

Zmiana punktu pracy wentylatorów dużej mocy z regulowaną prędkością obrotową w obiektach wytwarzających energię cieplną lub elektryczną

Zbigniew Szulc

1. Wstęp

Wentylatory dużej mocy (powyżej 500 kW) stosowane w elektrowniach i elektrociepłowniach wymagają coraz częściej regulacji punktów pracy. Wynika to z faktu, że produkcja energii cieplnej lub elektrycznej musi dopasowywać się do zmiennych zapotrzebowań ze strony odbiorców [1, 2, 3]. Technologia wytwarzania tych energii musi być elastyczna. Jednocześnie coraz ostrzejsze wymagania dotyczące równoczesnego ograniczania emitowania zanieczyszczeń zmuszają do stosowania odsiarczania, odazotowania, odpylania i podobnych działań. We wszystkich tych technologiach wentylatory są jednym z ważniejszych elementów. Regulacja ich parametrów (ciśnienia, natężenia przepływu) coraz częściej odbywa się przy pomocy ustawiania zadanej prędkości obrotowej wirnika. Wynika to z ekonomii (optymalne zużycie energii układu napędowego) oraz sposobu sterowania całą technologią. Czasami stosuje się jeszcze regulację ciśnienia i wydajności poprzez zmianę kąta ustawienia łopat wentylatora lub dławienie przy pomocy kłap wejściowych.

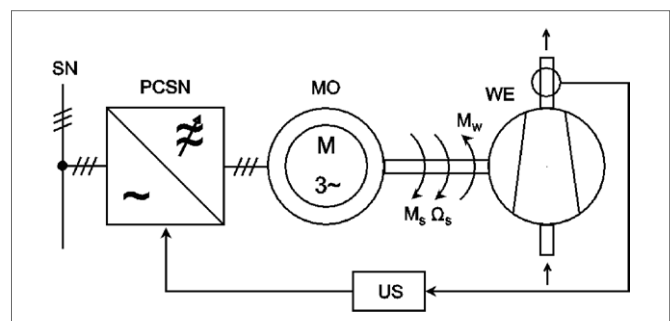
Prędkość obrotowa wentylatora jest najczęściej regulowana przy pomocy silnika napędowego (indukcyjny, klatkowy, średniego napięcia) zasilanego z przemiennika częstotliwości. Istnieje kilka topologii przemienników częstotliwości średniego napięcia zasilających takie silniki.

W artykule została przedstawiona metoda opisu matematycznego elektromechanicznych zjawisk występujących w układzie silnik napędowy – wentylator. Celem tego opisu jest znalezienie reguł na właściwy dobór silnika i przemiennika częstotliwości, umożliwiających zmiany punktów pracy wentylatora wymaganych przez technologię.

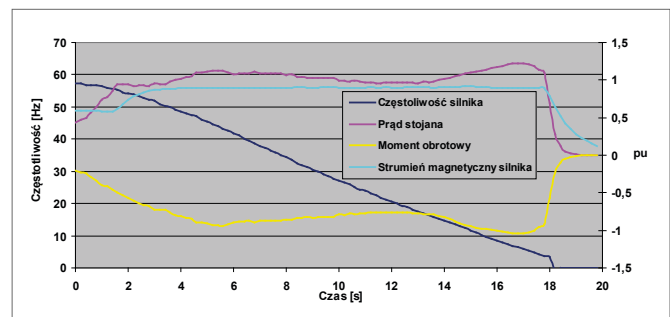
2. Opis matematyczny zjawisk elektromechanicznych

Na rys. 1 a został przedstawiony schemat ideowo-blokowy zespołu napędowego wentylatora.

