

# Parametry elektryczne i czasowe układów napędowych wentylatorów głównego przewietrzania kopalń z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przekształtników częstotliwości i kaskad podsynchronicznych

*Artykuł prezentuje parametry elektryczne i zależności czasowe występujące podczas rozruchu wentylatorów głównego przewietrzania kopalń z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przekształtników częstotliwości i kaskad podsynchronicznych. W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych różnych układów zasilania wentylatora promieniowego typu WPK-5,0 napędzanego silnikiem asynchronicznym o mocy 2500 kW. Wyniki symulacji porównano zwracając uwagę na występujące zależności czasowe i parametry elektryczne w symulowanych układach napędowych.*

## 1. WSTĘP

---

W układach głównego przewietrzania kopalń węgla kamiennego w Polsce są stosowane najczęściej wentylatory typu WPK-3,3, WPK-3,9, WPK-5,0 [1]. Są to wentylatory promieniowe z jednostronnie ssącym wirnikiem. Prosta konstrukcja wentylatorów WPK nie stwarza trudności montażowych oraz zapewnia długotrwałą bezawaryjną eksploatację sięgającą 60000 h. Konstrukcja wentylatora zapewnia cichobieżność oraz wysoką sprawność i szeroki zakres ekonomicznej pracy. Do napędu tych wentylatorów są stosowane silniki o mocach od 600 do 2500 kW. W niniejszej pracy przeanalizowano rozruch wentylatora typu WPK-5,0 napędzanego silnikiem o mocy 2500 kW.

## 2. ROZRUCH WENTYLATORA ZA POMOCĄ PRZEKSZTAŁTNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

---

Zasilanie silnika napędowego wentylatora poprzez przekształtnik częstotliwości ma bardzo ważną zaletę, a mianowicie w czasie rozruchu

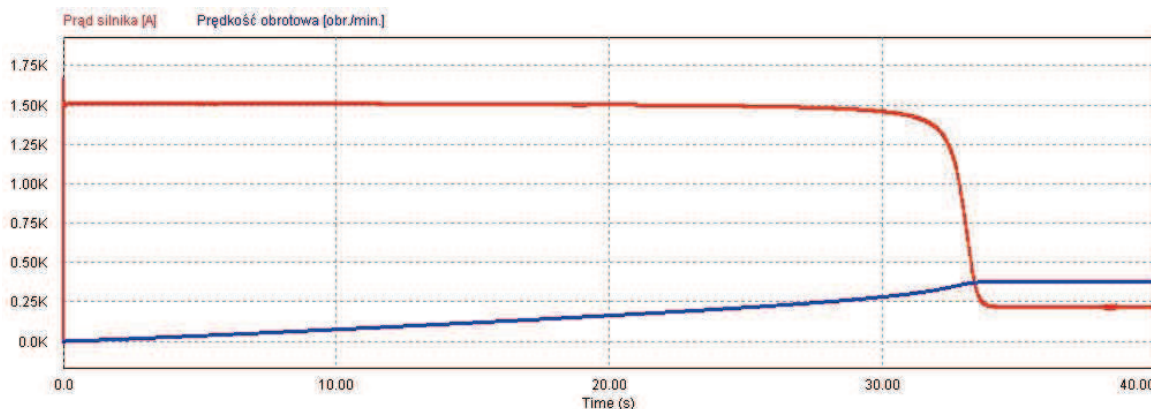
można znacznie ograniczyć prąd rozruchowy, który nierzadko podczas rozruchu bezpośredniego z sieci przekracza ponad 5-krotnie prąd znamionowy silnika.

Dla przykładu poniżej porównano rozruch bezpośredni wentylatora WPK-5,0 [1] napędzanego silnikiem o mocy 2500 kW typu SAUe-1716s produkcji DOLMEL [2] z rozruchem za pomocą przekształtnika częstotliwości przy najprostszym sposobie sterowania skalarne U/f [3,4,5].

