

# Efektywność energetyczna górniczej stacji wentylatorowej jako podstawa wyboru urządzeń

Emil Marciniak, Andrzej Podsędkowski, Andrzej Morawski

Zapewnienie sprawnej wentylacji wyrobisk jest istotnym elementem wpływającym na efektywność i bezpieczeństwo prowadzonego wydobycia.

Wymiana powietrza zapewnia utrzymanie wymaganego składu powietrza oraz temperatury w miejscu prowadzonego wydobycia. Kolejnym zadaniem stawianym wentylacji jest odprowadzenie gazów wytwarzanych poprzez urządzenia wykorzystywane w procesie wydobywczym. Wyrobiska są przewietrzane w taki sposób, aby utrzymać zawartość tlenu nie mniejszą niż 19% objętości, a stężenie gazów było nie większe niż [1]:

- dwutlenek węgla 1%,
- tlenek węgla 0,0026%,
- tlenek azotu 0,00026%,
- dwutlenek siarki 0,000075%,
- siarkowodór 0,0007%.

Podsumowując, systemy wentylacyjne mają za zadanie zapewnienie odpowiednich parametrów atmosfery w obszarze wydobycia.

Za zapewnienie odpowiedniej wymiany powietrza są odpowiedzialne wentylatory zabudowane w napowietrznych stacjach wentylacyjnych. Urządzenia, wchodzące w skład stacji wentylacyjnych, tj. wentylatory, silniki elektryczne, przemienniki częstotliwości oraz urządzenia peryferyjne, muszą się charakteryzować wysoką niezawodnością. Szczególną uwagę należy zwrócić na wysoką dyspozycyjność, niską emisję hałasu i wysoką sprawność eksploatacyjną. Nieustanne powiększanie obszaru wydobycia prowadzi do zmian oporów przepływu oraz wymaganej

Aby zobrazować parametry przepływowe stacji wentylacyjnej, poniżej przedstawiono wymagania stawiane nowej stacji wentylatorowej dla szybu „Bolesław” w KGHM, ZG Lubin.

Ilość wentylatorów	3 szt.
System pracy	2 szt. pracujące + 1 szt. rezerwowa
Wydajność stacji wentylacyjnej	3 240 000 m <sup>3</sup> /h
Wydajność pojedynczego wentylatora	1 620 000 m <sup>3</sup> /h
Śpiętrzenie	5000 Pa
Temperatura przetłaczanego czynnika	26° C
Gęstość czynnika	1,126 kg/m <sup>3</sup>

Sprawność wentylatorów poprawnie dopasowanych do potrzeb instalacji przy starannie dobranej geometrii układu przepływowego osiąga 85-86%. Korzystając z zależności (1), na podstawie wydajności, spiętrzenia oraz sprawności, można wyznaczyć moc użyteczną, potrzebną do napędzenia wentylatora.

$$N_u = \frac{Q \cdot \Delta p_c}{\eta} \text{ [kW]} \quad (1)$$

gdzie:

Q – wydajność objętościowa [m<sup>3</sup>/s]

$\Delta p_c$  – spiętrzenie całkowite [kPa]

$\eta$  – sprawność [-]

Na podstawie zależności (1) przy założeniu, że sprawność wynosi 85%, wyliczono moc potrzebną do napędu pojedynczego wentylatora na 2647 kW. Biorąc pod uwagę pracę dwóch wentylatorów, moc potrzebna do zasilania tych urządzeń wynosi 5294 kW.

Lp.		jednostka					
1	sprawność	%	85,0	82,5	80,0	77,5	75,0
2	moc 1 szt. wentylatora	kW	2647	2727	2813	2903	3000
3	moc 2 szt. wentylatorów	kW	5294	5455	5625	5806	6000
4	czas pracy centrali w roku	h	8760				
5	energia zużyta w roku	MWh	46376	47782	49275	50865	52560
6	różnica zużycia energii	MWh	-	1406	2899	4489	6184
7	koszty zaniżenia sprawności	PLN	-	421800	869700	1346700	1855200

Tabela 1

wydajności urządzeń wentylacyjnych co powinno być uwzględniane przy projektowaniu i modernizacjach stacji wentylacyjnych.

W celu przedstawienia, jak istotne jest skrupulatne dopasowanie parametrów przepływowych, będące warunkiem uzyskania wysokiej sprawności, w tabeli 1 przedstawiono

zmienność zapotrzebowania energetycznego wentylatorów w zależności od zmiany sprawności wentylatorów.

