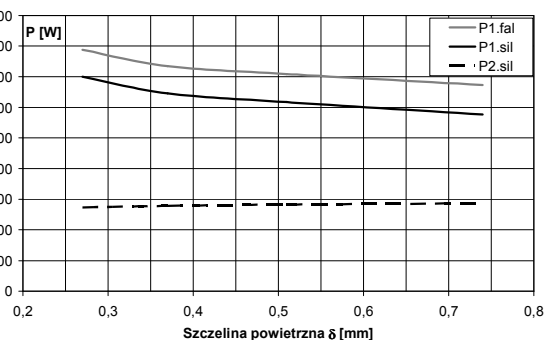
W obu silnikach prąd w uzwojeniu stojana narastał wraz ze wzrostem szczeliny powietrznej. Podobnie zachowywały się straty w uzwojeniu stojana. Natomiast straty w rdzeniu były większe w silniku 2-fazowym ale zmniejszały się wraz ze wzrostem szczeliny powietrznej.

### 3.2. Obciążenie

W stanie obciążenia napęd 2-fazowy pobierał większą moc niż 3-fazowy. Najmniejszą moc napęd 2-fazowy pobierał przy szczelinie powietrznej około 0,5 mm (rys.3.2), zaś moc pobierana przez napęd 3-fazowy zmniejszała się wraz ze wzrostem grubości szczeliny powietrznej (rys.3.3).

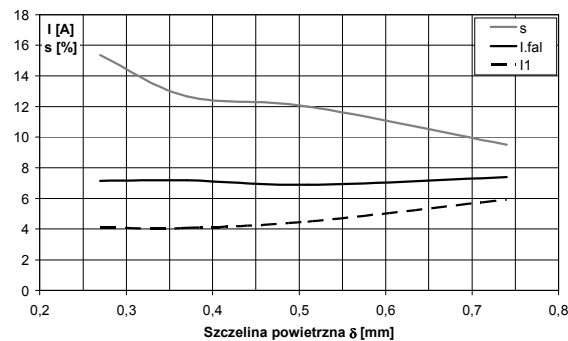


Rys. 3.2. Moc falownika i silnika 2-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej  
 $P_{1,fal}$  – moc pobierana przez falownik z sieci  
 $P_{1,sil}$  – moc pobierana przez silnik z falownika  
 $P_{2,sil}$  – moc mechaniczna na wale silnika



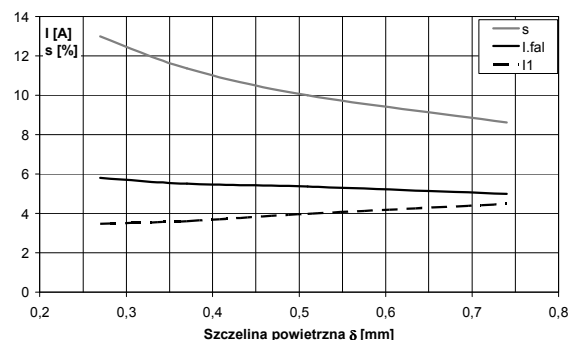
Rys. 3.3. Moc falownika i silnika 3-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej

Napęd 2-fazowy miał większy poślizg oraz pobierał z sieci większy prąd niż napęd 3-fazowy (rys.3.4 – 3.5). W obu napędach przy obciążeniu, wraz ze wzrostem grubości szczeliny powietrznej prąd zmieniał się w niewielkich granicach (około 0,7 A) zaś poślizg zmniejszał się o 6 pkt. procentowych (2-fazowy) oraz o 4 pkt. procentowe (3-fazowy).



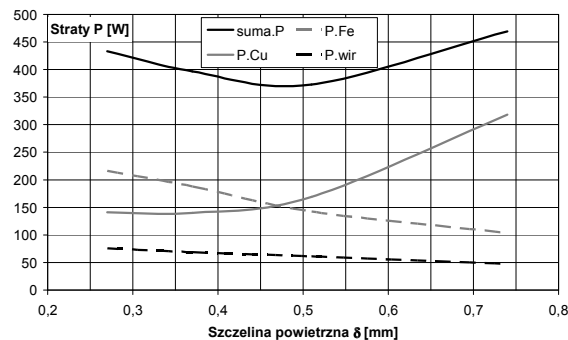
Rys. 3.4. Prąd falownika oraz prąd i poślizg silnika 2-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej

