

# Wybrane rozwiązania ograniczania prądów rozruchowych na przykładzie silników elektrycznych

Piotr Kuzera, Jacek Przybyłka

## 1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe, ze względu na stosunkowo prostą budowę, relatywnie niską cenę oraz dużą niezawodność, są powszechnie stosowane w górnictwie do napędów wszelkiego rodzaju urządzeń. Aby coraz skuteczniej wydobywać i transportować urobek, dąży się do zwiększania mocy napędów. Im większy silnik, tym sposób jego rozruchu jest trudniejszy, a jego wpływ na sieć zasilającą jest bardziej niekorzystny. Prądy rozruchowe w silnikach klatkowych są duże ( $I_R = 6 \div 9 \times I_N$ ), powoduje to dodatkowy spadek napięcia, który musi być uwzględniony na etapie projektowania całej instalacji elektrycznej. Udarowi prądu silnika towarzyszy również udar momentu, wywołujący niekorzystne stany mechaniczne, narażające napędzane urządzenie na uszkodzenie. Z tego też powodu dąży się do ograniczenia prądów rozruchowych oraz ograniczenia momentu rozruchowego do poziomu wymaganego w danym napędzie.

W artykule omówiono i porównano kilka podstawowych i powszechnie stosowanych sposobów rozruchu silników wraz z ich zaletami i wadami. Wszystkie sposoby omówiono na przykładzie silników produkowanych przez DFME DAMEL SA, która w swojej ofercie ma do zaproponowania szereg rozwiązań obniżających krotność prądu rozruchowego. Niektóre z tych rozwiązań umożliwiają również dowolne nastawianie prądu i momentu uzyskiwanego w czasie rozruchu. Wszystkie opisane silniki przystosowane są do pracy w podziemnych częściach kopalń, w których występują zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Posiadają budowę przeciwybuchową z osłoną ognioszczelną i zaliczone są do urządzeń grupy I kategorii M2 zgodnie z dyrektywą 2014/34/UE. Silniki zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości posiadają dodatkowo wyjścia iskrobezpieczne lub światłowodowe obwodów sterowania.

Większość metod rozruchu silników asynchronicznych klatkowych, ze względu na brak możliwości ingerencji w uzwojenie wirnika, oparta jest na obniżaniu napięcia zasilania, co zgodnie ze wzorem (1) niekorzystnie wpływa na moment osiągnięty przez silnik elektryczny.

$$T = \frac{m_s R_r U_s^2}{2\pi n_1 \left[ s(X_s + X_r) + \frac{R_r^2}{s} \right]} \quad (1)$$

Przy określonym poślizgu ( $s = \text{const}$ ) powyższy wzór można uprościć i zapisać następująco:

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono różne sposoby ograniczania prądów rozruchowych w silnikach indukcyjnych klatkowych. Wszystkie sposoby omówione zostały na przykładzie silników produkowanych przez DFME DAMEL SA. Przedstawiono i porównano kilka podstawowych i powszechnie stosowanych sposobów rozruchu silników klatkowych wraz z ich zaletami i wadami, począwszy od najprostszego rozruchu bezpośredniego, a skończywszy na najbardziej zaawansowanym technologicznie – sterowaniu wektorowym z przemiennika częstotliwości.

## SELECTED SOLUTIONS FOR LIMITING START CURRENTS ON THE EXAMPLE

**Abstract:** Article presents various methods of limiting of start-up currents in induction squirrel-cage motors. All methods were discussed on the example of motors produced by DFME DAMEL SA. Several basic and commonly used methods of start-up of squirrel-cage motors along with their advantages and disadvantages were presented and compared, starting from the simplest direct start-up and concluding with the most technologically advanced – vector control from frequency converter.