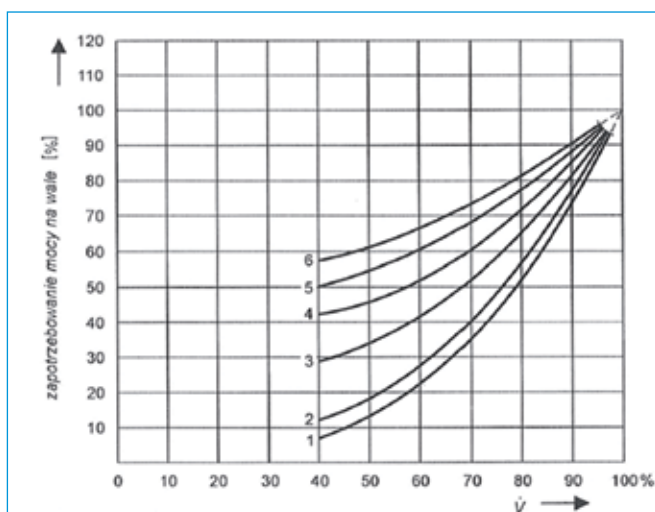
Przyjmując koszt zakupu energii elektrycznej 300 PLN/MWh oraz zakładając, że po przeprowadzonej modernizacji zostanie uzyskany wzrost sprawności centrali wentylacyjnej, wynoszący 5%, w okresie rocznej eksploatacji zostanie wygenerowany zysk, wynoszący 869 700 PLN/rok.

Przedstawiona kalkulacja jest jedynie przybliżoną analizą zysku generowanego poprzez poprawne dopasowanie stacji wentylacyjnej do zapotrzebowania instalacji wentylacyjnej. Natomiast obrazuje, że koszt poprawnie wykonanej modernizacji stacji wentylatorów zwraca się po kilku latach eksploatacji.

W układach przewietrzania kopalń są powszechnie stosowane zarówno wentylatory osiowe, jak i promieniowe. Dla aplikacji charakteryzujących się niskimi oporami przepływu są dedykowane wentylatory osiowe, natomiast dla instalacji, w których należy pokonać wyższe opory aerodynamiczne, preferowane jest stosowanie wentylatorów promieniowych.

Prócz poprawnego dopasowania wentylatora do zapotrzebowania instalacji w punkcie nominalnym, przy obliczaniu sprawności eksploatacyjnej należy wziąć pod uwagę pracę stacji wentylacyjnej przy zmianie parametrów przepływowych. Zmiana parametrów może być spowodowana przerwami w wydobywaniu lub też rozbudową bądź ograniczeniem obszaru wydobywania. Na sprawność wentylatorów przy zaniżeniu parametrów wpływa typ zastosowanego układu regulacji wydajności.

Rysunek 1 przedstawia, jak wpływa rodzaj zastosowanego układu regulacji na zmianę zapotrzebowania mocy w funkcji wydajności objętościowej. Z porównania powszechnie stosowanych układów regulacyjnych wynika, że zastosowanie regulacji poprzez zmianę prędkości obrotowej wentylatora zapewnia najmniejsze zużycie mocy. Do niedawna najpowszechniej stosowanym systemem regulacji parametrów przepływowych były układy, wykorzystujące kierownice



Rys. 1 Zależność zapotrzebowania mocy dla różnych metod regulacji od zmiany wydajności w procentach wydajności nominalnej (1 – zmiana prędkości obrotowej, 2 – zmiana kąta ustawienia łopatek wirników osiowych, 3 – kierownica promieniowa, 4 – kierownica osiowa, 5 – kierownica żaluzjowa, 6 – układ dławieniowy) [2]

wstępne. Największe zużycie energii występuje przy zastosowaniu dławienia. Dla punktu określonego poprzez 40% wydajności nominalnej, zapotrzebowanie mocy wentylatora przy zastosowaniu regulacji zmianą prędkości obrotowej stanowi 7% mocy nominalnej, dla regulacji dławieniowej wymagane jest aż 58% tej mocy, a dla najpowszechniej stosowanej regulacji kierownicą osiową 42%.

Stosowanie kierownic wstępnych było podyktowane niedostępnością przemienników częstotliwości oraz wysokimi kosztami, związanymi z zakupem i instalacją falowników. Obecnie zanotowano znaczny spadek cen przemienników częstotliwości, a jednocześnie wielu producentów wyspecjalizowało się w produkcji tych urządzeń. Dlatego też istnieje dostępność przemienników nawet dla nietypowych aplikacji. Z tych względów obecnie, gdy cena energii elektrycznej znacznie wzrosła, przy większości inwestycji obejmujących dostawy wentylatorów preferowane są układy regulacji parametrów, poprzez zmianę prędkości obrotowej z wykorzystaniem przemienników częstotliwości.

Zgodnie z przepisami górniczymi stacja musi zapewnić możliwość odwrócenia ciągu, tzw. rewersji, to znaczy tłoczenia świeżego powietrza do szybu w zakresie 60% wydajności nominalnej wentylatorów, przy czym praca w rewersji jest realizowana w sytuacji wyjątkowej i trwa krótko. Wymagany czas przejścia na pracę w rewersji nie powinien być dłuższy niż 20 minut. W wentylatorach promieniowych rewersję uzyskuje się poprzez system kanałów i zasuw. W wentylatorach osiowych poza możliwością zastosowania podobnego układu kanałów i zasuw rewersję można uzyskać poprzez obrót łopatek wirnika o ok. 90°. Zmiana kierunku obrotów wentylatora osiowego nie zapewnia wystarczającej wydajności przy pracy w rewersji.