$I_{fal}$  – prąd pobierany przez falownik z sieci  
 $I_1$  – prąd pobierany przez silnik z falownika  
 $s$  – poślizg silnika



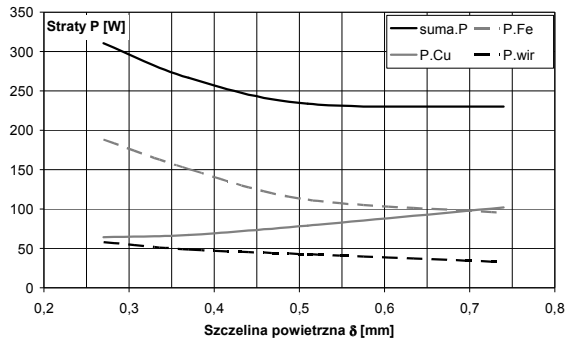
Rys. 3.5. Prąd falownika oraz prąd i poślizg silnika 3-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej

Straty mocy w wirniku silnika 2-fazowego były większe niż w wirniku silnika 3-fazowego i zmniejszały się w obu silnikach wraz ze wzrostem szczeliny powietrznej, podobnie jak straty w rdzeniu stojana (rys.3.6 – 3.7).



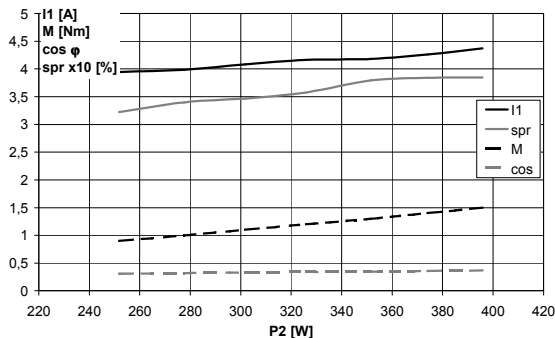
Rys. 3.6. Straty mocy w silniku 2-fazowym w zależności od grubości szczeliny powietrznej  
 $P_{Fe}$  – straty mocy w rdzeniu silnika  
 $P_{Cu}$  – straty mocy w uzwojeniu stojana  
 $P_{wir}$  – straty mocy w wirniku  
 suma  $P$  – suma strat mocy:  $P_{Fe} + P_{Cu} + P_{wir}$

Straty w uzwojeniu stojana silnika 2-fazowego były większe, niż w uzwojeniu silnika 3-fazowego i rosły wraz z grubością szczeliny powietrznej. Suma strat w żelazie, rdzeniu stojana i w wirniku silnika 2-fazowego była większa niż silnika 3-fazowego. Minimalną wartość osiągnęła przy szczelinie powietrznej o grubości 0,5 mm.



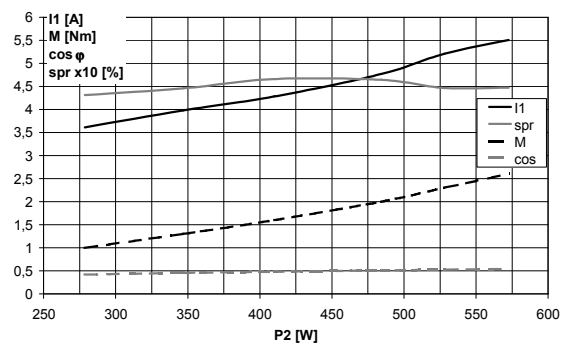
Rys. 3.7. Straty mocy w silniku 3-fazowym w zależności od grubości szczeliny powietrznej

Obydwa silniki obciążone momentem 2,5 Nm osiągnęły dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia stojana zaledwie w kilka minut. Z tego powodu próby obciążenia wykonano przy momencie obrotowym w zakresie 0,9-1,5 Nm napęd 2-fazowy (rys.3.8) oraz 1-2, 6 Nm napęd 3-fazowy (rys.3.9) tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana. Napęd 3-fazowy można było obciążyć bardziej niż napęd 2-fazowy, który przy obciążeniu powyżej 1,5 Nm utykał.



