

Właściwości eksploatacyjne układów napędowych z nowoczesnymi silnikami asynchronicznymi zintegrowanymi z układem energoelektronicznym

Jacek Przybyłka, Piotr Kuzera

1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe są powszechnie stosowane w przemyśle do napędów wszelkiego rodzaju urządzeń i maszyn. W dobie rozwoju automatycznych układów sterowania i wizualizacji napędów wymagają one do zasilania odpowiednich układów energoelektronicznych, znacząco zwiększających ich możliwości regulacyjne. Układy te mogą być proste, bazujące na regulacji napięcia – softstarty lub zaawansowane, regulujące strumień elektromagnetyczny silnika – przemienniki częstotliwości. Aby zapewnić długotrwałą i bezawaryjną pracę napędów zasilanych z układów energoelektronicznych, wymagana jest odpowiednia konstrukcja silnika, a także prawidłowa współpraca i dopasowanie układu zasilania do obwodu elektromagnetycznego silnika. Zintegrowanie silnika z układem energoelektronicznym zapewnia optymalne zestrojenie napędu i od wielu lat stosowane jest w silnikach produkowanych przez DFME DAMEL SA. W artykule przedstawiono właściwości zastosowanych rozwiązań obwodów elektromagnetycznych silników zintegrowanych z układami energoelektronicznymi, zapewniających niezawodność pracy tego typu napędów.

2. Właściwości zastosowanych rozwiązań obwodu elektromagnetycznego silników zasilanych z energoelektronicznych układów napędowych

Porównano wyniki badań silnika zasilanego z układu softstart z silnikiem zasilanym z falownika. Przedstawiono także możliwość pracy w trybie automatycznym z wizualizacją pracy napędu.

2.1. Softstart

W czasie załączania silnika klatkowego bezpośrednio na sieć zasilającą w uzwojeniu stojana płyną prądy rozruchowe o wartości $6-9 \times I_N$. Duży prąd rozruchowy jest niebezpieczny dla silnika nie tylko ze względu na duże siły dynamiczne powstające w uzwojeniu, ale również, a może przede wszystkim, ze względu na skutki cieplne.

Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala w łatwy sposób ograniczyć wartość prądu rozruchowego, zaprogramować czas trwania rozruchu, czas przeciążenia oraz wartość początkowego prądu rozruchowego. Regulacja napięcia zasilania odbywa się przez opóźnienie załączenia tyrystorów w stosunku do punktu naturalnej komutacji. Po zakończeniu rozruchu układ softstartu zostaje zwarty stycznikiem obejściowym, ograniczając straty w modułach tyrystorowych w czasie

Streszczenie: Silniki indukcyjne klatkowe są powszechnie stosowane w przemyśle do napędów wszelkiego rodzaju maszyn i urządzeń. W dobie rozwoju automatycznych układów sterowania i wizualizacji napędów wymagają one do zasilania odpowiednich układów energoelektronicznych, znacząco zwiększających ich możliwości regulacyjne. W artykule przedstawiono wymagania stawiane silnikom zintegrowanym z układami energoelektronicznymi w oparciu o wyniki badań silnika zasilanego z softstartu w porównaniu z zasilaniem falownikowym. Zaprezentowano także możliwości pracy silników w trybie automatycznym z wizualizacją pracy napędów.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, przemiennik częstotliwości, softstart, nagrzewanie wirnika

MODERN ASYNCHRONOUS MOTORS INTEGRATED WITH POWER ELECTRONIC DRIVE SYSTEMS – EXPLOITATION PROPERTIES OF APPLIED DRIVE SYSTEMS

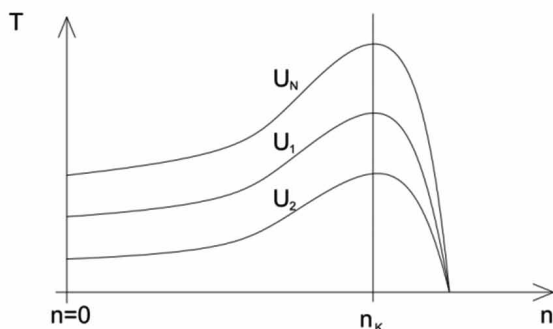
Abstract: Induction cage motors are widely used in industry for drives of all types of equipment and machines. In the era of the development of automatic drive control and visualization systems, they require appropriate power electronic systems to significantly increase their control capabilities. The article presents the requirements for motors integrated with power electronics systems based on the results of tests carried out on a soft-start motor in comparison with inverter power supply. Presented is the possibility of working in automatic mode with the visualization of the drive.