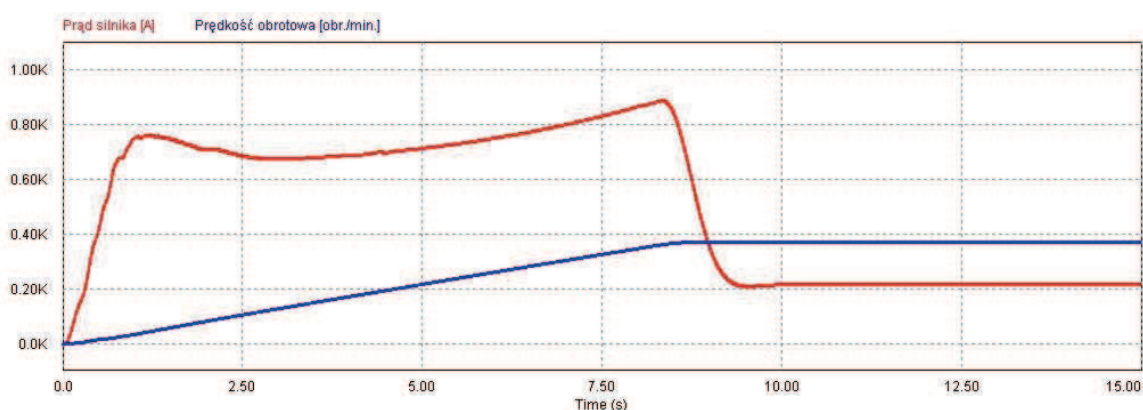
Włączenie bezpośrednio silnika napędowego do sieci zasilającej 6 kV powoduje przepływ prądu rozruchowego przekraczającego 5-krotnie wartość prądu znamionowego ( $I_N = 294A$ ) przez czas około 30 sekund, co przedstawia rys. 1.

Na rys. 1 został przedstawiony przebieg wartości skutecznej prądu [A] oraz prędkość obrotowa [obr./min.] w czasie rozruchu silnika 2500 kW obciążonego wentylatorem WPK-5,0 podczas bezpośredniego włączenia do sieci zasilającej 6 kV. Całkowity czas rozruchu do prędkości znamionowej 370 obr./min trwa ponad 33 sekund.

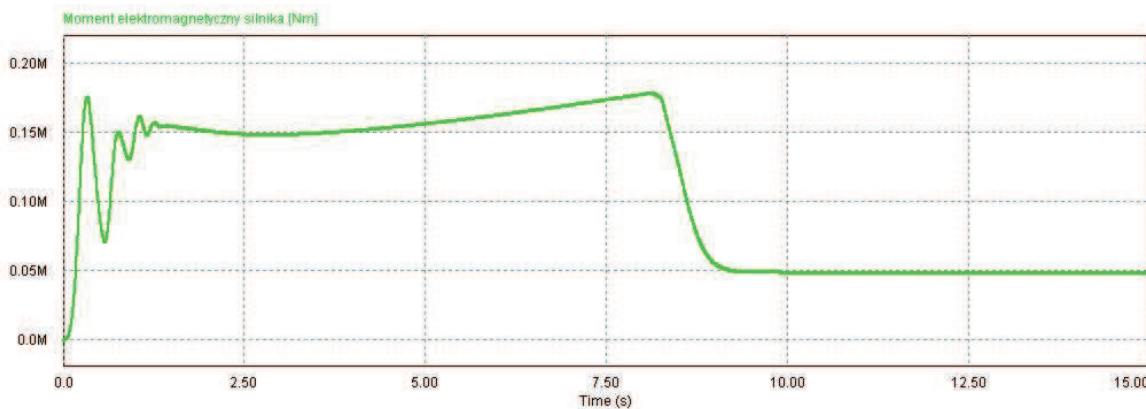
Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone za pomocą programu PSIM v.7.1 firmy Powersim Inc. będącego symulatorem układów energoelektronicznych [6].



Rys. 1. Prąd rozruchowy i prędkość obrotowa silnika 2500 kW przy rozruchu bezpośrednim z sieci



Rys. 2. Prąd rozruchowy i prędkość obrotowa silnika 2500 kW zasilanego z przekształtnika  $U/f = const.$



Rys. 3. Moment elektromagnetyczny silnika 2500 kW zasilanego z przekształtnika  $U/f = const.$

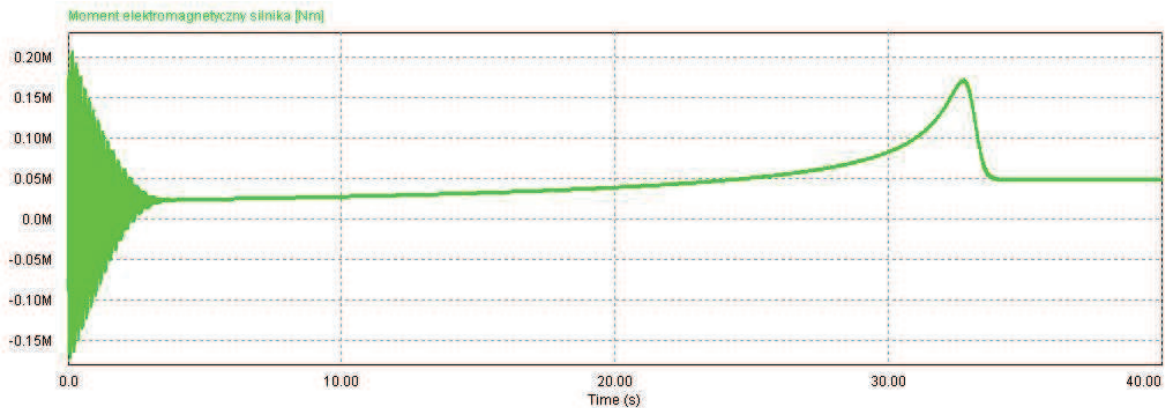
Dla porównania na rys. 2 został przedstawiony przebieg wartości skutecznej prądu [A] oraz prędkość obrotowa [obr./min] w czasie rozruchu takiego samego układu silnik-wentylator, przy zasilaniu z przekształtnika częstotliwości wytwarzającego napięcie 3-fazowe o liniowo narastającej częstotliwości i zachowaniu stałego stosunku wartości napięcia do częstotliwości ( $U/f = const.$ ).