Dalszym czynnikiem, który należy brać pod uwagę przy wyborze wentylatora, jest hałas emitowany przez niego. Wielkość wentylatora i znaczne spiętrzenia wentylatorów górniczych powodowały dawniej, gdy nie stosowano tłumików hałasu, że wentylatory kopalniane słychać było w odległości kilkunastu kilometrów od szybu. Obecnie tłumik hałasu jest standardowym wyposażeniem wentylatora, a jego cena jest bliska cenie wentylatora. Tu należy zwrócić uwagę na to, że wentylatory osiowe są o 8-12 dB głośniejsze od wentylatorów promieniowych o tych samych parametrach.

## Wentylatory promieniowe

Wentylatory promieniowe są powszechnie stosowane w wielu dziedzinach przemysłu. Możemy je spotkać w wielu aplikacjach, tam gdzie jest wymagane wysokie spiętrzenie przy równoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności. Są to urządzenia instalowane od lat 20. ubiegłego wieku w elektrowniach, elektrociepłowniach, przemyśle chemicznym, petrochemicznym, cementowniach, hutach oraz w wielu innych dziedzinach przemysłu.

Cechą charakterystyczną wentylatorów promieniowych jest prostota konstrukcji, jak również wysoka odporność na wycieranie oraz oklejanie wirników pyłem. Dzięki temu cechuje je wysoka pewność ruchowa i niskie koszty utrzy-

mania wentylatorów w ruchu. Dodatkowo, stosowane są rozwiązania konstrukcyjne, które nie wpływają znacząco na koszt wykonania urządzenia, gdzie są odpowiednio dobierane kąty spływu łopatek wirników, w celu wyeliminowania zjawiska oklejania łopatek wirnika pyłem. Spiętrzenie i wydajność wentylatorów promieniowych można podnieść przez stosunkowo prosty zabieg niewielkiego przedłużenia łopatek wirnika.

Stosowane są dwa podstawowe typy wentylatorów promieniowych, tj.:

- wentylatory jednostronnie ssące,
- wentylatory dwustronnie ssące.



Rys. 2 Fotografia z fazy montażowej wentylatora promieniowego dwustronnie ssącego o mocy 2,6 MW

Pierwsze z nich znajdują zastosowanie w aplikacjach, gdzie zależy użytkownikowi końcowemu na wysokim spiętrzeniu przy relatywnie niskiej wydajności. Natomiast wentylatory dwustronnie ssące charakteryzują się wysoką wydajnością. Wirnik takiego wentylatora jest nazywany w literaturze „back-to-back”, a takie rozwiązanie stosuje się nie tylko w wentylatorach, lecz można znaleźć takie konstrukcje w pompach i sprężarkach.

Dla prezentowanych parametrów przepływowych stacji wentylatorowej szybu „Bolesław” zasadne jest zastosowanie wentylatora dwustronnie ssącego (rys. 2), gdyż w tym konkretnym przypadku istnieje zapotrzebowanie na wymuszenie wysokiego przepływu, tj. 450 m<sup>3</sup>/s (dla

jednego wentylatora) przy umiarkowanym spiętrzeniu – 5000 Pa.

W tabeli 2 przedstawiono porównanie podstawowych parametrów technicznych wentylatora jednostronnie i dwustronnie ssącego dla wymaganej wydajności i spiętrzenia przy gęstości powietrza  $\rho = 1,126 \text{ kg/m}^3$ .

Po analizie parametrów podanych w tabeli widoczne są korzyści, wynikające z zastosowania wentylatora dwustronnie ssącego.

W przypadku wentylatora dwustronnie ssącego występują mniejsze obciążenia łożysk. Z jednej strony dotyczy to niższych reakcji poprzecznych, związanych z mniejszą masą wirnika oraz równomiernym obciążeniem obu węzłów łożyskowych. Z drugiej zaś strony w konstrukcji wirnika dwustronnego siła osiowa jest równoważona, natomiast w wirniku jednostronnie ssącym jest skierowana w jednym kierunku i wynosi ~59 kN. Te dwa aspekty w sposób znaczący wpływają na zwiększenie trwałości łożysk przy wentylatorach dwustronnie ssących.

Na korzyść konstrukcji dwustronnej przemawia niższe położenie osi wału nad poziomem gruntu oraz mniejsza średnica i masa wirnika. Ma to istotne znaczenie dla sprawnego prowadzenia czynności eksploatacyjnych, tj. wymiany oleju, uzupełniania smaru zaporowego, kontroli drgań i temperatury.

Mniejsze gabaryty zabudowy wpływają korzystnie na skrócenie czasów potrzebnych na przeprowadzenie serwisu. Producenci wentylatorów dwustronnych deklarują, że przy prawidłowo prowadzonej eksploatacji uzyskuje się dziesięcioletnią trwałość łożysk oraz 30-letnią trwałość wirników.

Brak tarcia powietrza pomiędzy tarczą nośną a tylną ścianą obudowy spiralnej powoduje, że wentylatory dwustronnie ssące o podobnej geometrii układu łopatkowego mają sprawność wyższą od 0,5% do 1%.

Wentylator dwustronnie ssący będzie napędzany silnikiem o prędkości obrotowej ok. 735 obr/min, co umożliwi zastosowanie typowego silnika indukcyjnego asynchronicznego, który byłby zdecydowanie tańszy niż silnik o prędkości 350 obr/min, który byłby nietypowym silnikiem synchronicznym, znacznie droższym i większym.