Wentylator (WE) napędzany przez silnik (MO) posiada regulowaną prędkość obrotową (Ω_s) dzięki przemiennikowi częstotliwości średniego napięcia (PCSN). Dzięki regulacji prędkości obrotowej są regulowane parametry technologiczne wentylatora (Δp – ciśnienie, Q – wydajność). Pomiar parametrów wentylatora jest potrzebny do monitorowania punktu pracy wentylatora lub do sprzężeń zwrotnych przy pomocy bloku sterującego (US). Blok (US) generuje sygnały sterujące dla (PCSN). W przemiennikach częstotliwości średniego napięcia system sterowa-



Rys. 1 a. Schemat ideowo-blokowy zespołu napędowego



Rys. 1 b. Przebiegi wielkości fizycznych podczas hamowania w układzie napędowym taśmociągu o dużym momencie bezwładności (udostępnione przez producenta przemiennika częstotliwości)

nia prędkością, prądem, strumieniem i momentem obrotowym wyznacza wyżej wymienione potrzebne wielkości fizyczne silnika na podstawie pomiarów prądów i napięć oraz częstotliwości w oparciu o model matematyczny. Przy uruchomieniu układu napędowego parametry silnika, wentylatora oraz sieci zasilającej są wprowadzane do układu sterowania przemiennika. Jest to szczególnie istotne przy dużych układach napędowych, przy których sygnały zewnętrznych sprzężeń zwrotnych są trudne do realizacji. Przykładowe przebiegi tych wielkości w takim układzie napędowym są przedstawione na rys. 1 b. Najważniejsza wielkość wyjściowa (prędkość obrotowa) jest tutaj wyrażona w postaci częstotliwości stojana silnika określającej regulowaną prędkość synchroniczną silnika. Przebiegi te dotyczą

hamowania taśmociągu o dużym momencie bezwładności napędzanego silnikiem indukcyjnym klatkowym dużej mocy zasilanego z przemiennika częstotliwości średniego napięcia [6].

Powyższy przykład układu napędowego pozwala linearyzować moment obciążenia silnika w napędzie wentylatora. Moment oporowy (M_w) wentylatora zależy od prędkości obrotowej (Ω_s) i został przedstawiony na rys. 2.

Całkowity moment na wale wentylatora (M_{wl}) składa się z momentu pochodzącego od tłoczonego medium (M_{wm}) oraz momentu tarcia w łożyskach i innych oporów strat (M_{wo}) stąd:

$$M_{wl} = M_{wm} + M_{wo} \quad (1)$$

W czasie eksploatacji moment oporowy M_{wm} może się zmieniać nawet $\pm 10\%$. Stąd do obliczeń przyjęto, że moment wentylatora jest liniowo zależny od prędkości obrotowej i zostanie opisany równaniem:

$$M_w = a + b(\Omega_w) \quad (2)$$

przy czym:

a, b – stałe współczynniki;

Ω_w – prędkość znamionowa silnika [1/s];

M_w – moment wentylatora [Nm].

Na podstawie rys. 2 można napisać:

$$a = 0,1 M_N \text{ [Nm]}$$

$$b = 0,9 \frac{M_N}{\Omega_N} \text{ [Nms]}$$

M_N – moment znamionowy silnika [Nm].

Wentylator jest bezpośrednio sprzęgnięty z wałem silnika (bez przekładni), stąd:

$$\Omega_w = \Omega_s$$

Równanie ruchu obrotowego wirnika wentylatora (drugie prawo dynamiki dla ruchu obrotowego) można przedstawić w postaci:

$$M_s - M_w = J_c \frac{d\Omega_w(t)}{dt} \quad (3)$$

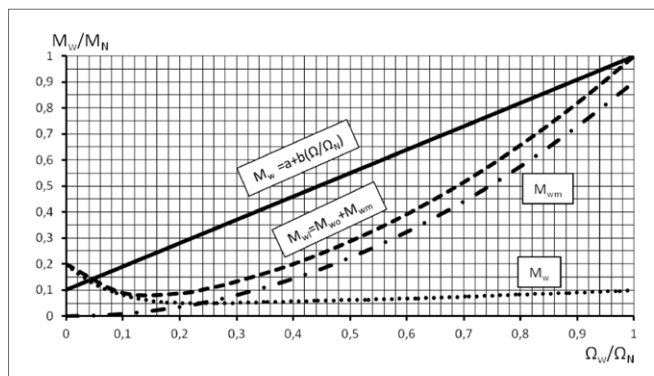
M_s – moment napędowy silnika [Nm];

J_c – całkowity moment bezwładności na wale [kgm^2].