Jak widać na rys. 2 wartość prądu rozruchowego spadła prawie dwukrotnie i znacząco skrócił się czas

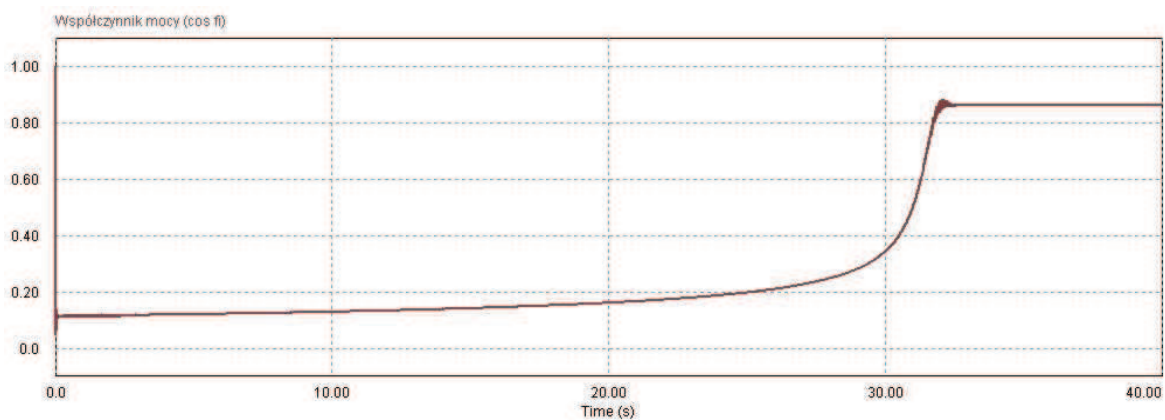
rozruchu, który przy rozruchu z przekształtnika wynosi poniżej 10 sekund, a więc przeszło 3-krotnie mniej niż przy rozruchu bezpośrednim z sieci.

Czas rozruchu uległ tak dużemu skróceniu na skutek dużego momentu rozruchowego rozwijanego przez silnik sterowany częstotliwościowo z przekształtnika.

Na rys. 3 jest przedstawiony przebieg momentu elektromagnetycznego [Nm] w czasie rozruchu układu silnik-wentylator zasilanego z przekształtnika częstotliwości przy  $U/f = const.$



Rys. 4. Moment elektromagnetyczny silnika 2500 kW przy rozruchu bezpośrednim z sieci



Rys. 5. Przebieg współczynnika mocy  $\cos \varphi$  przy rozruchu bezpośrednim z sieci

Jak widać na rys. 3 moment elektromagnetyczny silnika przez cały czas rozruchu utrzymuje się powyżej 200% wartości momentu znamionowego ( $M_N = 67,8 \text{ kN}$ ), co powoduje znaczne skrócenie czasu rozruchu.

Dla porównania na rys. 4 jest przedstawiony moment elektromagnetyczny silnika [Nm] przy rozruchu bezpośrednim z sieci.

Jak widać na rys.4 moment rozruchowy przez 80% czasu rozruchu jest poniżej wartości momentu znamionowego silnika ( $M_N = 67,8 \text{ kN}$ ), a w początkowej fazie rozruchu dodatkowo występują silne oscylacje momentu.

Niska wartość momentu rozruchowego przy zasilaniu bezpośrednim z sieci wynika z dużej częstotliwości napięcia indukowanego w wirniku silnika napędowego, w początkowej fazie rozruchu około 50 Hz, co powoduje duży spadek napięcia na reaktancji rozproszenia wirnika, a tym samym niski współczynnik mocy. Przebieg współczynnika mocy w czasie rozruchu bezpośredniego z sieci przedstawia rys. 5.

