

Jacek Przybyłka, Piotr Kuzera  
DAMEL, Dąbrowa Górnicza

## NOWOCZESNE SILNIKI ASYNCHRONICZNE ZINTEGROWANE Z ENERGOELEKTRONICZNYMI UKŁADAMI NAPĘDOWYMI - WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE ZASTOSOWANYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

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

**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 soft-startu w porównaniu z zasilaniem falownikowym. Zaprezentowano także możliwości pracy silników w trybie automatycznym z wizualizacją pracy napędów.

**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.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, przemiennik częstotliwości, soft-start, nagrzewanie wirnika

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

#### 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 – soft-starty 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 S.A. W artykule

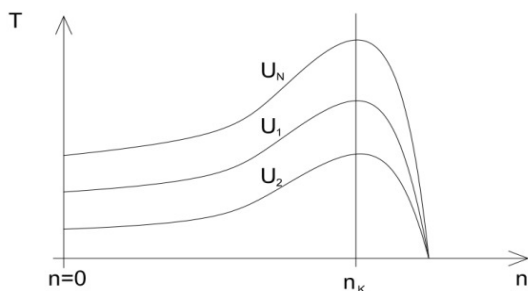
przedstawiono właściwości zastosowanych rozwiązań obwodów elektromagnetycznych silników zintegrowanych z układami energoelektronicznymi zapewniających niezawodność pracy tego typu napędów. Porównano wyniki badań silnika zasilanego z układu soft-start z silnikiem zasilanym z falownika. Przedstawiono także możliwość pracy w trybie automatycznym z wizualizacją pracy napędu.

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

##### 2.1. Soft-start

W czasie załączenia silnika klatkowego bezpośrednio na sieć zasilającą w uzwojeniu stojana płyną prądy rozruchowe o wartości  $6-9xI_N$ . Duży prąd rozruchowy jest niebezpieczny dla silnika nie tylko ze względu na duże siły dynamiczne powstające w uzwojeniu, ale również,

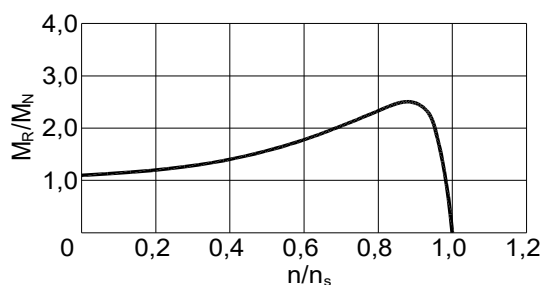
a może przede wszystkim ze względu na skutki cieplne. Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala w łatwy sposób ograniczyć wartość prądu rozruchowego, zaprogramować czas trwania rozruchu, czas przeciążenia oraz wartość początkowego prądu rozruchowego. Regulacja napięcia zasilania odbywa się przez opóźnienie załączenia tyrystorów w stosunku do punktu naturalnej komutacji. Po zakończeniu rozruchu układ soft-startu zostaje zwarty stycznikiem obejściowym, ograniczając straty w modułach tyrystorowych w czasie pracy silnika. Podczas rozruchu punkt pracy przesuwa się płynnie po kolejnych charakterystykach mechanicznych (rys.1), gdzie  $U_N > U_1 > U_2$ .



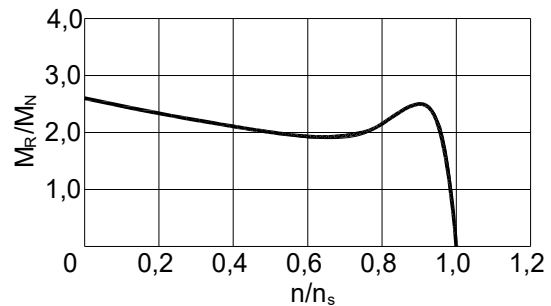
Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika dla różnych wartości napięcia zasilającego [3]