Dla układów jednokierunkowych (tzn. rozwijających moment tylko w jednym kierunku) przy wzroście prędkości obrotowej, kiedy $M_s > M_w$

$$M_s - M_w > 0$$

$$J_c \frac{d\Omega_w(t)}{dt} > 0 \quad (4)$$



Rys. 2. Przebiegi momentów w funkcji prędkości obrotowej

Parametry technologiczne wentylatora ($\Delta p, Q$) zwiększają się do wartości potrzebnych wynikających z punktu pracy zadanych przez układ (US). Uzyskany punkt pracy scharakteryzowany jest przez parametry ($\Delta p_1, Q_1, \Omega_{w1}$). Jeżeli technologia wymaga nowego punktu pracy:

$$\Delta p_2 < \Delta p_1$$

$$Q_2 < Q_1 \quad (5)$$

to:

$$\Omega_{w2} < \Omega_{w1}$$

Może to nastąpić, jeżeli

$$\frac{d\Omega_w(t)}{dt} < 0 \quad (6)$$

Na podstawie równania (3) musi być spełniony warunek

$$M_s - M_w < 0 \quad (7)$$

Dla układu jednokierunkowego warunek (7) może być spełniony tylko wtedy, gdy:

$$M_s < M_w \quad (8)$$

Jeżeli chcemy, żeby zmiana prędkości obrotowej nastąpiła szybko, to najwyżej można wymusić warunek:

$$M_s = 0$$

$$-M_w = J_c \frac{d\Omega_w(t)}{dt} \quad (9)$$

Jeżeli układ napędowy posiada możliwość wytwarzania ujemnego momentu:

$$M_s < 0$$

$$-M_s - M_w = J_c \frac{d\Omega_w(t)}{dt} \quad (10)$$

Sterując momentem M_s w pełnym zakresie wytwarzania tych momentów (dodatnich i ujemnych), można regulować wartość przyspieszenia kątownego (ϵ):

$$\epsilon_w = \frac{d\Omega_w}{dt} [\text{1/s}^2] \quad (11)$$

Wówczas zmiany prędkości obrotowej wentylatora można kształtować według dowolnych krzywych prędkości (rampy zmian prędkości obrotowej). Wyraźnie trzeba jednak stwierdzić, że jest to możliwe przy zastosowaniu układu napędowego (przeźmiennik częstotliwości i silnik), generującego moment dwukierunkowy.

3. Przykład obliczeniowy

Jako przykład obliczeniowy zostanie rozpatrzony wentylator napędzany silnikiem indukcyjnym klatkowym średniego napięcia (MO), zasilany z dwukierunkowego lub jednokierunkowego przeźmiennika częstotliwości (PCSN). Parametry znamionowe silnika są następujące:

1. Typ: Sf560H6-E
2. Moc: $P_N = 1500$ kW, napięcie $U_N = 6$ kV, prąd: $I_N = 170$ A
3. Prędkość obrotowa: $n_N = 994$ obr/min
4. Współczynnik mocy: $\cos\varphi_N = 0,88$
5. Sprawność: $\eta_N = 96,8$ %
6. Prąd rozruchowy: $I_N = 5,5 I_N$
7. Moment rozruchowy: $M_N = 0,7 M_N$
8. Moment krytyczny: $M_{MAX} = 2,0 M_N$
9. Moment bezwładności wirnika: $J_s = 140$ kgm²
10. Dopuszczalny zewnętrzny moment bezwładności i odpowiadający czas rozruchu przy kwadratowej charakterystyce obciążenia: $J_{MAX} = 2940$ kgm², $t = 30,0$ s

Charakterystyka obciążeniowa wentylatora (bezwzględne wartości):

$$M_w = a + b\Omega_w$$

$$a = 0,1 M_N \quad b = 0,9 \frac{M_N}{\Omega_N}$$

M_N, Ω_N – wartości znamionowe silnika.

$$\Omega_N = \frac{\pi n_N}{30} = \frac{\pi 994}{30} = 104,04 [\text{1/s}]$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{1500000}{104,04} \left[\frac{W}{[\text{1/s}]} \right] = 14417,5 [\text{Nm}]$$

$$a = 0,1 \cdot 14417,5 \approx 1442 [\text{Nm}]$$

$$b = 0,9 \frac{14417,5}{104,04} \approx 124,7 [\text{Nm/s}]$$

Zastosowanie jednokierunkowego układu napędowego pozwala kształtować krzywe zmian prędkości obrotowej (n lub kątownej Ω) tylko dla zwiększenia jej wartości. Natomiast zmniejszenie prędkości obrotowej możliwe jest najszybciej, kiedy