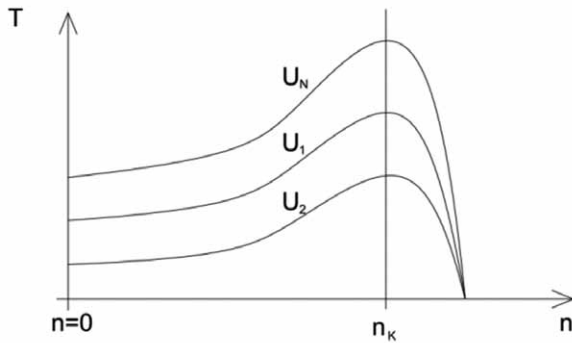
$$T = c \times U_s^2 \quad (2)$$

$c$  – wielkość stała dla danej maszyny.

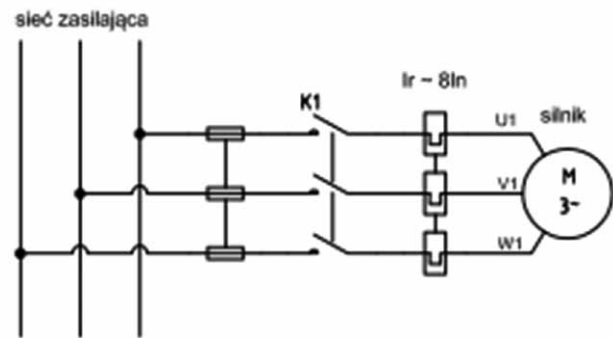
Graficznie powyższą zależność przedstawia rys. 1, gdzie  $U_N > U_1 > U_2$ .

## 2. Sposoby rozruchu silników asynchronicznych

Rozruchem nazywamy stan pracy od chwili załączenia napięcia do osiągnięcia prędkości około znamionowej. Przy omawianiu rozruchu istotne są takie parametry, jak wartość prądu pobieranego z sieci w czasie rozruchu, czyli prąd rozruchowy  $I_R$ , oraz wartość momentu rozwijanego przez silnik w czasie rozruchu, czyli moment rozruchowy  $T_R$ . W praktyce częściej operuje się na krotnościach prądu i momentu rozruchowego, czyli wartościach odniesionych do prądu i momentu znamionowego danego silnika.



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika dla różnych wartości napięcia zasilającego



Rys. 2. Schemat ideowy układu do rozruchu bezpośredniego silnika

W czasie załączenia silnika bezpośrednio na sieć zasilającą prąd rozruchowy odpowiada prądowi zwarcia zgodnie z zależnością (3).

$$I_R = \frac{U_f}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3)$$

Natomiast prąd znamionowy określa wzór (4).

$$I_N = \frac{U_f}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_N}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (4)$$

Z porównania powyższych wzorów wynika, że prąd silnika klatkowego podczas rozruchu jest kilkakrotnie większy od prądu znamionowego. Krotność ta w zależności od silnika wynosi od 6 do 9 wartości prądu znamionowego, co można zapisać następująco (5).

$$\frac{I_R}{I_N} = (6 \div 9) \quad (5)$$

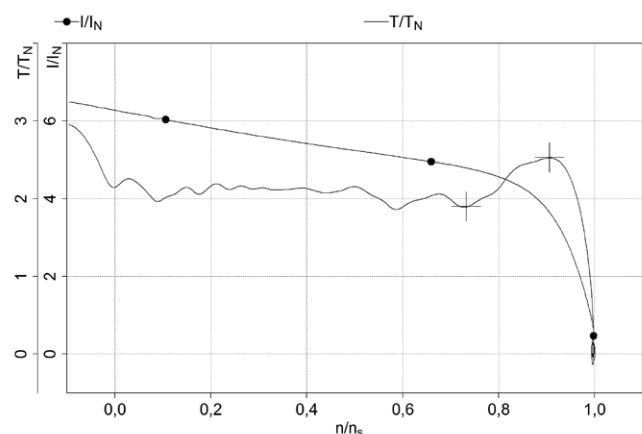
Firma DAMEL, oprócz silników przystosowanych do ciężkich rozruchów posiadających wzmocnioną budowę klatki wirnika, w swojej ofercie posiada też wiele rozwiązań mających na celu ograniczenie prądów rozruchowych, co pokrótce przedstawiono w dalszej części artykułu.