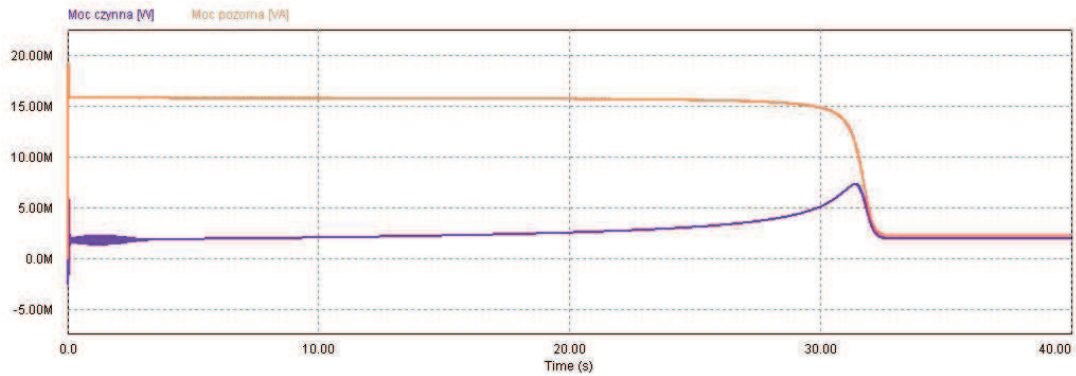
Jak widać na rys. 5 wartość współczynnika mocy przez prawie 80% czasu rozruchu utrzymuje się poniżej wartości  $\cos \varphi = 0,2$ . Taka niska wartość współ-

czynnika mocy charakteryzuje rozruch bezpośredni z sieci dużym zapotrzebowaniem na moc bierną, co wiąże się bezpośrednio z koniecznością dysponowania przez układ zasilania dużą mocą pozorną. Na rys. 6 są przedstawione przebiegi mocy czynnej [W] i pozornej [VA] podczas rozruchu układu silnik-wentylator.

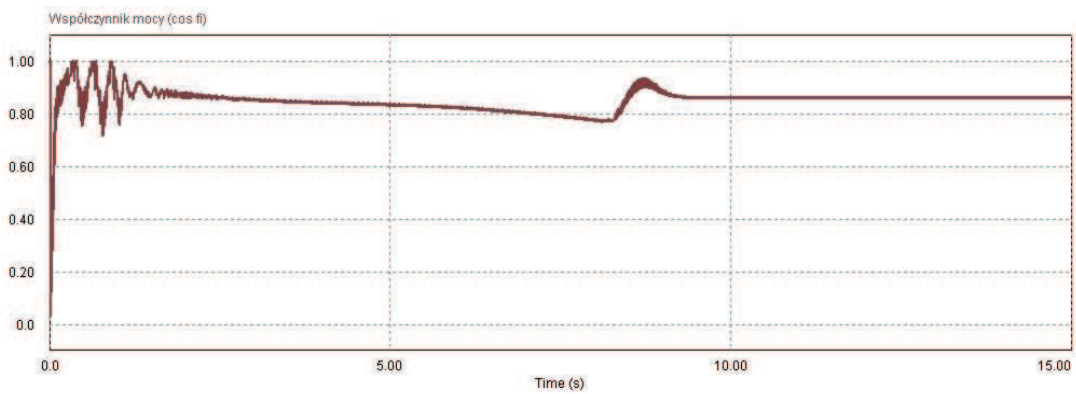
Jak widać na rys. 6 wymaganie układu silnik-wentylator na moc pozorną układu zasilania przekracza 5-krotnie moc znamionową zasilanego silnika ( $S_N = 3,055 \text{ MVA}$ ).

Tak dużego przewymiarowania układu zasilania można uniknąć przy rozruchu z przekształtnika. Na rys. 7 jest przedstawiony przebieg współczynnika mocy w czasie rozruchu układu silnik-wentylator przy zastosowaniu przekształtnika przy sterowaniu skalarnym  $U/f = \text{const}$ .

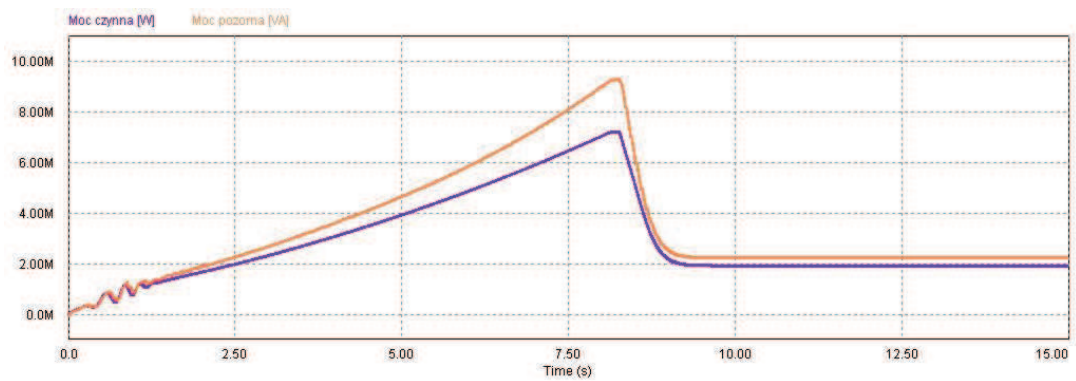
Jak widać na rys. 7 wartość współczynnika mocy w czasie rozruchu praktycznie cały czas przekracza wartość  $\cos \varphi = 0,8$ . Spowodowane to jest utrzymaniem przez cały czas rozruchu niskiej częstotliwości napięcia indukowanego w wirniku silnika napędowego, co powoduje występowanie małego spadku napięcia na reaktancji rozproszenia wirnika, a tym samym duży współczynnik mocy.