Rys. 3.8. Charakterystyki obciążenia silnika 2-fazowego  $I_1$  – prąd silnika;  $spr$  – sprawność silnika

Współczynniki mocy obu napędów miały zbliżone wartości oraz minimum przy szczelinie powietrznej o grubości 0,45 mm. Sprawność napędu 2-fazowego była mniejsza niż 3-fazowego i osiągnęła maksimum przy szczelinie powietrznej o grubości 0,5 mm.



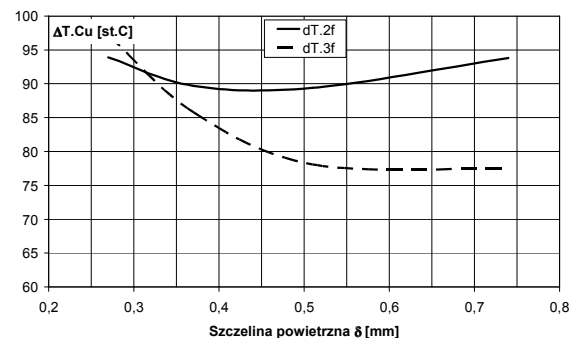
Rys. 3.9. Charakterystyki obciążenia silnika 3-fazowego

Sprawności obu napędów w głównej mierze zależały od sprawności silników (rys.3.8 –3.9). Sprawność falownika 2-fazowego wynosiła 88,6 %, zaś 3-fazowego 88 %.

### 3.3. Nagrzewanie

Ze względu na wytrzymałość termiczną izolacji uzwojenia stojana charakterystyka nagrzewania silników (rys.3.10) zostały wykonane przy obciążeniu, które pozwala silnikom osiągnąć stan ustalony termicznie poniżej dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojenia klasy izolacji F.

Przyrost temperatury silnika 2-fazowego był większy niż silnika 3-fazowego mimo mniejszego obciążenia napędu 2-fazowego, który w czasie prób obciążano momentem  $M = 1,1$  Nm, zaś silnik 3-fazowy obciążano momentem  $M = 2$  Nm. Takie wartości obciążenia ustalono na podstawie wcześniejszych kilku prób nagrzewania.



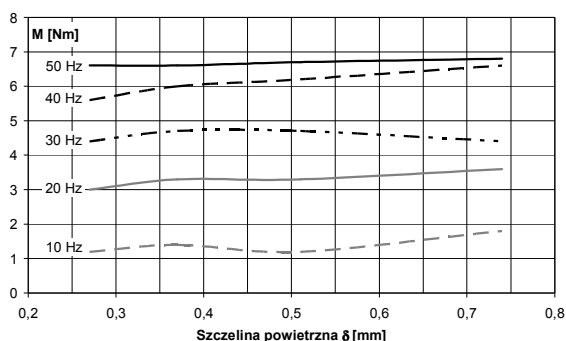
Rys. 3.10. Przyrost temperatury uzwojenia stojana silników w zależności od grubości szczeliny powietrznej

$\Delta T_{2f}$  – przyrost temperatury silnika 2-fazowego  
 $\Delta T_{3f}$  – przyrost temperatury silnika 3-fazowego

### 3.4. Charakterystyki momentów obrotowych

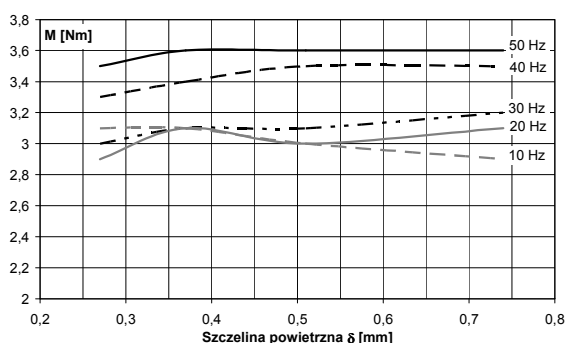
Charakterystyki momentów obrotowych wykonano z dodatkowym kołem stalowym zwiększającym moment bezwładności wirnika. Moment bezwładności wirnika wynosił  $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$  zaś całej masy wirującej wraz ze sprzęgłem  $6,44 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ . Zwiększenie inercji badanego układu było konieczne, aby zmniejszyć szybkość rozruchu i umożliwić zarejestrowanie charakterystyk momentu.

Porównanie dotyczy maksymalnych wartości momentów obrotowych, ponieważ kształty charakterystyk momentu obrotowego znacznie się różnią (rys.3.13 – 3.15).