### 2.1. Rozruch bezpośredni

Najprostszą metodą rozruchu silnika indukcyjnego klatkowego jest jego bezpośrednie włączenie na znamionowe napięcie zasilające. Sposób ten, mimo iż najprostszy, charakteryzuje się najbardziej niekorzystnymi warunkami rozruchowymi, takimi jak duży pobór prądu rozruchowego ( $I_R \approx 6 \div 9 I_N$ ), przysiad napięcia sieci oraz duże udary mechaniczne.

Taki sposób rozruchu jest niezalecany dla dużych silników startujących z momentem obciążenia. W takich przypadkach często stosowanym rozwiązaniem są sprzęgła hydrokinetyczne, przenoszące obciążenie z wału silnika dopiero po osiągnięciu przez silnik obrotów około znamionowych.

Poniżej przedstawiono charakterystyki rozruchowe silnika 2SP3 315L-4 (wersja A) 160 kW, 1140 V. W silniku tym prąd rozruchowy wynosi 792 A, co daje krotność  $I_R/I_N = 6,8$ .

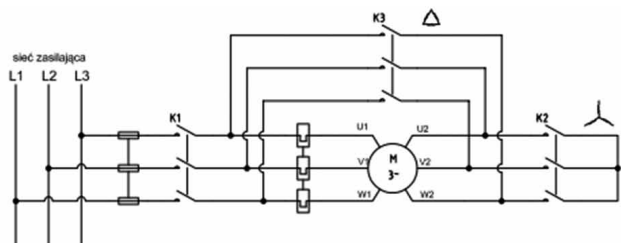


Rys. 3. Przebieg prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP3315L-4 (wersja A)



## 2.2. Rozruch gwiazda – trójkąt

Kolejnym, po rozruchu bezpośrednim, sposobem rozruchu silnika jest rozruch gwiazda – trójkąt. Metoda ta jest stosowana już od dawna i polega na obniżeniu napięcia zasilania stojana podczas rozruchu.



Rys. 4. Schemat ideowy układu do rozruchu gwiazda – trójkąt

Aby można było stosować tę metodę, silnik musi mieć wyprowadzone początki i końce wszystkich faz uzwojenia do skrzynki zaciskowej oraz musi być przeznaczony do pracy przy połączeniu w trójkąt. Przykładem takiego przełączalnego silnika w ofercie firmy DAMEL jest silnik 2SP1 280M-6A o mocy 75 kW (rys. 5), przystosowany do zasilania napięciem 660 V (połączenie w trójkąt) i 1140 V (połączenie w gwiazdę).

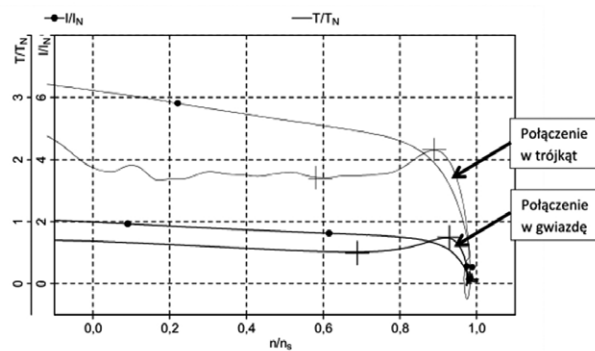


Rys. 5. Widok silnika 2SP1 280M-6A oraz widok wnętrza jego skrzynki zaciskowej

Wadą takiego rozwiązania jest konieczność stosowania dodatkowego osprzętu przełączającego uzwojenie z gwiazdy w trójkąt. Kolejną, bardziej istotną, wadą jest praktycznie trzykrotne obniżenie momentu rozruchowego. W początkowej fazie rozruchu uzwojenia stojana połączone są w gwiazdę. Napięcie fazowe silnika jest wtedy  $\sqrt{3}$  razy mniejsze od znamionowego, a prąd pobierany z sieci jest 3 razy mniejszy niż przy połączeniu w trójkąt. Moment rozwijany przez silnik jest zależny od kwadratu napięcia (1.3), tak więc moment dla połączenia gwiazdowego również jest 3 razy mniejszy niż przy połączeniu w trójkąt. Z tego powodu ten sposób rozruchu stosuje się do tzw. rozruchów lekkich, gdzie początkowy moment obciążenia nie przekracza (0,2–0,4) momentu znamionowego.