$M_s = 0$ – zespół silnik – wentylator hamuje wybiegiem. Wówczas najszybsza zmiana prędkości obrotowej przy ujemnym przyspieszeniu wynika z równania (3)

$$M_s = 0$$

$$-M_w = J_c \frac{d\Omega_w}{dt} \quad (12)$$

$$-a - b\Omega_w = J_c \frac{d\Omega_w}{dt}$$

Zakładając, że wentylator pracował w warunkach odpowiadających znamionowemu obciążeniu silnika, otrzymujemy:

$t < t_0$ (przed wyłączeniem MS)

$$M_s(0) = M_N = M_w$$

$$\Omega_w(0) = \Omega_N \quad (13)$$

Rozwiązując równanie (12) przy warunku (13), otrzymujemy:

dla $t > t_0$

$$\Omega_w t = \left(\Omega_N e^{-\frac{t}{T}} + \frac{a}{b} e^{-\frac{t}{T}} - \frac{a}{b} \right) [\text{1/s}] \quad (14)$$

przy czym:

$$T = \frac{J_c}{b} [\text{s}]$$

Prędkość wentylatora osiągnie wartość 0 (wentylator zatrzymuje się), kiedy $t = t_H$ (czas hamowania)

$$\Omega_w(t_H) = 0$$

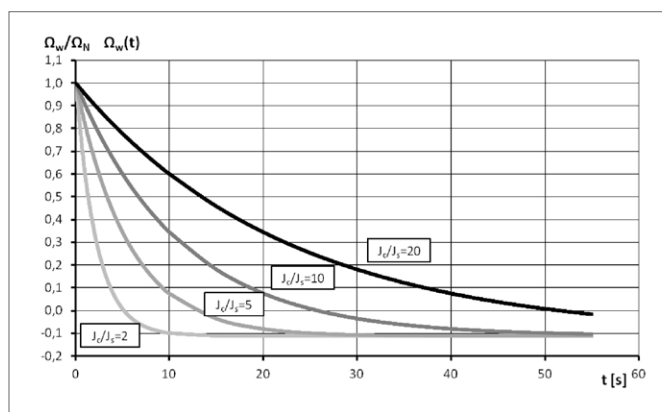
stąd na podstawie (14)

$$t_H = T \ln \frac{\Omega_N b + a}{a} [\text{s}] \quad (15)$$

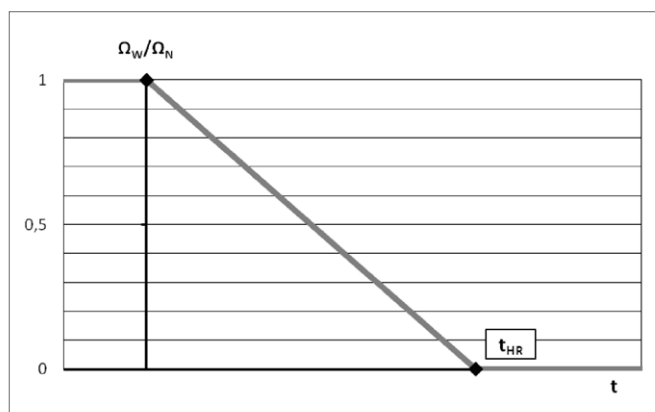
Na rys. 3 zostały przedstawione przebiegi zmian prędkości obrotowej (kątownej) w funkcji czasu dla różnych wartości momentu bezwładności (J_c) na wale silnika. Przyjęto, że moment bezwładności J_c będzie wielokrotnością momentu bezwładności wirnika (J_s) silnika. Założono, że dla czasu $t = 0$ silnik napędowy zostanie wyłączony, a jego moment napędowy M_s przyjmuje wartość równą zeru:

$$M_s(0) = 0$$

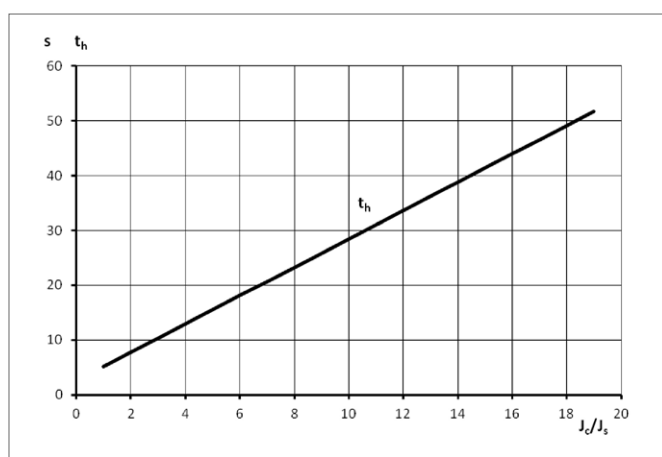
Hamowanie wirnika wentylatora (razem z wirnikiem silnika) będzie wybiegiem. Momentem hamującym jest moment na wale wentylatora (M_w). Czas hamowania t_H , obliczony na podstawie zależności (15), został przedstawiony jako funkcja całkowitego momentu bezwładności na rys. 4. Zakładając, że całkowity moment bezwładności:



Rys. 3. Przebiegi zmian prędkości obrotowej (kątovej) w funkcji czasu dla różnych wartości momentu bezwładności



Rys. 5. Przebieg prędkości podczas hamowania regulowanego.



Rys. 4. Czas hamowania t_H jako funkcja całkowitego momentu bezwładności

$$M_W = M_{SN}, \quad \Omega_W = \Omega_N \quad (19)$$

to

$$\Omega_W(t) = \Omega_N - kt \quad (20)$$

przy czym:

t – czas [s]

$$k = \frac{\Omega_N}{t_{HR}} \quad \Omega_N - [1/s] \quad (21)$$

t_H – czas hamowania (od $\Omega_W = \Omega_N$ do $\Omega_W = 0$) podczas hamowania regulowanego.

Przy takich założeniach równanie (3) będzie miało postać:

$$M_S(t) - M_S(t) = J_C \frac{d}{dt} (\Omega_N - kt) \quad (22)$$

$$M_S(t) - a - b(\Omega_N - kt) = J_C(-k)$$

$$M_S(t) = a + b\Omega_N - bkt - J_C k$$

$$M_S(t) = M_N - bkt - J_C k \quad (23)$$

Na rys. 6 został przedstawiony przebieg prędkości w funkcji czasu przy hamowaniu regulowanym momentem silnika. Założono, że silnik napędzający wentylator pracował w warunkach znamionowych przy całkowitym momencie bezwładności (J_C) na wale:

$$J_C = 10 J_s \quad (24)$$

Wymagany czas hamowania wynosi $t_{HR} = 10$ s. Na rys. 7 został przedstawiony przebieg momentu silnika w funkcji czasu. Przebieg ten, według (23), powinien zapewnić wymaganą (i przedstawioną na rys. 6) funkcję prędkości zależną od czasu. Podstawiając do (23) $t = 0$ s, otrzymujemy początkowy moment hamujący silnika, a dla czasu hamowania:

$$J_c = 20J_s$$

Czas zatrzymania się wentylatora wynosi:

$$t_H = 51,7 \text{ s}$$

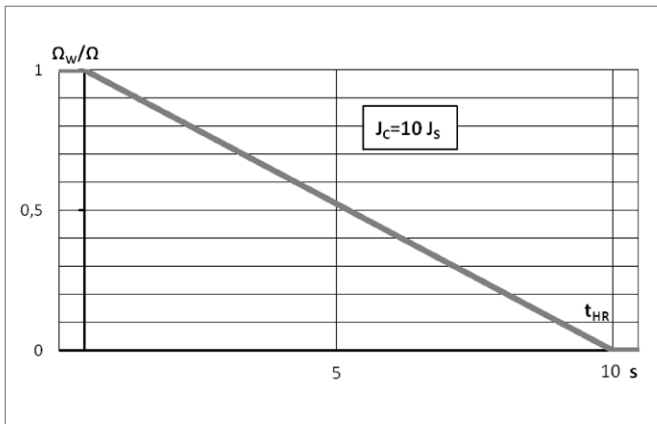
Silnik napędowy wentylatora może być zasilany poprzez przeziennik częstotliwości (PC) (w tym przypadku jest to przeziennik częstotliwości średniego napięcia 6 kV – PCSN). Jeżeli przeziennik PCSN posiada możliwość regulowanego hamowania silnikiem napędowym wentylatora, to zależność prędkości obrotowej od czasu przy hamowaniu