Pewną niedogodnością związaną z konstrukcją wentylatorów dwustronnie ssących jest konieczność wykonania

Lp.	Porównywany parametr	Jednostka	Wentylator jednostronnie ssący	Wentylator dwustronnie ssący
1.	Średnica zewnętrzna	m	5,700	3,155
2.	Masa wirnika	kg	11 000	5500
3.	Prędkość obrotowa	obr/min	350	735
4.	Siła osiowa	kN	59,250	~ 0,000
5.	Wysokość osi went.	m	6,800	3,800

Tabela 2

rozgałęzienia kanału wlotowego bezpośrednio przed wlotem do urządzenia. Jest to spowodowane tym, że wentylatory te mają dwa wloty kolanowe.

Wentylatory promieniowe nie mają możliwości uzyskania wstecznego ciągu, czyli tzw. rewersji. Uzyskanie wstecznego przepływu można zrealizować jedynie za pomocą dość kosztownego systemu kanałów i zasuw.

## Wentylatory osiowe

Dla porównania wielkości wentylator osiowy dla parametrów przyjętych dla nowej stacji wentylatorowej dla szybu „Bolesław” miałby średnicę wirnika ok. 3,4 m i pracowałby przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Oznacza to, że prędkość obwodowa końców łopatek wynosi 178 m/s, co oznacza, że łopatki są znacznie wyężone.

Wentylatory osiowe [3] wymagają długiego dyfuzora, w którym odzyskiwana jest energia kinetyczna strumienia powietrza wypływającego z układu łopatkowego. Ciśnienie dynamiczne strumienia na wylocie z wirnika wynosi 3234 Pa, co stanowi ok. 65% spiętrzenia wentylatora. Długość dyfuzora, pozwalającego na odzysk tej energii, powinna wynieść ok. 22 m. W tej sytuacji cały wentylator z układem łopatkowym, skrzynią wlotową i silnikiem miałby długość ok. 31 m.

W wentylatorach osiowych można uzyskać odwrotny kierunek przepływu albo przez zmianę ustawienia łopatek wirnika (ich obrót o ok. 90°) lub zmianę kierunku obrotów wirnika, co jest proste w wykonaniu, lecz nie pozwala na uzyskanie dostatecznie dużej wydajności.

Poprzez zmianę kierunku obrotów w normalnym, wysokosprawnym wentylatorze można uzyskać wydajność w kierunku wstecznym w granicach 38-45% nominalnej wydajności. Wyższą wydajność przepływu wstecznego wywołaną przez zmianę kierunku obrotów można uzyskać w niskosprawnym wentylatorach o małej krzywiznie łopatek wirnika, pracujących bez kierownicy. Sprawność energetyczna takich wentylatorów przy pracy w normalnym kierunku przepływu jest na poziomie 55-60%, co jest nie do przyjęcia w tak dużych jednostkach.

Wymaganą wydajność przepływu wstecznego w wentylatorze osiowym można uzyskać poprzez obrócenie łopatek o ok. 90° wokół ich osi. Wówczas wentylator będzie pracował w układzie kierownica – wirnik, a napływ na łopatki wirnika będzie od strony ostrej krawędzi łopatki. Niska sprawność wentylatora przy takiej pracy nie jest istotna, gdyż czas pracy w rewersji jest pomijalnie mały. Problemem jest jedynie skomplikowany napęd zmiany kąta ustawienia łopatek. Z reguły wymaga on sporych nakładów na konserwację i pomimo tego awarie wentylatorów osiowych z takim systemem uzyskiwania rewersji są kilkakrotnie częstsze niż awarie wentylatorów promieniowych. Z tych względów w wentylatorach osiowych rewersję uzyskuje się zazwyczaj, podobnie jak w wentylatorach promieniowych, przez budowę systemu kanałów i zasuw lub też poprzez instalowanie dodatkowego wentylatora o uproszczonej konstrukcji, przeznaczonego wyłącznie do uzyskiwania ciągu wstecznego.

## Równoległa praca wentylatorów

Równoległa praca wentylatorów występuje wówczas, gdy czynnik jest doprowadzany do kilku wentylatorów poprzez wspólny rurociąg, który poprzez rozgałęzienie rozprowadza medium do każdego wentylatora, gdzie następuje przyrost energii. Po przejściu przez wentylator czynnik łączy się w kolektorze tłocznym lub, jak np. w przypadku stacji wentylatorowych kopalni, wydmuchiwany jest bezpośrednio do atmosfery.

W celu zapewnienia równomiernego obciążenia wentylatorów należy zapewnić równy opór instalacji na odcinku od rozgałęzienia do wentylatora oraz po stronie tłocznej.

Warunki pracy układu dwóch wentylatorów pracujących w układzie równoległym określają następujące zależności [2]:

$$\Delta p_{c1} = \Delta p_{c2} = \Delta p_{(c1+2)} \quad (2)$$

$$V_1 + V_2 = V_{(1+2)} \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta p_c$  – spiętrzenie całkowite,

$V$  – wydajność objętościowa.