Poniżej przedstawiono i porównano przebiegi prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP1 280M-6A o mocy 75 kW. Pomiary wykonano dla połączenia uzwojenia w gwiazdę i w trójkąt przy zasilaniu silnika napięciem  $U_N = 660$  V.

Po przeliczeniu wartości otrzymanych dla połączenia w trójkąt na parametry znamionowe uzyskujemy krotności prądu rozruchowego  $I_R/I_N = 6,26$  i momentu rozruchowego  $T_R/T_N = 2,0$ . Dla połączenia w gwiazdę otrzymane krotności wynoszą odpowiednio  $I_R/I_N = 1,99$ ,  $T_R/T_N = 0,68$ . Otrzymane



Rys. 6. Porównanie krotności prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP1280M-6A przy połączeniu w gwiazdę i w trójkąt

wyniki pokrywają się z wynikami teoretycznymi, a z porównania rozruchu dla gwiazdy i trójkąta uzyskujemy wartości:

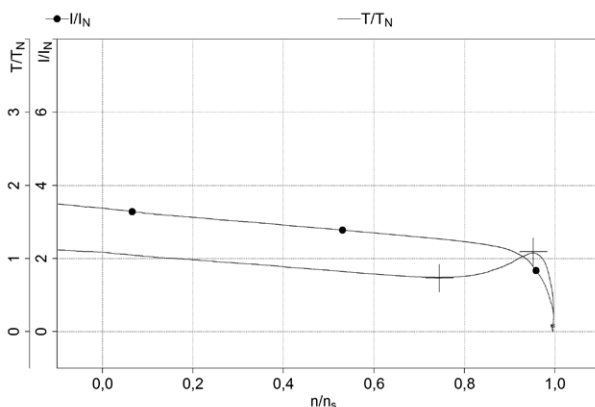
$$\frac{I_D}{I_Y} = 3,15 \quad \frac{T_D}{T_Y} = 2,92$$

## 2.3. Silniki z ograniczoną krotnością prądu rozruchowego.

Nowością w ofercie DFME DAMEL SA jest seria silników z obniżoną krotnością prądu rozruchowego o mocach 30 kW, 75 kW, 160 kW i 250 kW na napięcie do 1140 V do zastosowania w kombajnie chodnikowym. Silniki te poprzez odpowiednią konstrukcję obwodu magnetycznego podczas włączania na sieć sztywną nie powodują dużych uderzeń prądu ani przysiadów napięcia. Zaletą takiego silnika jest ograniczenie prądów rozruchowych przy rozruchu bezpośrednim, bez konieczności stosowania jakichkolwiek innych urządzeń pomocniczych, a wartości momentów rozruchowych nie odbiegają od tych uzyskiwanych przy innych sposobach rozruchu.

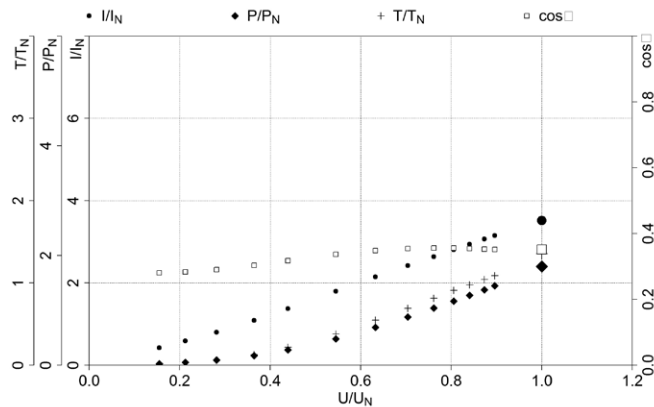
Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki dla silników 2SP3 280S-4 – 75 kW i 2SP3 315L-4 – 160 kW.

W silniku 2SP3 280S-4 – 75 kW uzyskano prąd rozruchowy poniżej 160 A, co daje krotność  $I_R/I_N = 3,46$ .