$$\Omega_w = f(t) \quad (17)$$

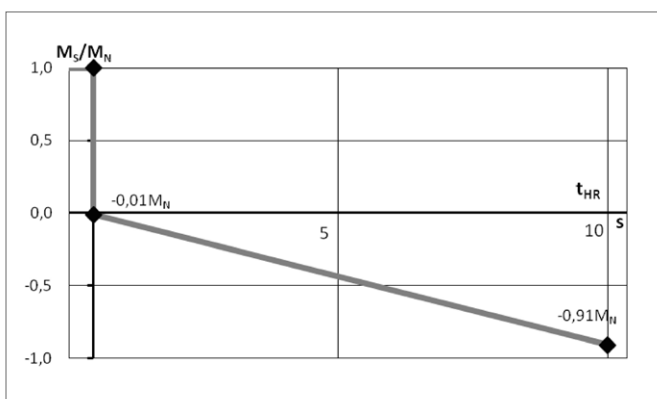
może być kształtowana według wymagań technologii, w której ten wentylator pracuje. Zakładając, że przebieg prędkości w funkcji czasu ma być liniowy, zależność (17) ma postać:

$$\Omega_w = \Omega_1 - kt \quad (18)$$

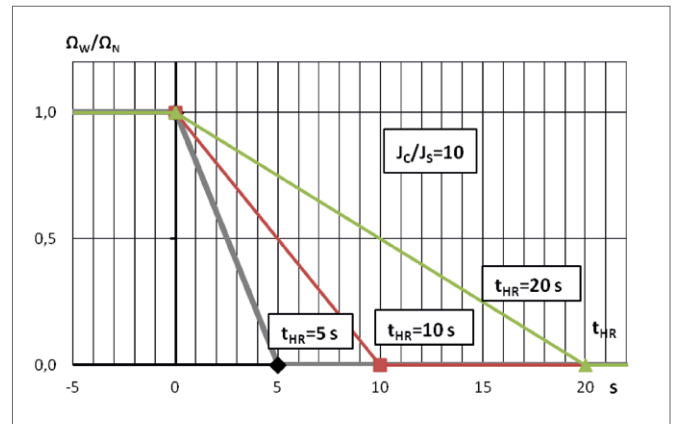
Jeżeli założymy, że wentylator pracuje w warunkach znamionowych obciążenia silnika napędowego:



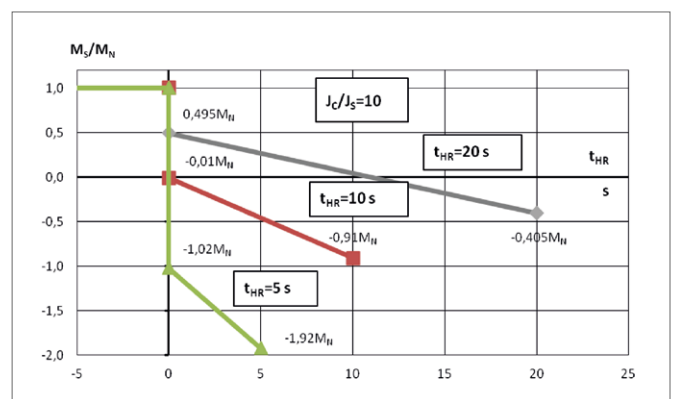
Rys. 6. Przebieg prędkości kątowej wentylatora przy hamowaniu regulowanym dla $t_{HR} = 10 \text{ s}$, $J_C = 10 J_s$



Rys. 7. Przebieg momentu hamującego silnika dla uzyskania przebiegu prędkości kątowej na rys. 6



Rys. 8. Przebiegi prędkości kątowej wentylatora (Ω_w/Ω_N) w funkcji czasu dla różnych czasów hamowania regulowanego (t_{HR})