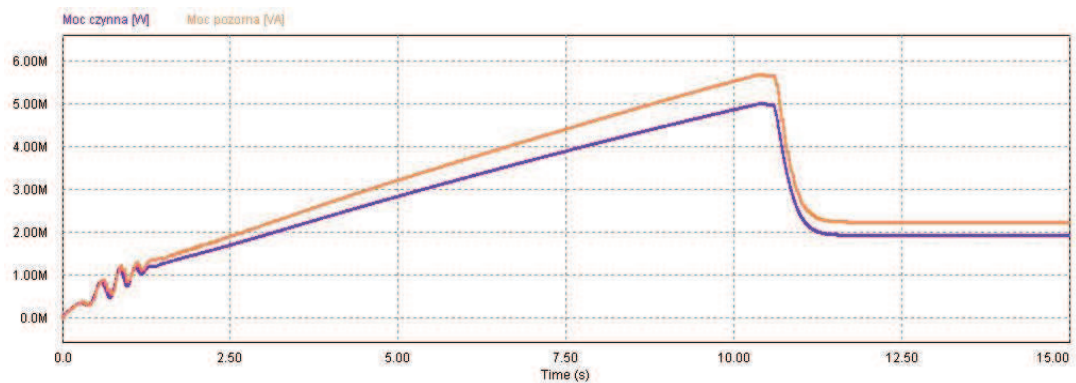
Rys. 6. Przebieg mocy czynnej i pozornej przy rozruchu bezpośrednim z sieci silnika 2500 kW



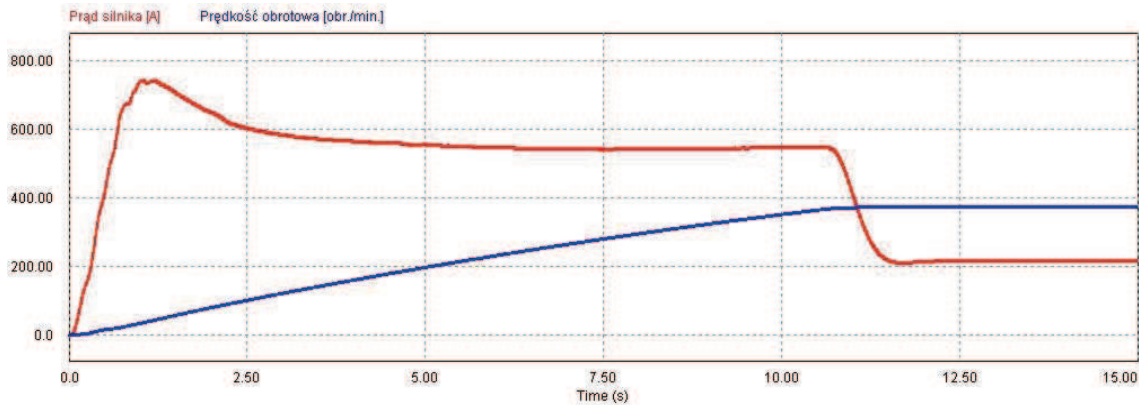
Rys. 7. Przebieg współczynnika mocy  $\cos \varphi$  przy rozruchu z przekształtnika  $U/f = \text{const}$ .



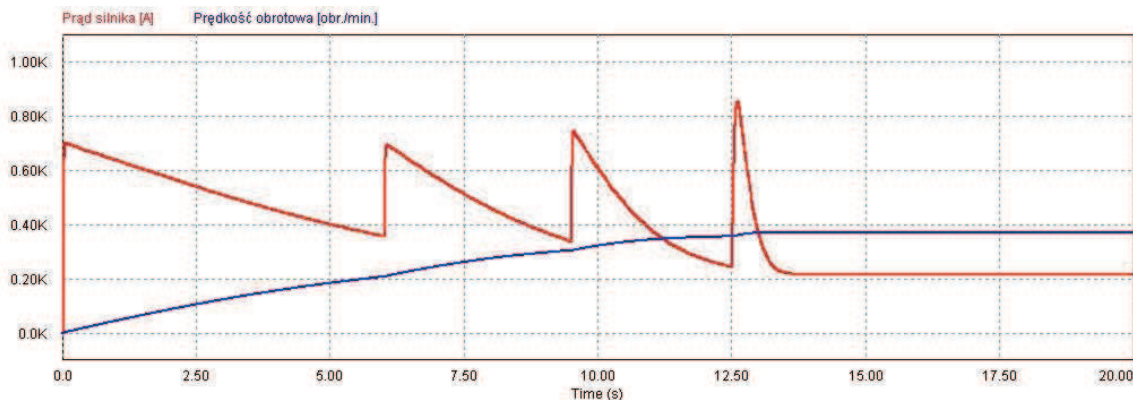
Rys. 8. Przebieg mocy czynnej i pozornej przy rozruchu silnika 2500 kW z przekształtnika  $U/f = \text{const}$ .