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna silnika 2SP3 280S-4 75 kW

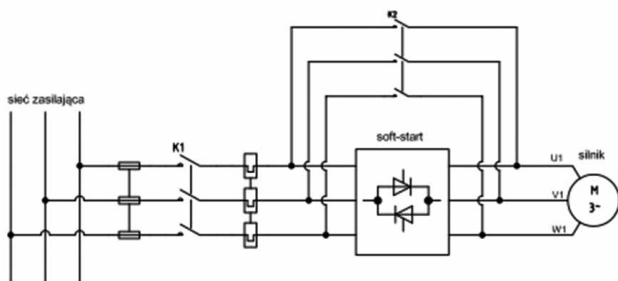
Natomiast w silniku 2SP3 315L-4 – 160 kW uzyskano prąd rozruchowy poniżej 400 A (rys. 8), co daje zakładaną krotkość  $I_R/I_N = 3,5$ . Dla porównania analogiczny silnik 2SP3 315L-4 (wersja A) przedstawiony w pkt. 2.1. uzyskiwał prąd rozruchowy równy 792 A, co jest wartością niemal dwukrotnie większą.



Rys. 8. Charakterystyka przy zahamowanym wirniku silnika 2SP3 315L-4 160 kW

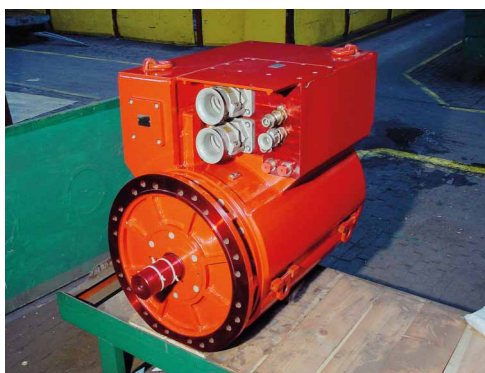
#### 2.4. Silniki zintegrowane z układem softstartu

Kolejnym sposobem obniżenia prądów pobieranych z sieci podczas rozruchu jest wykorzystanie techniki półprzewodnikowej do sterowania silników.



Rys. 9. Schemat ideowy układu z softstartem

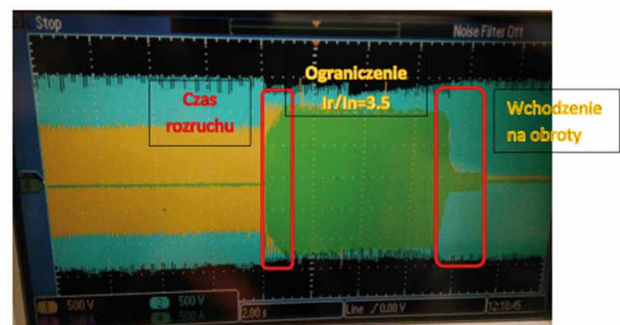
Firma DAMEL od wielu lat produkuje silniki zintegrowane z blokami energoelektronicznymi. Jednym z takich produktów jest silnik SG3T 315M-4 wyposażony w tyrystorowy układ płynnego rozruchu o mocy 200 kW, na napięcie 1000 V.



Rys. 10. Silnik zintegrowany z softstartem typu SG3T 315M-4 o mocy 200 kW

Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala w łatwy sposób zaprogramować czas trwania rozruchu, czas przeciężenia, wartość początkową prądu rozruchowego oraz krotkość prądu rozruchowego. Sterowanie napięcia przemiennego odbywa się przez opóźnienie załączenia zaworów w stosunku do punktu naturalnej komutacji. Po zakończeniu rozruchu układ softstartu zostaje zwarty stycznikiem obejściowym, ograniczając straty w modułach w czasie pracy silnika. Podczas rozruchu punkt pracy przesuwają się płynnie po kolejnych charakterystykach mechanicznych (rys. 1). Obniżenie napięcia powoduje zmniejszenie momentu krytycznego, bez zmiany poślizgu krytycznego. W związku z tym moment rozruchowy silnika zintegrowanego z układem softstartu można określić zgodnie z zależnością (6):

$$T_R = T_N \times \left(\frac{U_R}{U_N}\right)^2 \quad (6)$$



Rys. 11. Rozruch silnika zasilanego z układu softstartu z zadanym obciążeniem. Ograniczenie krotkości prądu na poziomie  $I_R/I_N = 3,5$ . Czas rozruchu 8 s. Niebieski – napięcie zasilania; zielony – prąd silnika