Równoległa praca maszyn sprężających jest stosowana wówczas, gdy wymagane jest uzyskanie wysokiej wydajności przepływu lub możliwość zapewnienia rezerwy na okres remontu lub awarii jednego z wentylatorów.

W zastosowaniach przemysłowych często pojawiają się trudności eksploatacyjne, związane z nierównomiernym obciążeniem wentylatorów pracujących w układzie równoległym, co jest skutkiem nierównomiernego rozprowadzenia transportowanego gazu. Nierównomierne obciążenie maszyn występuje wówczas, gdy w kanałach rozprowadzających czynnik występuje nierównomierność oporów instalacji pomiędzy poszczególnymi nitkami doprowadzającymi medium do wentylatora. Różnice oporów zazwyczaj wynikają z różnic konstrukcyjnych poszczególnych kanałów, z nierównomiernego zapylenia filtrów, niepełnego otwarcia klap odcinających lub poprzez przytkanie wymienników ciepła.

Biorąc pod uwagę fakt, iż w stacjach wentylatorowych wykorzystywanych do przewietrzania kopalń występuje konieczność przetłoczenia znacznych ilości gazów, zabudowywane wentylatory pracują w układzie równoległym. W wentylatorach osiowych niewielka zmiana oporów na poszczególnych nitkach układu równoległego powoduje wywołanie zjawiska tzw. przepychania. Należy zwrócić uwagę na to, że wentylatory promieniowe są mniej podatne na zaburzenia pracy, wynikające z nierównomiernego obciążenia niż wentylatory osiowe. Wynika to z tego, że w wentylatorach osiowych przebieg zmian spiętrzenia w funkcji wydajności jest bardziej „stromy” – niewielka zmiana spiętrzenia powoduje dużą zmianę wydajności, wskutek czego zakres stabilnej pracy wentylatora osiowego jest znacznie mniejszy. Przy spadku wydajności, gdy spiętrzenie wentylatora zbliża się do wierzchołka charakterystyki, może dojść do sytuacji, w której wskutek asymetrii oporów w jakimś momencie chwilowy opór w jednym

z wentylatorów przekroczy wierzchołek charakterystyki i wówczas jego punkt pracy przeskoczy na niestabilną część charakterystyki, w tzw. zakres pompowania. Łączna wydajność wentylatorów, a więc i opór instalacji zmaleje, lecz nie na tyle, by wyprowadzić wentylator pompujący z niestabilnego zakresu pracy, gdyż wentylator współpracujący dalej będzie tłoczył zwiększoną ilość gazu, blokując przepływ z wentylatora „pompującego”.

Aby zapewnić stabilną pracę wentylatorów osiowych pracujących równolegle, należy zadbać, aby układ kanałów zapewniał jednakowe opory wszystkich gałęzi oraz aby wszystkie wentylatory miały jednakowe charakterystyki spiętrzenia. Do niestabilnej pracy mogą doprowadzić różnice w kątach ustawienia łopatek, wytarciu łopatek lub w wielkości szczeliny nadłopatkowej.

### Układy napędowe kopalnianej stacji wentylatorowej

Układ napędowy wentylatora przewietrzania kopalni ma za zadanie uzyskanie zadanego wydatku wentylatora. Regulacja wentylatora wynika z potrzeby dopasowania wydatku wentylatora do aktualnych potrzeb wobec zmiennych warunków przetłaczania powietrza, wyrównania obciążenia wentylatorów pracujących równolegle na wspólny kanał oraz koordynacji pracy kilku stacji wentylatorowych (tłoczących i wyciągowych) dla prawidłowej pracy całego układu wentylacji.

W stacji wentylatorowej typowo zabudowane są trzy wentylatory, z czego dwa pracują w sposób ciągły, a trzeci stanowi rezerwę.

Każdy wentylator jest wyposażony we własny niezależny układ napędowy. Zastosowanie przemienników częstotliwości zapewnia ciągłą, precyzyjną i energetycznie najkorzystniejszą regulację spośród obecnie dostępnych rozwiązań (rys. 1). Tradycyjnie do napędów wentylatorów przemysłowych stosowano silniki indukcyjne klatkowe (SCIM, ang. *squirrel cage induction motor*). Każdy z silników zasilany jest poprzez przemiennik częstotliwości (falownik) odpowiedniego typu dla uzyskania wymaganego zakresu płynnej regulacji prędkości oraz kontrolowanego rozruchu z ograniczeniem prądu rozruchowego, ewentualnie hamowania elektrycznego do obniżenia prędkości lub zatrzymania wentylatora w zadanym czasie. W napędach wentylatorów dużej mocy, zwłaszcza powyżej 1 MW, stosowane są przemienniki częstotliwości (falowniki) dużej mocy na napięcie średnie 6000 V.

Poszukując napędów o wyższej sprawności, można rozważyć zastosowanie wyżej sprawnych silników z magnesami trwałymi (PMM, ang. *permanent magnet motor*). Ewentualne zastąpienie silników SCIM silnikami PMM do napędów wentylatorów wymaga rozważenia znaczenia wad i zalet każdego napędu dla stacji wentylatorowej, w szczególności łącznej sprawności energetycznej całego układu napędowego.