Keywords: electrical machines, frequency inverter, soft-start, rotor heating

pracy silnika. Podczas rozruchu punkt pracy przesuwają się płynnie po kolejnych charakterystykach mechanicznych (rys. 1), gdzie $U_N > U_1 > U_2$.

Obniżenie napięcia zasilania powoduje zmniejszenie momentu krytycznego bez zmiany poślizgu krytycznego. W związku z tym, ze względu na kształtowanie się charakterystyki przebiegu momentu w funkcji obrotów dla silników indukcyjnych (rys. 2), do współpracy z softstartem najbardziej odpowiednie są konstrukcje wirników dwuklatkowych

reklama



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika dla różnych wartości napięcia zasilającego [Źródło: 3]

pozwalające na uzyskiwanie dużych momentów rozruchowych MR (rys. 2 b).

Mimo iż rozruch trwa od kilku do kilkunastu sekund, powoduje powstanie bardzo dużych temperatur w uzwojeniu wirnika klatkowego. Celem dokładnego określenia przyrostów temperatur w czasie rozruchu w DFME DAMEL przeprowadzono badania wirnika silnika zintegrowanego z układem softstartu o mocy 315 kW. Aby uzyskać wysokie momenty rozruchowe przy obniżonym napięciu oraz zapewnić odporność uzwojenia na wysokie temperatury, wirnik wykonano jako spawany, dwuklatkowy, w którym klatka rozruchowa wykonana była z mosiądzu, klatka pracy z miedzi elektrolitycznej, a pierścienie zwierające wykonano z miedzi (rys. 3).

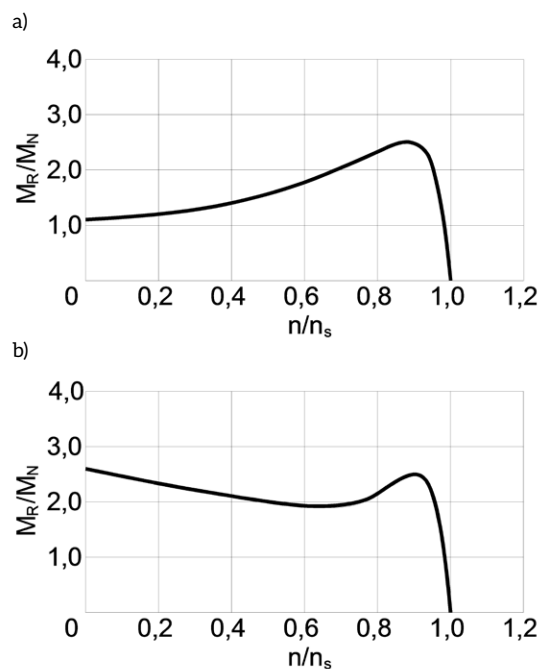
W wirniku zabudowano termopary płaszczowe typu TP-42, charakteryzujące się krótkim czasem odpowiedzi i zakresem pomiarowym od -40 do $+800^{\circ}\text{C}$. Próby wykonywane były przy unieruchomionym wirniku i zasilaniu uzwojenia stojana ze źródła o regulowanym napięciu. Do kontroli temperatury w stojanie zabudowano dodatkowe termopary FeCuNi znajdujące się na czołach uzwojenia (rys. 4).