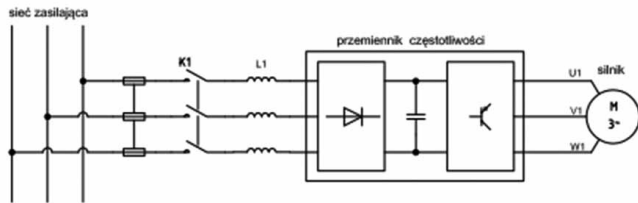
Zaletą układu jest płynna możliwość nastawienia czasu i prądu rozruchowego, a w sytuacji awaryjnej możliwy jest bezpośredni rozruch silnika poprzez załączenie stycznika obejściowego. Dzięki zabudowaniu układu na silniku uzyskujemy niewielkie rozmiary i kompaktową budowę. Dodatkowo możliwe jest wyprowadzenie wszystkich informacji na temat rozruchu i pracy poprzez łącze RS485. Takie rozwiązanie umożliwia nawet w prostym napędzie podłączenie się do systemu kontroli i wizualizacji.

Wykorzystując softstart, można regulować moment obrotowy do dokładnego poziomu wymaganego, niezależnie od tego, czy aplikacja rusza jałowo, czy obciążona. Zmniejszając moment rozruchowy, złagodzone zostają naprężenia mechaniczne na elementach napędu, obniża się dzięki temu koszty serwisu i konserwacji. Softstart zmniejsza również prąd rozruchowy, przez co można uniknąć spadków napięcia w sieci zasilającej.

#### 2.5. Silniki zintegrowane z przetwornikiem częstotliwości

Fakt, iż silnik indukcyjny w czasie łagodnego rozruchu nie rozwija dużego momentu rozruchowego, stanowi jedną z najważniejszych jego wad. Jednak rozwój techniki półprzewodnikowej i zastosowanie falowników do zasilania silników

klatkowych pozwala wyeliminować tę niedogodność. Prze-  
miennik częstotliwości nie tylko ogranicza prąd rozruchowy,  
ale przede wszystkim daje niemal całkowitą kontrolę nad pracą  
silnika.



Rys. 12. Schemat ideowy układu z przełącznikiem częstotliwości

W ofercie firmy DAMEL już od 2006 roku znajdują się silniki  
zintegrowane z przełącznikiem częstotliwości. 12 lat doświad-  
czenia w tej dziedzinie zaowocowało wieloma grupami silników  
zintegrowanych na moce od 60 kW do 1250 kW, na napięcia  
zasilania od 500 V do 3300 V. Przełączniki te mogą pracować  
zarówno przy sterowaniu skalarnym ( $U/f = \text{const}$ ), jak i wek-  
torowym, ze zwrotem energii do sieci lub bez.

Silnik zintegrowany z przełącznikiem częstotliwości ze  
zwrotem energii do sieci typu SG3Fz 450L-4A o mocy 500 kW,  
zaprezentowany na Targach Górnictwa – Katowice 2017, został  
nagrodzony medalem I stopnia w kategorii „Innowacyjne  
technologie”.

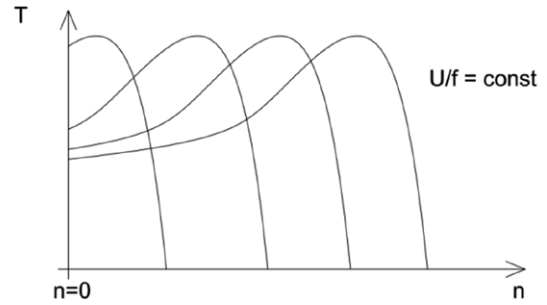


Rys. 13. Silnik zintegrowany z przełącznikiem częstotliwości  
SG3Fz 450L-4A 500 kW 1140 V

Płynna zmiana częstotliwości oraz amplitudy napięcia  
zasilającego uzwojenie od zera do wartości ustalonej zapew-  
nia łagodny rozruch silnika przy zachowaniu stałej wartości  
momentu krytycznego. Zmiana częstotliwości powoduje prze-  
sunięcie charakterystyki mechanicznej, bez obniżenia momentu  
krytycznego (rys. 14). W porównaniu do klasycznych sposo-  
bów rozruchu uzyskiwany jest znacznie wyższy moment roz-  
ruchowy, który pozwala przeprowadzać rozruch pod pełnym  
obciążeniem.

