

Analiza wpływu zastosowania zespołu wentylatorów na zapotrzebowanie na moc elektryczną i parametry akustyczne

Analysis of the impact of using a fan array on the demand for electrical power and acoustic parameters

JULIUSZ WALASZCZYK, WOJCIECH MAZUR

DOI 10.36119/15.2025.11.6

Wentylatory, które są podstawą wentylacji mechanicznej, odpowiadają za znaczącą część energii zużywanej przez układy HVAC. Jednym ze sposobów na poszukiwanie oszczędności energii wydatkowanej na transport powietrza jest stosowanie energooszczędnych silników. Jednakże w ostatnim czasie, pojawia się coraz więcej informacji o możliwości stosowania zespołów wentylatorowych, jako dobrego sposobu na optymalizację kosztów eksploatacyjnych. Niniejszy artykuł ocenia, jaki wpływ na zapotrzebowanie na moc elektryczną i parametry akustyczne ma zastąpienie jednego dużego wentylatora, dwoma lub kilkoma wentylatorami połączonymi równolegle. Dodatkowo w artykule rozważany jest wpływ strumienia powietrza oraz różne metody sterowania prędkością obrotową wentylatorów. Przeprowadzone analizy doprowadziły do wniosku, że liczba wentylatorów w systemie nie ma kluczowego znaczenia. Znaczący potencjał poprawy efektywności energetycznej przy stosowaniu zespołów wentylatorowych raczej tkwi w jednoczesnym integrowaniu ich z wysokowydajnymi silnikami EC. Natomiast w szerszym kontekście, niezależnie od liczby wentylatorów, największy potencjał jest w ograniczaniu strumienia powietrza, gdy tylko pozwalają na to warunki. Kluczowy jest przy tym taki dobór odpowiedniej prędkości obrotowej wentylatorów, aby w instalacji nie było zbyt wysokiego ciśnienia w stosunku do minimalnego ciśnienia, przy którym udaje się zapewnić wymagane strumienie powietrza. Na potrzeby tej pracy wielokrotnie był przeprowadzany proces doboru, co pozwoliło stwierdzić, że podczas projektowania zawsze warto kilkakrotnie dobrać wentylator lub tablicę wentylatorów i dopiero potem wybierać lepsze rozwiązanie. Daje to szansę na ograniczenie zapotrzebowania na moc elektryczną o 7% w stosunku do średniej mocy elektrycznej będącej wynikiem wielu doborów.

Słowa kluczowe: HVAC, zespoły wentylatorów, tablice wentylatorów, wentylacja, transport powietrza

Fans, the foundation of mechanical ventilation, account for a significant portion of the energy consumed by HVAC systems. One way to reduce the energy for air transport is to use energy-efficient motors. However, recently, a growing body of information has emerged about the potential of using fan arrays as a good way to optimize operating costs. This article assesses the impact on electrical power demand and acoustic parameters of replacing a single large fan with two or more fans connected in parallel. Additionally, the article considers the impact of airflow and various methods of fan speed control. The conducted analyses led to the conclusion that the number of fans in a system is not crucial. Significant potential for improving energy efficiency when using fan arrays lies in their simultaneous integration with high-efficiency EC motors. However, in a broader context, regardless of the number of fans, the greatest potential lies in limiting airflow whenever conditions allow. Selecting the appropriate fan speed is crucial to ensure that the system pressure does not exceed the minimum pressure at which the required airflow can be achieved. For this work, the selection process was repeated multiple times, which led to the conclusion that it is always worthwhile to repeatedly select a fan or fan array during the design process and only then choose the best solution. This provides the opportunity to reduce electrical power demand by 7% compared to the average electrical power resulting from multiple selections.

Key words: HVAC, fan array, fan wall, ventilation, air transport

Wprowadzenie

Człowiek spędza blisko 70-80% czasu w pomieszczeniach zamkniętych, dlatego odpowiednia jakość powietrza wewnętrznego jest kluczowa dla zapewnienia zdrowia i dobrego samopoczucia. Za zapewnienie odpowiedniej wymiany powietrza pomiędzy środowiskiem wewnętrznym a zewnętrznym odpowiedzialna jest wentylacja [14].