Obniżenie napięcia zasilania powoduje zmniejszenie momentu krytycznego, bez zmiany poślizgu krytycznego. Ze względu na kształtowanie charakterystyki przebiegu momentu w funkcji obrotów dla silników indukcyjnych (rys. 2), do współpracy z soft-startem najbardziej odpowiednie są konstrukcje wirników dwuklatkowych pozwalające na uzyskiwanie dużych momentów rozruchowych  $M_R$  (rys. 2b). 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 soft-startu o mocy 315kW.

a)



b)



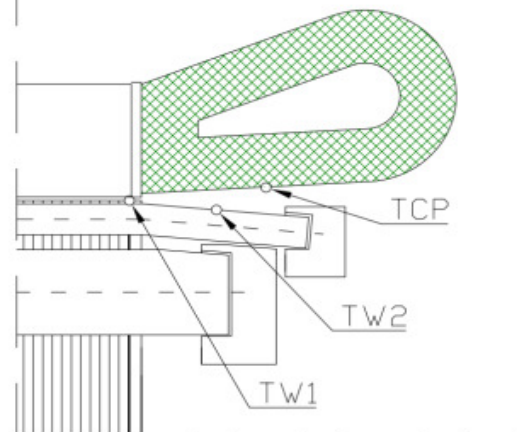
Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego z wirnikiem jednoklatkowym (a) i dwuklatkowym (b)

Aby uzyskać wysokie momenty rozruchowe przy obniżonym napięciu oraz zapewnić odporność uzwojenia na wysokie temperatury wirnik wykonano jako spawany, dwuklatkowy. (rys.3).



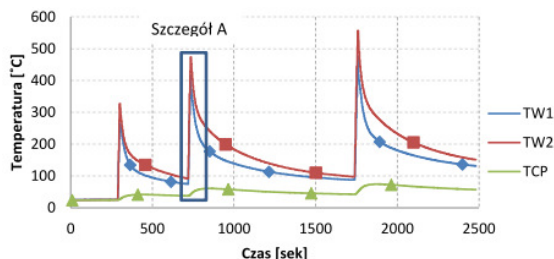
Rys. 3. Widok wirnika do prób zwarciovych [źródło: opracowanie własne]

W wirniku zabudowano termopary płaszczone typu TP-42 charakteryzujące się krótkim czasem odpowiedzi i zakresem pomiarowym  $-40$  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).



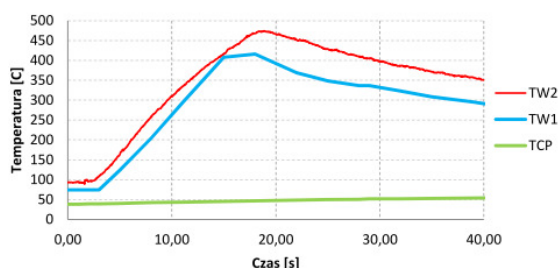
Rys. 4. Rozmieszczenie termopar na wirniku i stojanie [źródło: opracowanie własne]

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



Rys. 5. Przebieg nagrzewania wirnika [źródło: opracowanie własne]

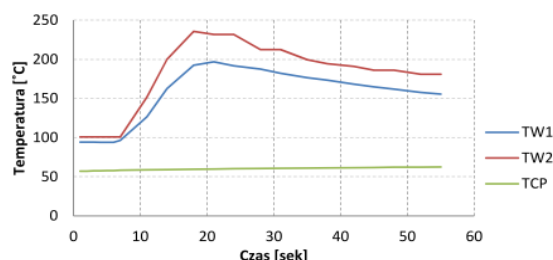
Przebieg „TCP” przedstawia temperaturę z zabudowanej na czołach uzwojenia termopary, jak widać różnica pomiędzy temperaturą uzwojenia a wirnika jest bardzo duża, co za tym idzie stosując klasyczne obwody czujników ochrony termicznej zabudowane w uzwojeniu stojana, nie można ochronić klatki wirnika przed 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 1300A.



Rys. 6. Szczegół A z rysunku 5, stromość narastania temperatury w wirniku [źródło: opracowanie własne]

Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala ograniczyć wartość prądu płynącego w uzwojeniu, a co za tym idzie ograniczyć przyrost temperatury w wirniku. Przeprowadzono symulację przy zasilaniu silnika napięciem odpowiadającym przepływowi prądu

o wartości  $3,5I_N$ . W tym przypadku przyrost temperatury w prętach wirnika był niemal o połowę wolniejszy i wynosił około 13 stopni/sekundę (rys.7).