Rys. 9. Przebieg momentu silnika (M_s/M_N) w funkcji czasu dla różnych czasów hamowania regulowanego (t_{HR})

$$t_{HR} = 10 \text{ s}$$

uzyskamy wartość momentu hamującego kończącego hamowanie.

$$M_s(0) = M_N - J_C k$$

$$M_s(t_{HR}) = M_N - bkt_{HR} - J_C k$$

Na rys. 8 zostały przedstawione przebiegi prędkości kątowej wentylatora przy regulowanym hamowaniu, przy założonych trzech wartościach t_{HR} :

$$t_{HR} = 5 \text{ s}$$

$$t_{HR} = 10 \text{ s}$$

$$t_{HR} = 20 \text{ s}$$

Do osiągnięcia tych przebiegów konieczne jest uzyskanie odpowiednich przebiegów momentu regulowanego silnika. Zgodnie z równaniem (23) przebiegi $M_s(t)/M_N = f(t)$ mają postać przedstawioną na rys. 9. Wartość początkowa ($M_s(0)$) oraz końcowa ($M_s(t_{HR})$) jest obliczona dla założonej wartości J_C/J_s . Została przyjęta następująco:

$$J_C/J_s = 10$$

Zakładając czas regulowanego hamowania, np.

$$t_{HR} = 10 \text{ s}$$

Wyznaczono przebiegi $M_s(0)$ i ($M_s(t_{HR})$) jako funkcję momentu bezwładności J_C na wale silnika:

$$M_s(0)/M_N = f_1(J_C/J_s) \quad (24)$$

$$M_s(t_{HR})/M_N = f_2(J_C/J_s) \quad (25)$$

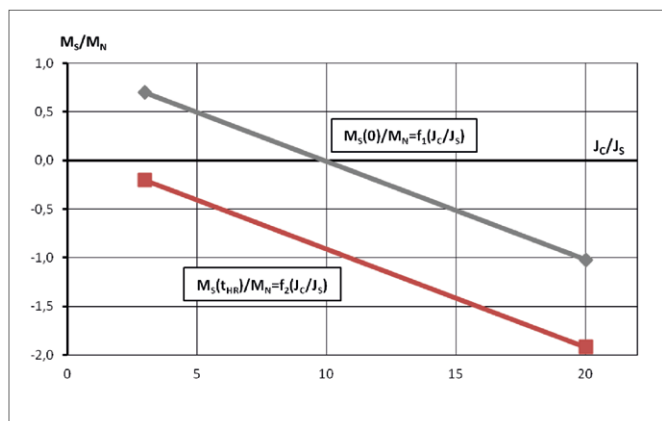
Obie te funkcje zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 10.

Podobnie wyznaczono funkcje tych momentów w postaci zależności od regulowanego czasu hamowania (t_{HR}) przy założonym momencie bezwładności na wale silnika:

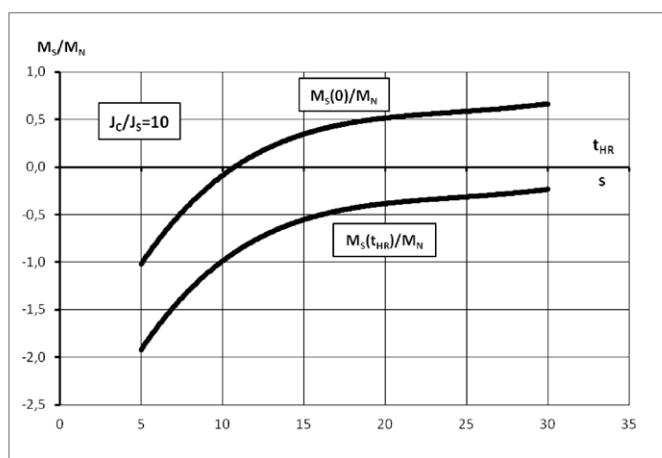
$$J_C/J_s = 10$$

$$M_s(0)/M_N = f_3(J_C/J_s) \quad (26)$$

$$M_s(t_{HR})/M_N = f_4(J_C/J_s) \quad (27)$$



Rys. 10. Przebieg początkowego momentu hamującego silnika ($M_s(0)/M_N$) i momentu końcowego hamującego ($M_s(t_{HR})/M_N$) dla czasu hamowania $t_{HR} = 10$ s, w zależności od momentu bezwładności całkowitej (J_c/J_s) na wale silnika