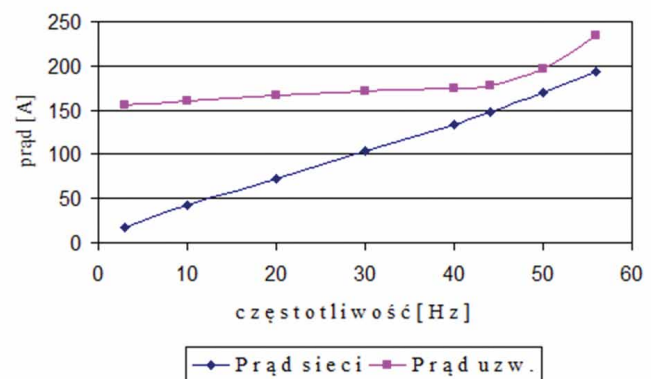
W silnikach produkcji DAMEL stosowany jest napięciowy  
przełącznik częstotliwości ze sterowaniem mikroprocesor-  
wym. Do najważniejszych funkcji realizowanych przez sterow-  
nik i przełącznik częstotliwości należy zaliczyć:

- łagodny rozruch i regulację prędkości obrotowej w zakre-  
sie częstotliwości 3–100 Hz (90–3000 obr./min) oraz możli-  
wość dopasowania charakterystyki rozruchowej do rodzaju  
obciążenia;
- uzyskanie maksymalnego momentu obrotowego od mini-  
malnych obrotów – rys. 16;

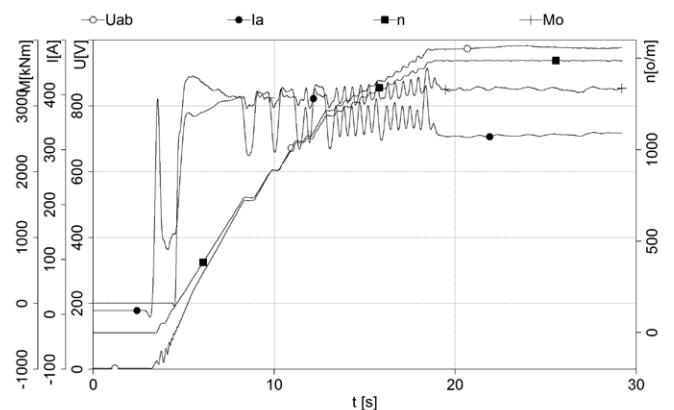


Rys. 14. Charakterystyka mechaniczna silnika przy zmianie napięcia  
i częstotliwości

- mały prąd pobierany z sieci przy uzyskanym pełnym momen-  
cie obrotowym – rys. 15;
- możliwość ciągłej pracy z dowolną prędkością w całym zakre-  
sie częstotliwości;
- zabezpieczenie temperaturowe i przeciążeniowe silnika;
- możliwość wizualizacji pracy napędu – poprzez wykorzy-  
stanie iskrobezpiecznych portów komunikacyjnych RS485.