Próbę zwarcia wykonano przy zasilaniu uzwojenia stojana napięciem znamionowym $U_Y = 1000$ V, co wymusiło przepływ prądu zwarciovego o wartości $I_R = 1300$ A. Wykonano trzy następujące po sobie załączenia. Czasy trwania zwarcia to kolejno 10 s, 15 s, 20 s. Jak widać na rys. 5, przy 20-sekundowym zwarciu temperatura uzyskiwana w prętach wirnika przekracza 550°C , co według [1] stanowi już temperaturę graniczną dla prętów klatki wirnika.

Przebieg „TCP” przedstawia temperaturę z zabudowanej na czołach uzwojenia termopary, jak widać, różnica pomiędzy temperaturą uzwojenia a wirnika jest bardzo duża, co za tym idzie – stosując klasyczne obwody czujników ochrony termicznej zabudowane w uzwojeniu stojana, nie można ochronić klatki wirnika przed uszkodzeniami powodowanymi prądami rozruchowymi.

Na rys. 6 przedstawiono przebieg stromości narastania temperatury w prętach wirnika. Wynosi ona około 25 stopni/sekundę, przy prądzie płynącym przez uzwojenie stojana równym 1300 A.

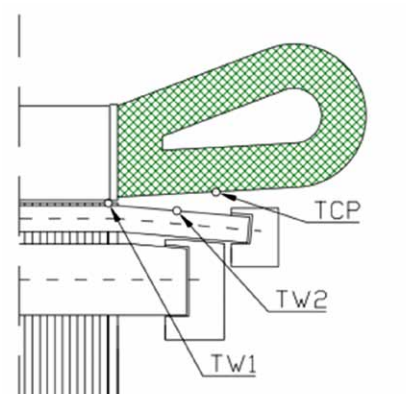
Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala ograniczyć wartość prądu płynącego w uzwojeniu, a co za tym



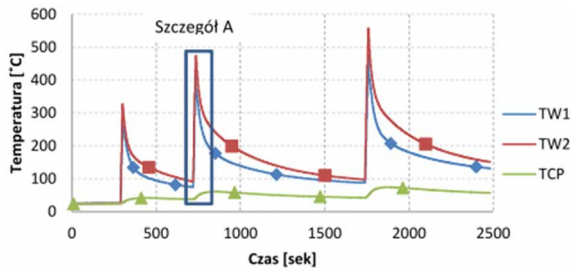
Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego z wirnikiem jednoklatkowym (a) i dwuklatkowym (b)



Rys. 3. Widok wirnika do prób zwarciovych [Źródło: opracowanie własne]

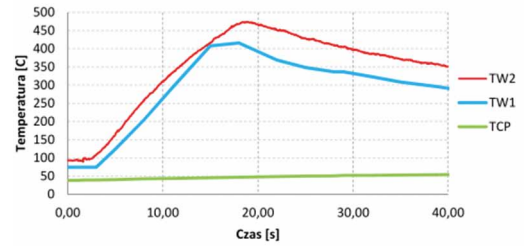


Rys. 4. Rozmieszczenie termopar na wirniku i stojanie [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 5. Przebieg nagrzewania wirnika

[Źródło: opracowanie własne]



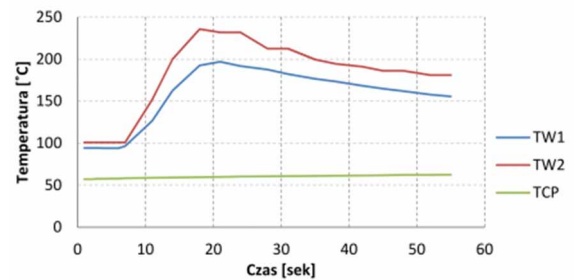
Rys. 6. Szczegół A z rysunku 5, stromość narastania temperatury w wirniku

[Źródło: opracowanie własne]

idzie – ograniczyć przyrost temperatury w wirniku. Przeprowadzono symulację przy zasilaniu silnika napięciem odpowiadającym przepływowi prądu o wartości 3,5 In. W tym przypadku przyrost temperatury w prętach wirnika był niemal o połowę wolniejszy i wynosił około 13 stopni/sekundę (rys. 7).