Rys. 11. Przebieg momentu początkowego ($M_s(0)/M_N$) i końcowego ($M_s(t_{HR})/M_N$) w zależności od czasu hamowania t_{HR} przy momencie bezwładności $J_c/J_s = 10$

w sposób graficzny zostały przedstawione na rys. 11 w zakresie czasów t_{HR} :

$$5s \leq t_{HR} \leq 30s$$

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie powyższych przykładów obliczeń można stwierdzić, że układ napędowy z regulowaną prędkością kątową w stanach dynamicznych (rozruch i hamowanie) powinien posiadać możliwości zmian momentu napędowego silnika w obu kierunkach. Takie możliwości pozwalają w pełni dopasować punkty pracy wentylatora do wymagań technologii [4]. Zjawiska technologii, w której pracuje taki układ napędowy z wentylatorem, mogą uzyskiwać właściwości o całkiem nowej jakości, korzystnej dla całego procesu produkcyjnego.

Podany w rozdziale 3 sposób opisu matematycznego można stosować dla dowolnej prędkości obrotowej wymaganego punktu pracy. W przykładzie przyjęto, że jest to punkt pracy znamionowy. Również do rozważań można przyjąć dowolny przebieg:

$$M_w = f(\Omega)$$

Względę mechaniczne (np. sprzęgło pomiędzy silnikiem a wentylatorem lub przekładnia zwiększająca lub zmniejszająca-

ca prędkość kątową) mogą dopuścić określoną wartość dopuszczalną momentu na wale silnika (M_{dop}). Wówczas do równania (23) należy dołączyć ograniczenie

$$M_s(t) \leq M_{dop}$$

i analizować podobnie przebiegi prędkości kątowej i momentu napędowego. Oczywiście, nie wszystkie układy napędowe wentylatora muszą spełniać warunek rozwijania dwukierunkowego momentu napędowego. Dla wentylatorów o dużym momencie bezwładności

$$J_w \gg J_s$$

i wymaganych czasach t_{HR} można sprawdzić, czy dany układ napędowy spełnia założone wymagania.


Współczesna technika napędowa umożliwia stosowanie takich układów bez względu na moc silnika i napięcie jego zasilania. W praktyce obecnie są dostępne przemienniki częstotliwości nawet największych mocy i stosowanych napięć o topologii:

- przemiennik częstotliwości z obwodem DC typu źródło prądu (falownik prądu) z regulowanym układem wejściowym;
- przemiennik częstotliwości z obwodem DC typu źródło napięcia (falownik napięcia) z regulowanym obwodem wejściowym.

Właściwości techniczne i eksploatacyjne wymienionych powyżej typów przemienników częstotliwości spowodowały, że najwięcej aplikacji w kraju opartych jest na topologii z obwodem DC typu źródło prądu (falownik prądu) z regulowanym układem wejściowym [4, 5].

Literatura

- [1] KOCZARA W., SZULC Z.: *Nowe technologie i sterowanie obwodów wejściowych PCSN umożliwiające ich szerokie zastosowanie*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 79/2008.
- [2] KOCZARA W., SZULC Z.: *Poprawa efektywności energetycznej układu napędowego z silnikiem indukcyjnym średniego napięcia poprzez jego zasilanie z przemiennika częstotliwości*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 73/2005.
- [3] SIEDLECKI S., SZULC Z.: *Dobór i efekty techniczno-ekonomiczne regulowanych układów napędowych z PCSN 6 kV do maszyn przepływowych na przykładzie bloku 200 MW*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrownie Ciepłe”, Słok k. Bełchatowa, 5–7 marca 2013.
- [4] SZULC Z.: *Poprawa parametrów efektywności energetycznej układu napędowego wentylatora poprzez zastosowanie inteligentnego przemiennika częstotliwości*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 95(2)/2012.
- [5] KUBERA T., SZULC Z.: *Praca w ramach projektu badawczego nr 3139/BT02/2011*. Warszawa 2012–2013.
- [6] Allen-Bradley Bulletin 1 1998.

 dr inż. Zbigniew Szulc – Zakład Napędu Elektrycznego, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego, Politechnika Warszawska