Kierując się sprawnością energetyczną przy wyborze rozwiązań napędowych, należy pamiętać, że sprawność znamionowa silników różnych konstrukcji nie odpowiada ich rzeczywistej sprawności przy zmiennym obciążeniu

i przy zasilaniu przemiennikowym. Niewielkie różnice sprawności porównywanych silników w dobrych wykonaniach, obecnie nawet na poziomie ok. 1pp, wymagają szczegółowego uwzględnienia drobniejszych strat mocy, w tym dodatkowych strat mocy w silniku, ale także w torze zasilania, np. w transformatorach i filtrach, wynikające z obecności składowych harmonicznych napięcia i prądu zasilania silnika oraz zasilania przemiennika. Ilość harmonicznych napięcia i prądu zależy od typu, konstrukcji i wyposażenia zastosowanego przemiennika częstotliwości (także od parametrów sieci zasilającej).

Za użyciem silnika PMM przemawia wyższa sprawność energetyczna, znamionowa na poziomie ok. 98%, oraz wysoki współczynnik mocy zasilania, rzędu 0,99. Do wad tego wykonania należy brak możliwości rozruchu z sieci (np. jeżeli przewiduje się stan pracy w bypas przemiennika), praktycznie niedostępny zakres regulacji prędkości powyżej prędkości znamionowej, mała odporność na przeciążenia, ograniczenie możliwości hamowania elektrycznego przy użyciu dostępnych przemienników, trudniejszy serwis wymagający specjalistycznego oprzyrządowania oraz relatywnie wysoka cena. Zwiększenie prędkości silnika ponad prędkość znamionową jest typowym stanem pracy napędu przemiennikowego wentylatora z silnikiem indukcyjnym klatkowym i może być zastosowane, w razie potrzeby, w układzie przewietrzania kopalni. Ten zakres regulacji nie jest dostępny w napędzie z silnikiem PMM. Silniki PMM dużej mocy o małej liczbie par biegunów są oferowane przez mniej licznych dostawców, podobnie jak przemienniki dla silników PMM. Stosowanie silników PMM jest szczególnie uzasadnione w wybranych aplikacjach przemysłowych, np. jako silniki o bardzo niskiej prędkości. Mogą być zatem odpowiednie w napędach wentylatorów wolnoobrotowych, wymagających silników prądu przemiennego o dużej liczbie par biegunów.

Różnica we współczynnikach mocy zasilania silników różnych typów nie ma znaczenia w układzie z przemiennikiem. Moc bierna pobierana przez silnik klatkowy jest wytwarzana w układzie falownika, zatem moc bierna silnika SCIM nie obciąża sieci zasilania, jest przesyłana jedynie między przemiennikiem a silnikiem.

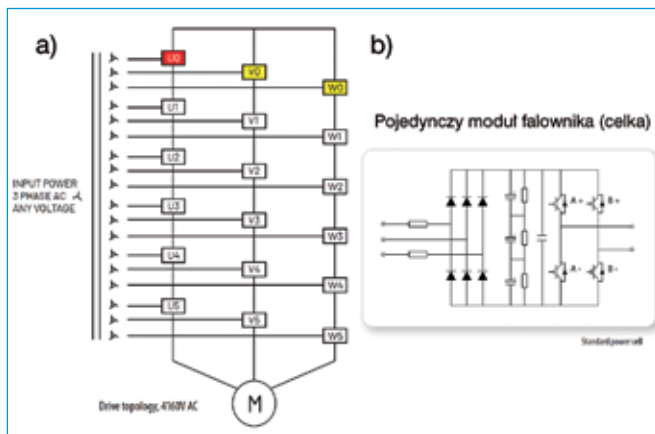
Za wyborem wysokosprawnych silników klatkowych w napędach wentylatorów przemawia prosta konstrukcja, wysoka niezawodność w typowym wykonaniu wielu producentów i łatwiejszy serwis, a także niższa cena. Podobnie przemienniki do silników klatkowych są to powszechnie dostępne, typowe urządzenia.

Sprawność silnika napędowego przy zasilaniu przemiennikowym jest jedynie elementem w bilansie zużycia energii i sprawności układu napędowego, tj. przemiennika częstotliwości i ewentualnie innych elementów wyposażenia toru głównego zasilania napędu. Straty energii we wszystkich podzespołach układu napędowego i w torze zasilania oraz moc dodatkowego wyposażenia, np. klimatyzacji, należy łącznie wykorzystać do porównania efektywności energetycznej możliwych do zastosowania silników i przemienników oraz niezbędnego wyposażenia.