Rys. 7. Stromość narastania temperatury w wirniku, przy prądzie  $I=3,5I_N$ . [źródło: opracowanie własne]

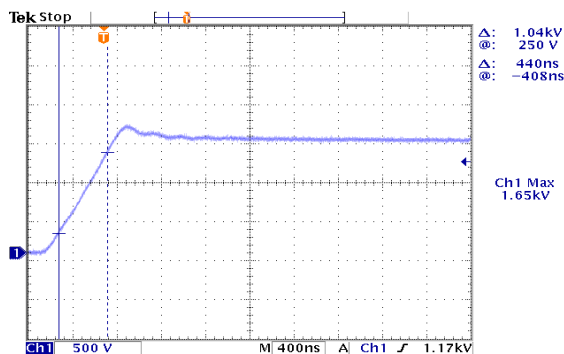
## 2.2. Przemiennek częstotliwości

Olbrzymia większość falowników niskiego napięcia ma topologię falowników z napięciowym obwodem pośredniczącym z napięciem wyjściowym z modulacją PWM. Stosowane są w nich częstotliwości kluczowania impulsów zawierające się 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 odporności 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-przemiennek, dla których wartości 100% są odniesione do wartości strat silnika przy zasilaniu bezpośrednio z sieci, oraz dla wartości strat przemienneka bez filtrów wyjściowych [2]. Jak widać z poniższej tabeli stosowanie wyjściowych filtrów, pomimo poprawy kształtu prądu płynącego w uzwojeniu, obniża sprawność całego układu silnik + falownik.

Tabela.1. Straty względne silnik+falownik

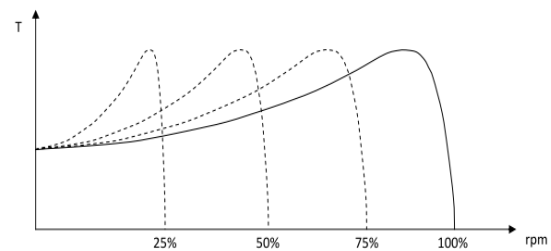
	Straty prze- miennika [%]	Straty sil- nika [%]
Przeмиennik bez filtra	100	110
Dławik silnikowy (dławik du/dt)	110	110
Filtr sinusoidalny	115	100

Tak więc stosowanie silnika z wzmocnioną izolacją, dostosowaną do występujących narażeń napięciowych, oraz przeмиennika 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 S.A. 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 S.A. zoptymalizowano parametry napięć i prądów wyjściowych z przeмиennika pod kątem obniżenia napięć Upeak 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 500kW na napięciu 1000V przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg napięcia na uzwojeniu silnika 500kW, 1000V. Upeak=1,650 kV, du/dt=2,36 kV/μs, f=30Hz

Mając na uwadze kształtowanie się charakterystyki mechanicznej silnika z wirnikiem jedno i dwuklatkowym 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 jednoklatkowym jest najwyższy. Z tego względu do współpracy z przeмиennikiem częstotliwości najbardziej odpowiednie są konstrukcje wirników jednoklatkowych o dużym momencie krytycznym. Poglądowy przebieg  $T=f(n)$  przy zmiennej częstotliwości i napięciu przedstawiono na rys. 9.



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 uzyskuje się nie tylko możliwość łagodnego rozruchu czy precyzyjnej regulacji prędkości obrotowej lub momentu, 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). 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 przeмиennikiem częstotliwości pozwalają układowi automatyki sterować prędkością taśmy przenośnika w zależności od wybranego trybu pracy, umożliwiając transport urobku lub jazdę ludzi, odpowiadają mię-



dzy innymi za kolejność załączania napędów, regulację momentu obciążenia na poszczególnych silnikach oraz za utrzymywanie łączności z silnikami i sterownikiem nadrzędnym. Wyprowadzenie 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.