Rys. 3.11. Moment obrotowy maksymalny silnika 2-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej

W silniku 2-fazowym wraz ze wzrostem szczeliny powietrznej moment obrotowy zwiększał się w granicach 0,2 – 1 Nm w zależności od częstotliwości (rys.3.11), zaś silnik 3-fazowy utrzymywał moment obrotowy zmieniający się w zakresie 0,1 – 0,2 Nm (rys.3.12).

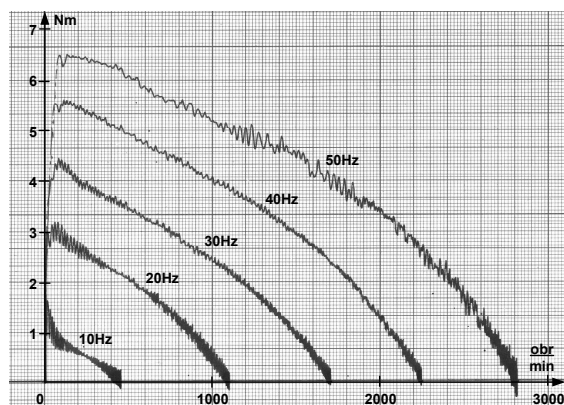


Rys. 3.12. Moment obrotowy maksymalny silnika 3-fazowego w zależności od grubości szczeliny powietrznej

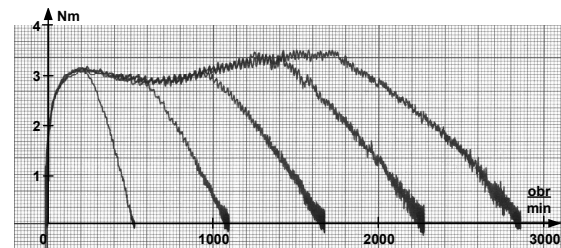
Momenty obrotowe badane przy różnych częstotliwościach (10 ÷ 50 Hz) w silniku 2-fazowym zmieniały się o około 5,6 Nm (w zakresie 1,2 – 6,8 Nm; rys.3.11), zaś w silniku 3-fazo-

wym zmieniały się o około 0,7 Nm (w zakresie 2,9 – 3,6 Nm; rys.3.12). Mogło to wynikać to ze sposobu sterowania falowników. Silnik 2-fazowy miał większy moment maksymalny, niż silnik 3-fazowy przy częstotliwości zasilania powyżej 20 Hz. Przy niższych częstotliwościach większy moment rozwijał silnik 3-fazowy.

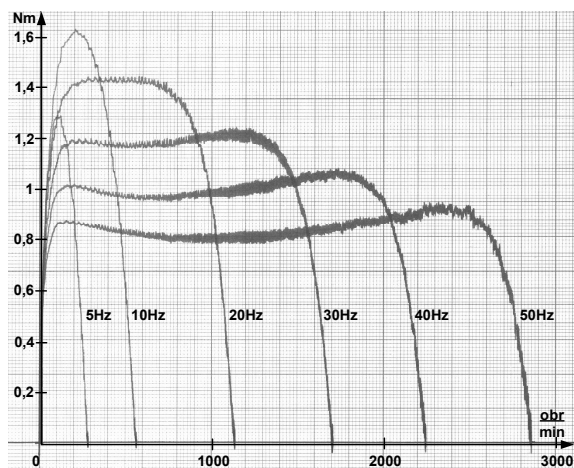
Przy wyznaczaniu charakterystyki momentu obrotowego silnika nie było możliwości zarejestrowania momentu początkowego. Podczas próby rewersu silnika pojawiało się przepięcie w obwodzie pośredniczącym falownika, co skutkowało przeskokiem ładunku elektrycznego między zaciskami kondensatora filtrującego. Przebiegi momentów obrotowych na wale silnika rejestrowano więc od chwili załączenia napięcia z falownika do momentu osiągnięcia pełnej prędkości obrotowej wału silnika. Taki sposób został podyktowany możliwościami technicznymi falowników.