2.2. Przebieg częstotliwości

Olbrzymia większość falowników niskiego napięcia ma topologię falowników z napięciowym obwodem pośredniczącym z napięciem wyjściowym z modulacją PWM. Stosowane są w nich częstotliwości kluczkowania impulsów zawierające się

Rys. 7. Stromość narastania temperatury w wirniku, przy prądzie $I = 3,5 I_n$

[Źródło: opracowanie własne]

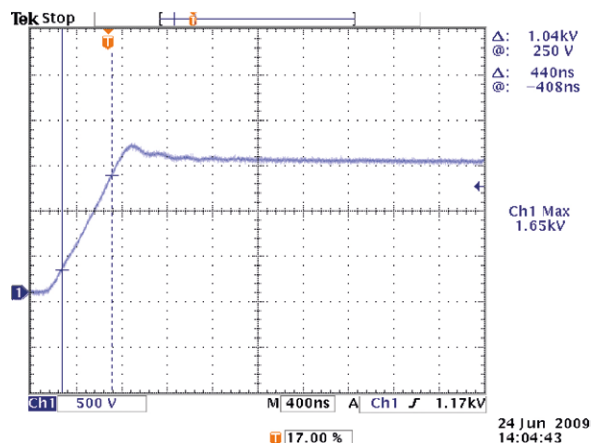
w zakresie pomiędzy 0,8–16 kHz, co powoduje, że na zaciskach silnika pojawiają się piki napięcia o dużej stromości narastania napięcia w impulsie. Wielkość U_{peak} na zaciskach silnika zależna jest od wartości napięcia zasilania, wartości napięcia w obwodzie DC, a także od długości kabli zasilających silnik. Trzeba mieć na uwadze, że sama klasa termiczna nie gwarantuje wysokiej odporność izolacji uzwojenia na stromości narastania napięcia występujące podczas zasilania silnika napięciem odkształconym z modulacją PWM. W celu zabezpieczenia silników przed uszkodzeniem izolacji uzwojenia spowodowanym dużymi wartościami du/dt , a także U_{peak} zaleca się stosowanie specjalnych filtrów ograniczających niepożądane zjawiska. W przeciwnym wypadku należy stosować uzwojenia o wzmocnionej wytrzymałości izolacji. Występowanie harmonicznych napięcia i prądu wyjściowego falownika wpływa również na sprawność całego układu, która kształtuje się na poziomie przedstawionym w tabeli poniżej. Tabela pokazuje straty względne dla systemu silnik – przemiennik, dla których wartości 100% są odniesione do wartości strat silnika przy zasilaniu bezpośrednio z sieci, oraz dla wartości strat przemiennika bez filtrów wyjściowych [2].

Jak widać z tabeli 1, stosowanie wyjściowych filtrów, pomimo poprawy kształtu prądu płynącego w uzwojeniu, obniża sprawność całego układu silnik + falownik. Tak więc stosowanie silnika z wzmocnioną izolacją, dostosowaną do występujących narażeń napięciowych, oraz przemiennika częstotliwości bez filtrów wyjściowych jest uzasadnione, gdyż jest to układ o najwyższej sprawności. Tego typu rozwiązanie stosowane jest od wielu już lat w silnikach zintegrowanych z falownikami produkowanymi przez DFME DAMEL SA. W przypadku silników zintegrowanych we wspólnej obudowie z falownikiem można odpowiednio dopasować parametry falownika i silnika pod kątem uzyskiwanych wysokich parametrów elektromechanicznych oraz odpowiednich, bezpiecznych wartości i przebiegów napięcia zasilającego silnik. Jak wynika z powyższej tabeli, tego rodzaju rozwiązanie ma najwyższą sprawność całego układu silnik + falownik. W silnikach zintegrowanych z falownikiem produkowanych przez DFME DAMEL SA zoptymalizowano parametry napięć i prądów wyjściowych z przemiennika pod kątem obniżenia napięć U_{peak} oraz du/dt do wartości bezpiecznych dla uzwojenia, a dodatkowo zastosowano odpowiednio dopasowany układ izolacyjny, pozwalający na długotrwałą bezawaryjną pracę silników. Przykładowy przebieg napięcia na uzwojeniu silnika zintegrowanego z falownikiem o mocy 500 kW na napięcie 1000 V przedstawiono na rysunku 8.