Rys. 15. Pobór prądu w czasie rozruchu ze stałym obciążeniem  
(silnik SG3F 355L-4 250 kW)



Rys. 16. Rozruch silnika 2SG3F 450L-4 A o mocy 500 kW, 1000 V, ze  
stałym obciążeniem  $T = T_N$ ,  $f = 0-50$  Hz. Napięcie  $U_{ab}$  – napięcie na uzwo-  
jeniu; prąd  $I_a$  – prąd płynący w uzwojeniu; prędkość obrotowa  $n$ ; moment  
 $M_o$  – na wale silnika

Tabela 1

	Prąd rozruchowy	Moment rozruchowy	Czas rozruchu
Rozruch bezpośredni	$6 \div 8 \times I_N$	$T_R$	1 s
Rozruch Y-Δ	$2 \times I_N$	$0,7 \times T_N$	5 s
Silniki z ograniczonym prądem rozruchowym	$3,5 \times I_N$	$1,1 \times T_N$	4 s
Softstart	$1 \div 5 \times I_N$	$T_R = T_N \times \left(\frac{U_R}{U_N}\right)^2$	2-20 s
Przełącznik częstotliwości	$0,1 \times I_N$	$T_R = T_{kr}$	dowolny

### 3. Porównania i wnioski

Jak przedstawiono w artykule, istnieje wiele sposobów „włączania” silnika, od najprostszych rozwiązań polegających na bezpośrednim zasilaniu stojana, aż do układów z przełącznikiem częstotliwości, które umożliwiają praktycznie pełną kontrolę nad pracą silnika. W tabeli 1 zestawiono i porównano podstawowe parametry uzyskiwane przy poszczególnych sposobach rozruchu.

Wszystkie przedstawione rozwiązania proponowane są przez DFME DAMEL SA, a większość z nich ma już ugruntowaną pozycję na rynku górniczym zarówno krajowym, jak i zagranicznym.

Ograniczenie prądów i momentów rozruchowych pozwala łagodnie rozpędzać większość napędów, a co za tym idzie – pozytywnie wpływa to na ich charakterystykę roboczą i wydłuża ich żywotność. Oszczędza się w ten sposób na materiałach pomocniczych, poprawia się zachowanie maszyny roboczej i wydłuża się jej trwałość. Obniżenie prądów rozruchowych umożliwia również stosowanie mniejszych mocy transformatorów i szaf sterowniczych zasilających napędy.


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 przełącznika 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.

Dobór odpowiedniego napędu zawsze leży po stronie projektanta, który powinien dobrać proponowane rozwiązania techniczne zgodnie z wymaganiami klienta i charakterystyką napędu. Firma DAMEL, wychodząc naprzeciw wymaganiom

rynku, oferuje pełen wachlarz produktów mogących zaspokoić oczekiwania nawet najbardziej wymagających klientów.

### Literatura

- [1] PLAMITZER A.M.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
- [2] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Łagodny rozruch silników prądu przemiennego dużej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 81/2009.
- [3] BERNATT M., BERNATT J.: *Silnik z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja napędów przenośnikowych zgrzeblowych*. *Maszyny Górnicze*, Komag, nr. 84, 2000, s. 69–73.
- [4] BERNATT M., BERNATT J.: *Nowa generacja silników indukcyjnych zasilanych z przekształtnika tyrystorowego sterowanych mikroprocesorem*. „Zeszyty Problemowe Komel” 62/2001.
- [5] BERNATT M., BERNATT J.: *Silnik indukcyjny z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja górniczych napędów dółowych*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 5/2001.
- [6] BUDZYŃSKI Z., KOŁODZIEJ H., PRZYBYŁKA J.: *Silnik indukcyjny zintegrowany z przełącznikiem częstotliwości w wykonaniu przeciwwybuchowym na napięcie 1000 V (1140 V)*. „Zeszyty Problemowe Komel” 71/2005.
- [7] PRZYBYŁKA J.: *Nowoczesne układy napędowe produkcji DFME DAMEL SA przeznaczone do pracy w strefach zagrożonych wybuchem z możliwością regulacji prędkości obrotowej i monitorowania pracy napędu*. „Zeszyty Problemowe Komel” 76/2007.
- [8] PRZYBYŁKA J.: *Napędy elektryczne o regulowanej prędkości obrotowej produkcji DFME DAMEL SA do przenośników taśmowych*. „Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze” 1(35)/2017.

 mgr inż. Piotr Kuzera, e-mail: pkuzera@damel.com.pl  
inż. Jacek Przybyłka, e-mail: jprzybylka@damel.com.pl  
DFME DAMEL SA Dąbrowa Górnicza