Rys. 3.13. Charakterystyki momentów obrotowych silnika 2-fazowego ze szczeliną powietrzną  $\delta=0,27 \text{ mm}$



Rys. 3.14. Charakterystyki momentów obrotowych silnika 3-fazowego ze szczeliną powietrzną  $\delta=0,27 \text{ mm}$



Rys. 3.15. Charakterystyki momentów obrotowych silnika 2-fazowego ze szczeliną powietrzną  $\delta=0,27$  mm, przy sterowaniu prądowym falownika

Zmiana sterowania falownika 2-fazowego w taki sposób, aby utrzymywał prąd na stałym poziomie (sterowanie prądowe) spowodowała zmianę kształtu charakterystyki momentu (rys.3.15) na bardziej zbliżony do charakterystyki napędu 3-fazowego (rys.3.14) przy tej samej częstotliwości zasilania, ale znacznie zmniejszyła moment początkowy.

#### 4. Podsumowanie

Porównanie badanych silników przy pracy z ciągłym obciążeniem wykazało, że lepsze parametry ma napęd 3-fazowy. Jednak silniki z litym wirnikiem nie powinny pracować w sposób ciągły ze względu na niekorzystne parametry eksploatacyjne: duży poślizg (9-15 %), duże straty (15-31 %  $P_N$ ) oraz małą sprawność (23-43 %). Takie parametry są wynikiem przeprowadzonych badań.

Napęd 2-fazowy miał taki kształt charakterystyki momentu obrotowego, że największe wartości momentu występowały przy bardzo małej prędkości obrotowej rzędu 150 obr/min (rys.3.13). Natomiast napęd 3-fazowy kształtował charakterystykę momentu obrotowego zmieniającą się nieznacznie (2,9-3,4 Nm) w zakresie prędkości obrotowej od zera do około 2/3 prędkości znamionowej, a przy większych prędkościach szybko opadającą (rys.3.14). Maksymalny moment silnika 3-fazowego jest znacznie mniejszy niż silnika 2-fazowego. Przy prędkości obrotowej około 150 obr/min ( $s=95\%$ ) silnik 2-fazowy ma moment ponad 2-krotnie większy od silnika 3-fazowego.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń przy pomiarach momentów obrotowych można przyjąć, że stosunek momentu rozruchowego napędu 2-fazowego do 3-fazowego będzie kształtował się podobnie jak stosunek zarejestrowanych momentów  $M_{2f}/M_{3f}=2,2$ , przy małej prędkości obrotowej (150 obr/min).

Badania silników zasilanych z przekształtników energoelektronicznych są ograniczone możliwościami technicznymi zasilaczy oraz możliwościami aparatury pomiarowej. Falowniki nie umożliwiają regulacji napięcia zasilania silników przy stałej częstotliwości prądu dlatego próby biegu jałowego można wykonać tylko przy znamionowym napięciu zasilania silników, przy częstotliwości 50 Hz. Ten pomiar umożliwia wyznaczenie strat w rdzeniu stojana o ile znane są straty mechaniczne, które trzeba wyznaczać zasilając silnik z regulowanego źródła napięcia przy stałej częstotliwości. Strat mechaniczne wyznaczono zasilając silnik z regulatora indukcyjnego:  $P_{m2f}=110,4$  W,  $P_{m3f}=87,6$  W. Przy małych prędkościach obrotowych silnika chłodzenie jest znacznie zmniejszone, następuje wówczas wzrost temperatury litego wirnika powodując zmianę jego impedancji, a w efekcie zmianę momentu obrotowego oraz poślizgu. Z tego powodu charakterystyki momentu obrotowego silników wykonywano w możliwie krótkim czasie, aby temperatura silnika nie zmieniała się znacząco.

Ze względu na kształty charakterystyk i wartości momentów obrotowych przy dużym poślizgu ( $s=95\%$ ) silnik 2-fazowy znacznie bardziej niż silnik 3-fazowy odpowiada wymaganiom stawianym silnikom wykonawczym pracującym dorywczo z dużym momentem początkowym.

#### 5. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., Gieras J.: *Maszyny indukcyjne o wirniku masywnym*. PWN, Warszawa - Poznań 1977 r.
- [2]. Fleszar J.: *Analiza pracy silnika indukcyjnego z masywnym wirnikiem*, Z. N. Politechniki Świętokrzyskiej Elektryka nr 15, 1986, str. 133-164.
- [3]. Kołodziej J.: *Modelowanie i analiza pracy silnika indukcyjnego z wirnikiem masywnym*. Materiały konferencyjne X International PhD Workshop OWD 2008 r.