Mając na uwadze kształtowanie się charakterystyki mechanicznej silnika z wirnikiem jedno- i dwukłatkowym, przedstawione na rysunku 2, oraz możliwość jednoczesnej zmiany napięcia i częstotliwości przez falownik, możemy w każdym punkcie charakterystyki silnika $T = f(n)$ pracować w pobliżu momentu krytycznego, który w silnikach z wirnikiem jednokłatkowym jest najwyższy. Z tego względu do współpracy z przemiennikiem częstotliwości najbardziej odpowiednie są konstrukcje wirników jednokłatkowych o dużym momencie krytycznym. Poglądowy przebieg $T = f(n)$ przy zmiennej częstotliwości i napięciu przedstawiono na rysunku 9.

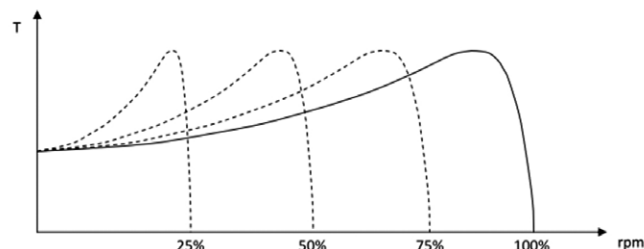
Tabela 1. Straty względne silnik + falownik

	Straty przemiennika [%]	Straty silnika [%]
Przemiennik bez filtra	100	110
Dławik silnikowy (dławik du/dt)	110	110
Filtr sinusoidalny	115	100



Rys. 8. Przebieg napięcia na uzwojeniu silnika 500 kW, 1000 V.

$U_{peak} = 1,650 \text{ kV}, du/dt = 2,36 \text{ kV}/\mu\text{s}, f = 30 \text{ Hz}$



Rys. 9. Przebieg momentu w funkcji obrotów silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z falownika

3. Możliwości pracy silników zintegrowanych w automatycznych napędach maszyn górniczych z wizualizacją pracy napędów

Dzięki wyposażeniu silnika indukcyjnego w bloki energoelektroniczne nie tylko uzyskuje się możliwość łagodnego rozruchu czy precyzyjnej regulacji prędkości obrotowej, ale otrzymuje się dostęp do zaawansowanych funkcji regulacyjnych stosowanych w automatycznym sterowaniu odstawą urobku. Układy elektroniczne zabudowane w silniku umożliwiają zbieranie i przetwarzanie wielu informacji na temat pracy napędu, które następnie mogą być przesyłane do jednostek nadrzędnych realizujących funkcje automatyzacji i wizualizacji (rys. 10).



Rys. 10. Widok przykładowego centrum dyspozytorskiego z wizualizacją pracy silników [Źródło: opracowanie własne]

Prosty sterownik, w jaki wyposażony jest silnik z układem łagodnego rozruchu, umożliwia wizualizację jego pracy i udostępnia takie informacje, jak aktualnie pobierany prąd z sieci, temperatura uzwojenia, czas pracy czy informacje o awariach. Bardziej zaawansowane silniki z przemiennikiem częstotliwości pozwalają układowi automatyki sterować prędkością taśmy przenośnika w zależności od wybranego trybu pracy, umożliwiając transport urobku lub jazdę ludzi, odpowiadając między innymi za kolejność załączania napędów, regulację momentu obciążenia na poszczególnych silnikach oraz za utrzymywanie łączności z silnikami i sterownikiem nadrzędnym. Wprowadzenie dodatkowego łącza szeregowego RS485 pozwala na transmisję danych do powierzchniowego zespołu wizualizacyjnego. Dzięki zastosowanej wizualizacji można łatwo odczytać najważniejsze dane dotyczące aktualnego stanu pracy napędów przenośnika, odczytać wartości prądów, prędkości, temperatury, stany awaryjne oraz przyczyny wyłączeń. Takie rozwiązanie umożliwia też niezależną regulację poszczególnych parametrów każdego silnika bezpośrednio z centrum dyspozytorskiego.