Rys. 9. Przebieg mocy czynnej i pozornej przy rozruchu silnika 2500 kW z przekształtnika przy nieliniowym kształtowaniu charakterystyki  $U/f$



Rys. 10. Prąd rozruchowy i prędkość obrotowa silnika 2500 kW zasilanego z przekształtnika przy nieliniowym kształtowaniu charakterystyki  $U/f$



Rys. 11. Prąd rozruchowy i prędkość obrotowa silnika pierścieniowego 2500 kW przy rozruchu rezystancyjnym

Na rys. 8 są przedstawione przebiegi mocy czynnej [W] i pozornej [VA] w czasie rozruchu układu silnik-wentylator zasilanego z przekształtnika ( $U/f = \text{const.}$ ).

Jak widać na rys. 8 wymaganie układu silnik-wentylator na moc pozorną układu zasilania przekracza już tylko 3-krotnie moc znamionową zasilanego silnika. Można jeszcze bardziej ograniczyć pobór mocy podczas rozruchu odpowiednio kształtując charakterystykę zasilania silnika w czasie rozruchu. Przekształtniki częstotliwości umożliwiają takie kształtowanie charakterystyki [7,8,9].

Dla przykładu na rys. 9 są przedstawione przebiegi mocy czynnej [W] i pozornej [VA] w czasie rozruchu układu silnik-wentylator zasilanego z przekształtnika przy nieliniowym kształtowaniu charakterystyki  $U/f$ .

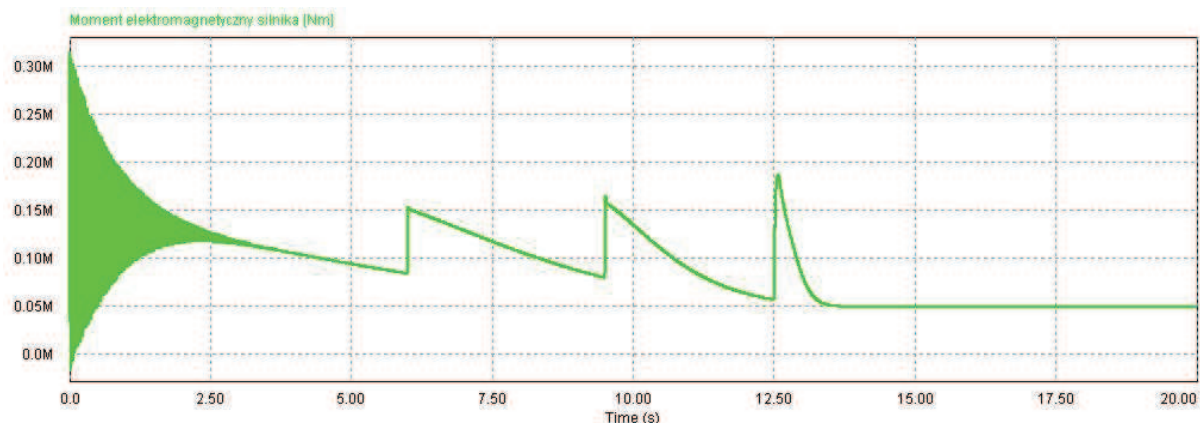
Jak widać na rys. 9 lekko nieliniowe kształtowanie charakterystyki  $U/f$  podczas rozruchu (szybkość narastania częstotliwości maleje w czasie rozruchu) pozwala ograniczyć pobór mocy. Chwilowa moc pobierana z układu zasilania w tym przypadku nie przekracza 2-krotnej wartości mocy znamionowej

silnika. Ograniczenie poboru mocy spowodowało lekkie wydłużenie czasu rozruchu o około 30% w stosunku do poprzedniego przypadku. Ograniczenie mocy ogranicza również pobór prądu w czasie rozruchu, co przedstawia rys. 10.