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

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

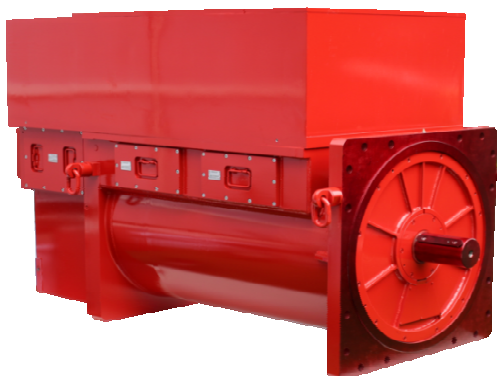
#### 4. Oferta firmy DAMEL w zakresie silników zintegrowanych

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 sparametryzować napęd, tak aby uzyskać jak najlepsze parametry eksploatacyjne. Dodatkowo stosowanie układów cyfrowych w silnikach umożliwia automatyzację i wizualizację procesów wydobywczych. Szeroka oferta silników zintegrowanych firmy DAMEL obejmuje silniki chłodzone wodą zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości o mocach od 60kW do 1250kW na napięcia od 500V do 3300V 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 160kW do 315kW na napięcia od 500V do 1140V (rys. 12).

a)

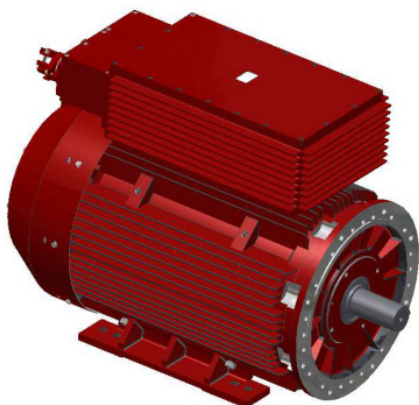


b)

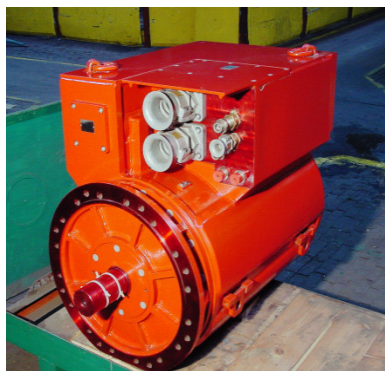


Rys. 11. Silniki zintegrowane z przekształtnikiem częstotliwości: a) 500kW, 1000V, 140V; b) 850kW, 3300V [źródło: 4]

a)



b)



Rys. 12. Silniki zintegrowane z soft-startem: a) 315kW, 660/1140V; b) 200kW, 1000V, 1140V [źródło: opracowanie własne]

## 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 re-

gulacji 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 soft-startu wydaje się odpowiednim rozwiązaniem, które w porównaniu z falownikiem jest znacznie tańsze. W poniższej tabelce porównano właściwości silników zintegrowanych z soft-startem i z przemiennikiem częstotliwości.

Tabela 2. Właściwości silników - zestawienie

Właściwości silnika i układów zasilania	Silnik zintegrowany z układem softstart	Silnik zintegrowany z przemiennikiem częstotliwości
Prosta konstrukcja silnika	+	-
Wbudowane czujniki temperat.	+	+
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	-	+

## Literatura

- [1]. Bernatt M., Bernatt J.: Silnik z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja napędów przenośnikowych zgrzeblowych. *Maszyny Górnicze*, Komag Nr.84, 2000 s.69-73.
- [2]. Pozowski A., Krawiec H.: Wpływ filtrów wyjściowych napięciowych falowników częstotliwości na pracę silników indukcyjnych klatkowych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* – Nr 85/2010.
- [3]. Kuzera P., Przybyłka J.: Wybrane rozwiązania ograniczania prądów rozruchowych na przykładzie silników elektrycznych produkcji DFME DAMEL, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 118, 2018 s.191-198.
- [4]. Kuzera P., Przybyłka J.: Automatyzacja pracy górniczych przenośników taśmowych i zgrzeblowych z wykorzystaniem silników zintegrowanych z przemiennikiem częstotliwości produkcji DFME DAMEL S.A., Konferencja KOMTECH 2018.