Eksploatacja napędów wyposażonych w silniki zintegrowane z układami energoelektronicznymi ma wiele zalet i pozwala wdrażać nowatorskie rozwiązania techniczne. Możliwość regulacji prędkości obrotowej oraz małe wymiary gabarytowe silników pozwalają modernizować istniejące napędy przenośników. Wszystkie te cechy wraz z elastycznością układów sterowania, dostosowanych do potrzeb klientów, znacząco podnoszą walory użytkowe takich napędów. Możliwość zmniejszenia prędkości napędu i dostosowania jej do aktualnych warunków wydobywczych przynosi wymierne efekty w oszczędności energii elektrycznej i zwiększa trwałość układów mechanicznych, co znacznie ogranicza koszty transportu urobku. Przedstawione właściwości i zalety silników zasilanych z przekształtnika częstotliwości doskonale sprawdzają się w rzeczywistych warunkach pracy, gdzie takie silniki pracują od wielu lat, a pozytywne opinie użytkowników potwierdzają, że jest to skuteczne rozwiązanie zapewniające łagodny rozruch, ograniczenie prądów rozruchowych pobieranych z sieci czy regulację prędkości obrotowej.

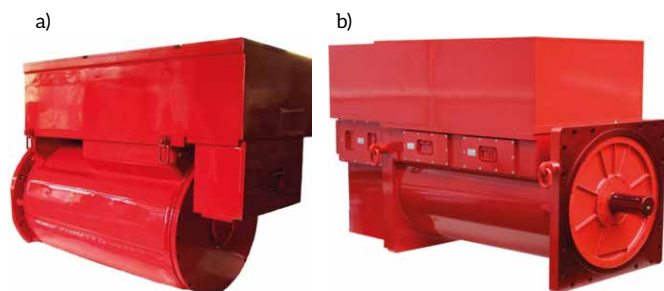
Zastosowanie zaawansowanych mikroprocesorowych systemów sterowania pozwala na zautomatyzowanie aplikacji stosowanych w górniczych zakładach wydobywczych. W połączeniu z komputerową wizualizacją pracy pozwala na utrzymanie prawidłowego stanu technicznego, co wpływa na zapewnienie bezpiecznych warunków pracy i ochronę zdrowia pracowników.

4. Oferta firmy DAMEL w zakresie silników zintegrowanych

Firma DAMEL już od ponad dekady oferuje silniki zintegrowane z układami energoelektronicznymi. Silniki te przystosowane są do pracy w najcięższych warunkach eksploatacyjnych – w podziemiach kopalń. Posiadają one budowę przeciwwybuchową z osłoną ognioszczelną, a w zależności od wymagań, mają wyprowadzone obwody iskrobezpieczne przewodowe lub światłowodowe. Zintegrowanie energoelektronicznych układów sterujących z silnikiem w jednej obudowie pozwala zaoszczędzić miejsce na zabudowę, maksymalnie skrócić i uprościć połączenia pomiędzy blokami mocy a uzwojeniem, sparować i sparometryzować napęd tak, aby uzyskać jak najlepsze parametry eksploatacyjne. Dodatkowo stosowanie układów cyfrowych w silnikach umożliwia automatyzację i wizualizację procesów wydobywczych.

reklama

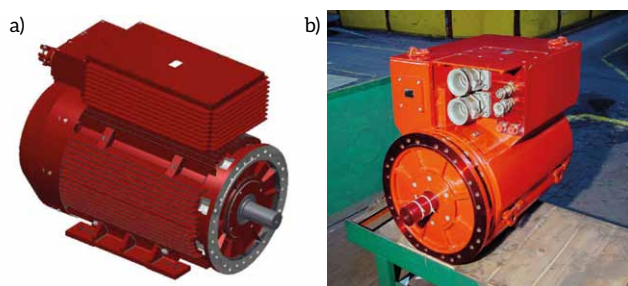
reklama



Rys. 11. Silniki zintegrowane z przekształtnikiem częstotliwości:

a) 500 kW, 1000 V, 1140 V; b) 850 kW, 3300 V

[Źródło: 4]