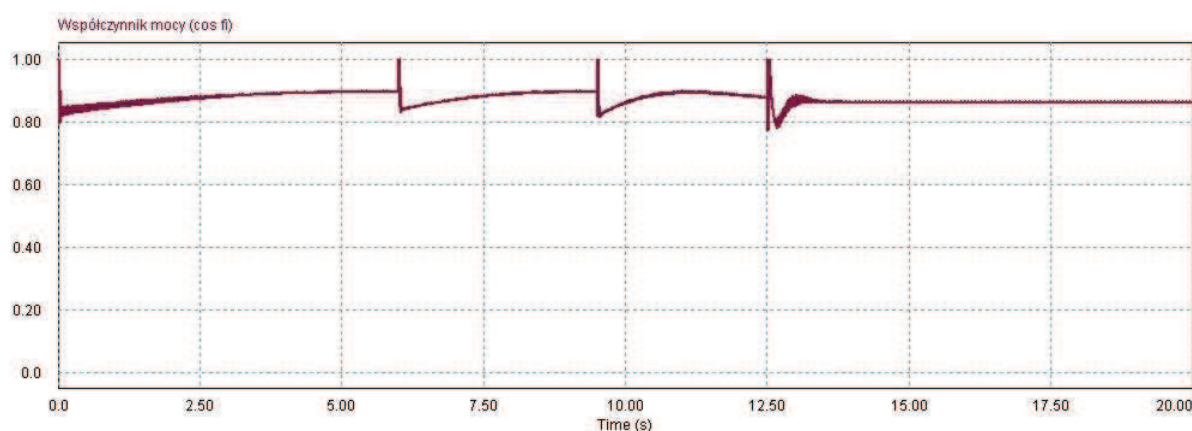
Jak widać na rys. 10 wartość prądu pobieranego przez silnik 2500 kW przez większość czasu rozruchu nie przekracza 2-krotnej wartości prądu znamionowego silnika.

### 3. ROZRUCH WENTYLATORA W UKŁADZIE KASKADY PODSYNCHRONICZNEJ

Jeżeli do regulacji prędkości obrotowej wentylatora głównego przewietrzania zastosowano układ kaskady podsynchronicznej to zwykle elementy energoelektroniczne wykorzystane do budowy kaskady nie pozwalają na rozruch silnika w układzie kaskady. Rozruch nie jest możliwy ze względu na długi czas rozruchu i małą przeciążalność układów energoelektronicznych, a nie jest opłacalne duże przewymiarowanie elementów



Rys. 12. Moment elektromagnetyczny silnika 2500 kW podczas rozruchu rezystancyjnego



Rys. 13. Przebieg współczynnika mocy  $\cos \varphi$  przy rozruchu rezystancyjnym

energoelektronicznych tylko po to, aby rozruch w układzie kaskady był możliwy. Dlatego do rozruchu stosuje się rozruch rezystancyjny, zwykle kilka przełączanych stopni rezystorów rozruchowych, a dopiero po rozruchu przejście w tryb kaskady.

Dla przykładu poniżej przeprowadzono symulację rozruchu rezystancyjnego 4-stopniowego, silnika pierścieniowego 2500 kW typu SAUe-1716s produkcji DOLMEL obciążonego wentylatorem WPK-5,0 [1,2,3,4].

Występującą w układzie wartość skuteczną prądu rozruchowego [A] oraz prędkość obrotową [obr./min] przedstawia rys. 11.

Jak widać na rys.11 prąd rozruchowy silnika tylko nieznacznie i przez krótki czas przekracza wartość 2-krotnego prądu znamionowego silnika ( $I_N = 294A$ ). Czas rozruchu nieznacznie przekracza 13 sekund. Czas rozruchu jest krótki dzięki dużemu momentowi elektromagnetycznemu rozwijanemu przez silnik pierścieniowy podczas rozruchu rezystancyjnego.

Rysunek 12 przedstawia przebieg momentu elektromagnetycznego silnika [Nm] podczas 4-stopniowego rozruchu rezystancyjnego.