## Przebiegi do napędu stacji wentylatorowej

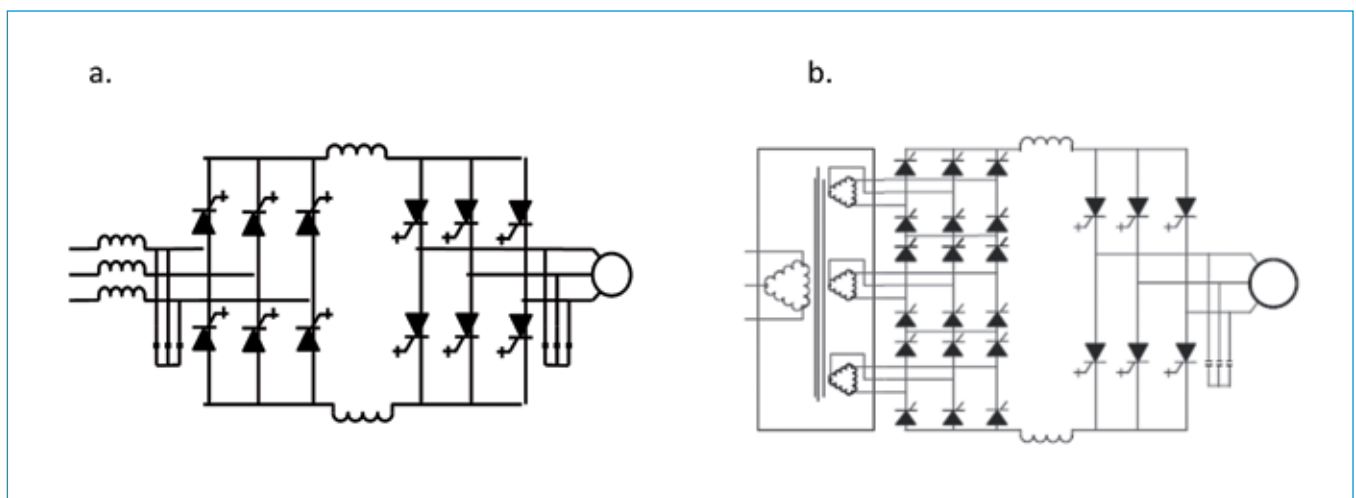
Do regulacji prędkości napędu wentylatorów dużej mocy typowo stosuje się przebiegi średniego napięcia w wykonaniu przebiegów napięciowych wielopoziomowych oraz przebiegów prądowych. Wysoka niezawodność napędu powinna być głównym kryterium wyboru producenta i wersji wykonania urządzenia.

Strukturę wykonania przebiegów pokazano na rys.3.



Rys. 3 Strukturę połączeń celek przebiegu tranzystorowego napięciowego wielopoziomowego średniego napięcia (a) oraz strukturę pojedynczej celki (b)

Przebiegi częstotliwości, w tym szczególnie średniego napięcia, wymagają ochrony przed szkodliwym wpływem środowiska, w tym pyłami i składnikami agresywnymi lub przewodzącymi, wilgoci oraz gazów, obecnych w środowisku kopalni i w pobliżu stacji wyciągowych.



Rys. 4 Strukturę połączeń tyrystorowego przebiegu prądowego średniego napięcia w wersji beztransformatorowej z prostownikiem modulowanym niskoharmonicznym (a) oraz w wersji z transformatorem wielouzwojeniowym i prostownikiem 18-pulsowym (b)

Przebiegi częstotliwości zabudowuje się w osobnych pomieszczeniach. Pomimo wysokiej sprawności, ciepło strat przebiegów dużej mocy jest znaczne. Klimatyzacja pomieszczenia pozwala całkowicie separować pomieszczenie od szkodliwych warunków zewnętrznych. Chłodzenie cieczowe przebiegów jest rzadko stosowa-

ne w rozpatrywanym zakresie mocy jako bardziej złożone i mniej niezawodne. W bilansie sprawności napędów należy uwzględniać ewentualny pobór mocy układu klimatyzacji jako znaczący składnik bilansu.

Powierzchnia zabudowa przebiegów może być niewielka, co zależy od typu konstrukcji i urządzeń dodatkowych. W przypadku braku pomieszczeń dla przebiegów, co ma często miejsce przy modernizacji układów napędowych wentylatorów, właściwym rozwiązaniem jest wykorzystanie stacji kontenerowych. W specjalnym kontenerze zabudowuje się przebiegi, rozdzielnice pomocnicze, ewentualnie transformatory oraz zapewnia odbiór ciepła przez układy klimatyzacji. Tak wykonane przebiegowe stacje kontenerowe są stosowane w wielu odpowiedzialnych napędach wentylatorów dużej mocy. Są one typowo bezobsługowe, a do sterowania i bieżącej kontroli ich pracy wykorzystuje się zdalny monitoring i system dyspozytorski [5].

## Sprawność napędów stacji wentylatorowej

Przeprowadzono porównanie efektywności energetycznej napędów przebiegowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi i silnikami PMM w wykonaniu dla różnych prędkości znamionowych oraz przebiegów różnych producentów. Do porównania przyjęto parametry znamionowe przebiegów średniego napięcia powszechnie stosowanych w napędach wentylatorów dużej mocy o topologii przebiegu napięciowego wielopoziomowego (przebieg celkowy) oraz topologii przebiegu prądowego, rys. 2 i 3 [6].

moc niezbędnych urządzeń pomocniczych, w tym klimatyzacji.