Rys. 12. Silniki zintegrowane z softstartem:

a) 315 kW, 660/1140 V; b) 200 kW, 1000 V, 1140 V

[Źródło: opracowanie własne]

Szeroka oferta silników zintegrowanych firmy DAMEL obejmuje silniki chłodzone wodą, zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości o mocach od 60 kW do 1250 kW, na napięcia od 500 V do 3300 V zarówno ze zwrotem energii do sieci, jak i bez (rys. 11). Obejmuje też silniki wyposażone w układ łagodnego rozruchu zarówno chłodzone wodą jak i powietrzem, o mocach od 160 kW do 315 kW, na napięcia od 500 V do 1140 V (rys. 12).

5. Podsumowanie i wnioski

Indukcyjne silniki asynchroniczne, zintegrowane z energoelektronicznymi układami zasilania, wykazują wiele zalet w stosunku do silników tradycyjnych zasilanych bezpośrednio z sieci. Jeżeli aplikacja wymaga dużych momentów rozruchowych oraz stałej kontroli i regulacji prędkości obrotowej w czasie pracy to najskuteczniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości. Jeżeli natomiast wymogi aplikacji obejmują tylko ograniczenie prądu początkowego i łagodny rozruch, bez konieczności stałej regulacji prędkości i momentu, to zastosowanie softstartu wydaje się odpowiednim rozwiązaniem, które w porównaniu z falownikiem jest znacznie tańsze. W powyższej tabelce porównano właściwości silników zintegrowanych z softstartem i z przemiennikiem częstotliwości.

Literatura

- [1] BERNATT M., BERNATT J.: *Silnik z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja napędów przenośnikowych zgrzeblowych*. „Maszyny Górnicze”, KOMAG, 84/2000.
- [2] POZOWSKI A., KRAWIEC H.: *Wpływ filtrów wyjściowych napięciowych falowników częstotliwości na pracę silników indukcyjnych*

Tabela 2. Właściwości silników – zestawienie

Właściwości silnika i układów zasilania	Silnik zintegrowany	
	Z układem softstart	Z przemiennikiem częstotliwości
Prosta konstrukcja silnika	+	-
Wbudowane czujniki temperatury	+	+
Łagodny rozruch	+	+
Regulacja czasu rozruchu	+	+
Dopasowanie charakterystyki rozruchowej do rodzaju obciążenia	-	+
Wyrównywanie obciążeń pomiędzy silnikami	-	+
Wizualizacja pracy silnika	+	+
Ciągła praca silnika na dowolnie wybranej prędkości obrotowej	-	+
Dopasowania prędkości do warunków obciążenia silnika	-	+
Znamionowy moment obrotowy od 0 do obrotów synchronicznych	-	+
Ograniczony prąd rozruchowy pobierany z sieci zasilającej	+	+
Jeden układ chłodzenia	+	+
Wspólna obudowa przeciwwybuchowa	+	+
Konieczność stosowania dodatkowych układów zabezpieczenia przewodów łączących silnik z przemiennikiem, softstartem	-	-
Konieczność stosowania specjalnych przewodów do połączenia silnika i przemiennika częstotliwości, softstartu	-	-
Duże koszty kompletnego silnika z układem energoelektronicznym	-	+

klatkowych. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 85/2010.

- [3] KUZERA P., PRZYBYŁKA J.: *Wybrane rozwiązania ograniczania prądów rozruchowych na przykładzie silników elektrycznych produkcji DFME DAMEL*. „Zeszyty Problemowe” KOMEL, 118/2018.
- [4] KUZERA P., PRZYBYŁKA J.: *Automatyzacja pracy górniczych przenośników taśmowych i zgrzeblowych z wykorzystaniem silników zintegrowanych z przemiennikiem częstotliwości produkcji DFME DAMEL SA*. Konferencja KOMTECH 2018.

Jacek Przybyłka, Piotr Kuzera
DAMEL, Dąbrowa Górnicza

artykuł recenzowany