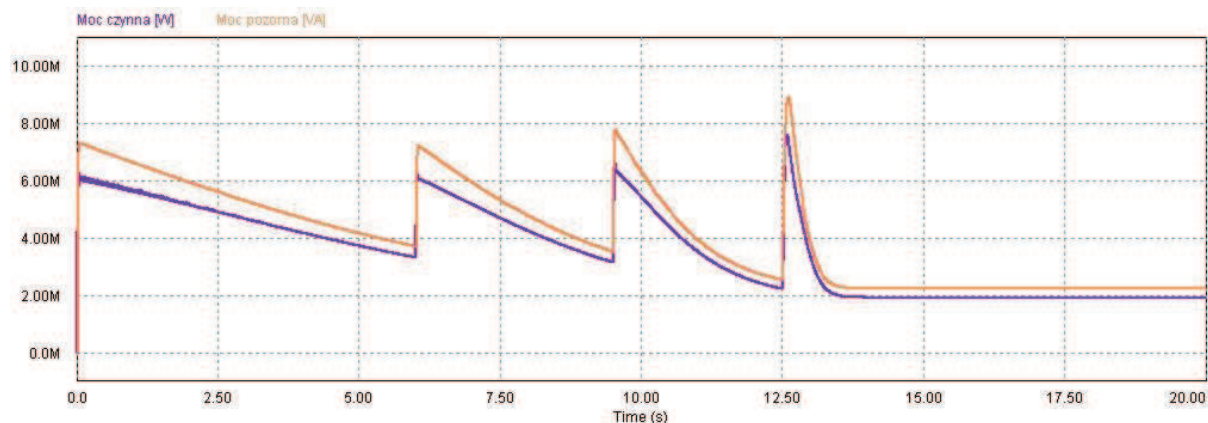
Jak widać na rys. 12 przebieg momentu elektromagnetycznego silnika podczas rozruchu rezystancyjnego nie jest tak dobry jak podczas rozruchu z wykorzystaniem przekształtnika, jednak jest o wiele lepszy niż podczas rozruchu bezpośredniego z sieci. W początkowej fazie rozruchu również występują duże oscylacje momentu, tak jak przy rozruchu z sieci. Niewątpliwą wadą rozruchu rezystancyjnego jest występowanie uderzeń momentu w czasie włączania kolejnych stopni rezystancyjnych.

Na rys. 13 jest przedstawiony przebieg współczynnika mocy w czasie rozruchu układu silnik-wentylator podczas rozruchu rezystancyjnego.

Jak widać na rys. 13 współczynnik mocy podczas rozruchu rezystancyjnego silnika pierścieniowego przez cały czas rozruchu pozostaje wysoki i przekracza wartość  $\cos \varphi = 0,8$ .

Dzięki temu rozruch rezystancyjny charakteryzuje się dobrym wykorzystaniem mocy i stawia małe wymagania dla układu zasilania.

Na rys. 14 są przedstawione przebiegi mocy czynnej [W] i pozornej [VA] w czasie rozruchu rezystancyjnego układu silnik-wentylator.



Rys. 14. Przebieg mocy czynnej i pozornej przy rozruchu rezystancyjnym silnika 2500 kW

Jak widać na rys. 14 rozruch rezystancyjny stawia małe wymagania układowi zasilania, chwilowa wartość pobieranej mocy przekracza 3-krotnie wartość mocy znamionowej silnika i rozruch rezystancyjny jest pod tym względem zbliżony do rozruchu z użyciem przekształtnika częstotliwości z najprostszym rodzajem sterowania skalarne  $U/f = \text{const}$ .

Czas rozruchu jest nieco dłuższy od czasu rozruchu z zastosowaniem przekształtnika częstotliwości.

#### 4. PODSUMOWANIE

Porównując różne układy stosowane do napędu wentylatorów głównego przewietrzania kopalń ze względu na występujące parametry elektryczne i czasowe najlepsze jest zastosowanie do zasilania silnika napędowego przekształtnika częstotliwości. Zastosowanie przekształtnika umożliwiającego kształtowanie charakterystyki napięcia zasilającego silnik napędowy wentylatora umożliwi znaczne ograniczenie występujących w czasie rozruchu prądów oraz pozwala na niewielkie przewymiarowanie układów zasilania w stosunku do mocy znamionowej silnika napędowego.

Zastosowanie kaskady podsynchronicznej i związanego z tym rozruchu rezystancyjnego wymaga zwykle większego przewymiarowania układów zasilania. Również czas rozruchu układu silnik-wentylator jest zwykle dłuższy niż z zastosowaniem przekształtnika częstotliwości.

#### Literatura

1. Katalog SWW 0873-12: „Wentylatory promieniowe”, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego - WEMA”, Warszawa 1976.

2. Katalog „Silniki indukcyjne”, Dolnośląskie Zakłady Wytwórcze Maszyn Elektrycznych, Wrocław.
3. *Plamitzer A.M.*: Maszyny Elektryczne. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
4. *Grunwald Z.*: Napęd Elektryczny. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
5. *Kalus M., Skoczowski T.*: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
6. Symulator układów energoelektronicznych PSIM v.7.1: <http://www.powersimtech.com/download.html>
7. Rockwell Automation Sp. z o.o.: Przekształtniki częstotliwości na średnie napięcie, 2300-6600 V: <http://www.ab.com/mvb/pf7000.html>
8. ABB – Przekształtniki częstotliwości do układów napędowych średniego napięcia: <http://www.abb.com/product/pl/9AAC100218.aspx?country=PL>
9. Siemens – Przekształtniki AC średniego napięcia: [http://www.automation.siemens.com/ld/ac-umrichter/html\\_76/perfectharmony/perfectharmony-1.html](http://www.automation.siemens.com/ld/ac-umrichter/html_76/perfectharmony/perfectharmony-1.html)

Recenzent: doc. dr inż. Franciszek Szczucki