Sprawność znamionowa kompletnych układów napędowych zawierała się między 89,9% a 94,1% dla wszystkich rozważanych kombinacji połączeń. Niższa wartość sprawności dotyczy napędu z silnikiem SCIM i przemiennikiem napięciowym wielopoziomowym (celkowym), najwyższa to sprawność napędu z silnikiem SCIM i przemiennikiem prądowym beztransformatorowym w napędzie wentylatora promieniowego o prędkości 740 obr/min. Oszacowanie sprawności rzeczywistych układów napędowych jest możliwe po określeniu harmonogramu pracy w długim czasie, w tym dominujących punktów pracy napędzanego wentylatora.

Wykazana różnica sprawności różnych napędów, z powodu dużej mocy napędów, prowadzi do znaczących różnic kosztów eksploatacji stacji wentylatorowej. Bezzględne wartości energii możliwej do zaoszczędzenia przy wyborze najkorzystniejszego rozwiązania uzasadniają zastosowanie ewentualnie droższego, ale energooszczędnego rozwiązania, którego koszt zostanie szybko skompensowany wartością zaoszczędzonej energii. Podana wcześniej możliwa różnica sprawności ok. 4pp dla dwuwentylatorowej stacji kopalnianej z silnikami o mocy ok. 3 MW każdy pozwala oszacować wartość zaoszczędzonej energii elektrycznej tylko w układzie napędowym na poziomie nie mniej niż 0,5 mln zł rocznie.

Niezależnie od różnic sprawności wentylatorów pokazanych wcześniej, na efektywność energetyczną przewietrzania wpływa układ napędowy, tor zasilania elektrycznego oraz poprawność wykonania kanałów wentylacyjnych. Podobne przeliczenie zmian sprawności układu wentylacji powinno wpływać na porównanie i wybór struktury oraz wykonania kanałów wentylacyjnych ze względu na spadki ciśnienia i straty mocy w torze transportu powietrza.

Pomimo wskazanych różnic, zastosowanie zarówno silników indukcyjnych klatkowych, jak i silników z magnesami trwałymi do nowych napędów wentylatorów kopalnianych jest technicznie prawidłowe i spełnia wszystkie wymagania stacji wentylatorowej, z wymienionymi ograniczeniami, a wybór pozostaje po stronie inwestora.

W szczególnym przypadku konieczności hamowania wirnika wentylatora w celu dynamicznego obniżenia prędkości lub zatrzymania w krótkim czasie, jeżeli jest to konieczne, należy zastosować przemiennik z możliwością oddawania energii do sieci. Może to dotyczyć przypadków zastosowania wymaganej przepisami górnictwami rewersji przepływu powietrza w krótkim czasie lub stanów awaryjnych. Kontrolowane spowolnienie lub zatrzymanie wirników wentylatorów umożliwia bezpieczne przestawienie klap układu kanałów rewersyjnych. Hamowanie z pełną mocą ze zwrotem energii do sieci (praca czterokwadrantowa) jest dostępne w każdym przemienniku typu prądowego oraz w nielicznych specjalnych przemiennikach napięciowych średniego napięcia. Hamowanie z odzyskiem energii wymaganej mocy nie jest dostępne dla napędów z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi oraz dla napędów z typowymi przemiennikami napięciowymi celkowymi i z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. ■

#### Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Energii w sprawie szczególnych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych z dnia 2 listopada 2016 r.
- [2] Fortuna S.: Wentylatory – podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie, Techwent S.C., Kraków 1999.
- [3] Wszelaczyński A.: Modele wysokosprawnych wentylatorów osiowych, Główny Instytut Górnictwa, komunikat nr 506, Katowice 1971.
- [4] Krawczyk J.: Równoległa praca wentylatorów – badanie na stanowisko laboratoryjne, Przegląd Górniczy, t. 60, nr 1, 2004.
- [5] Morawski A.: Koncepcja budowy stacji wentylatorów przy szybie L-VII. Część napędowa i automatyki. Raport na prawach rękopisu.
- [6] Morawski A.: Oszczędność energii w napędzie elektrycznym, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2(20), 2013.
- [7] Morawski A.: Modernizacja napędów wentylatorów dużej mocy z zastosowaniem przemienników średniego napięcia, Zagadnienia Budowy i Eksploatacji Wentylatorów, Systemy Energetyczne i Urządzenia Ochrony Środowiska WIMiR AGH, Kraków 2015.

#### Artykuł promocyjny

VIBROSON ŁÓDŹ Sp. z o.o. i BIAP Sp. z o.o.  
dr inż. Emil Marciniak (Vibroson Sp. z o.o.),  
dr inż. Andrzej Podsędkowski (Vibroson Sp. z o.o.)  
dr inż. Andzej Morawski (Biap Sp. z o.o.)



VIBROSON ŁÓDŹ Sp. z o.o.  
ul. Wróblewskiego 16/18  
93-578 Łódź  
tel. 42 683 35 11  
www.vibrosom.com.pl  
vibrosom@vibrosom.com.pl



BIAP Sp. z o.o.  
ul. Muchoborska 16  
54-424 Wrocław  
tel. 71 769 78 00  
www.biap.com.pl  
biap@biap.com.pl