Powszechnie wyróżnia się dwa typy wentylacji: naturalną (grawitacyjną) oraz wymuszoną (mechaniczną).

W wentylacji mechanicznej, odpowiednią wymianę powietrza zapewnia praca wentylatorów. Wentylatory umożliwiają wymianę powietrza w pomieszczeniach, w tym także dopływ powietrza zewnętrznego bogatego w tlen, w miejsce powietrza zużytego. Wentylatory są zaliczane do grupy maszyn przepływowych, których istotą

działania jest pobieranie energii mechanicznej z silnika napędowego, a następnie przekazywanie jej do wirnika, który wytwarza ciągły przepływ powietrza, przy jednoczesnym nadawaniu mu przyrostu ciśnienia statycznego i energii kinetycznej [4].

Wentylatory wraz z silnikami, które je napędzają, są nie tylko podstawą wentylacji mechanicznej, ale też odpowiadają za znaczącą część energii elektrycznej zużywanej przez układy HVAC. Odpowiadają one za

około 20 % zużycia energii w budynkach na całym świecie lub ogólnie za 10 % całego globalnego zużycia energii elektrycznej [16].

Tymczasem stale są zaostrzane wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków, a energia z konwencjonalnych źródeł jest obciążana dodatkowymi podatkami, jak ETS oraz ETS 2, który wchodzi w życie w roku 2027 [2]. Mechanizmy te mają zachęcać do odchodzenia od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii. Jednakże według raportu miesięcznika „Forum Energii” [5], w Polsce, w sierpniu 2025 roku, aż 62,5 % energii elektrycznej wytwarzana była ze źródeł konwencjonalnych (dla porównania, do tej pory w roku 2025 najwyższy udział był w lutym, było to 79.1%). Mimo prędko rozwijanej w naszym kraju technologii wykorzystania odnawialnych źródeł energii, a także planowanej inwestycji w energetykę atomową potrzeba jeszcze wielu lat, aby odejść od konwencjonalnych surowców energetycznych. Dlatego w obecnej sytuacji nie widać perspektyw na obniżenie cen energii, a jedyną szansą na zachowanie konkurencyjności jest poszukiwanie odpowiedniej technologii.

Jednym ze sposobów na oszczędność energii jest poszukiwanie silników o wysokiej efektywności energetycznej. Aktualnym i żywo dyskutowanym tematem są silniki EC z magnesami trwałymi. Są to silniki bezszczotkowe, czyli z komutacją elektroniczną. Choć najbardziej popularne silniki wykorzystywane do napędu wentylatorów, czyli trójfazowe silniki asynchroniczne klatkowe, również nie mają szczotek i komutatora, to jednak na polu sprawności znacząco ustępują jednostkom EC. Zużycie energii przez silnik EC potrafi być mniejsze o ponad 30% w porównaniu do silników indukcyjnych pracujących przy nominalnych prędkościach obrotowych [3]. Zaletami silników elektronicznie komutowanych są też cicha praca i mniejszy rozmiar w porównaniu do silników indukcyjnych. Należy jednak mieć świadomość, że koszt zakupu silnika EC jest znacznie wyższy niż koszt zakupu silnika klasycznego.

Poszukiwanie oszczędności w zużyciu energii na transport powietrza prowadzi również do prac nad wykorzystywaniem zespołów wentylatorowych, zamiast pojedynczych wentylatorów. Na rys. 1 i 2 przedstawiono przykładowe rozwiązania tego typu.

Autorzy materiałów dotyczących zespołów wentylatorowych podają liczne argumenty uzasadniające stosowanie takich systemów. Przykładowo w pracach [1, 11] stwierdzono, że wykorzystywanie tablic wentylatorów i wyłączanie zbędnych w danej chwili jednostek, daje możliwość pracy układu z relatywnie większymi sprawnościami, co w konsekwencji pozwala obniżyć zapotrzebowanie na energię. Z kolei w materiałach [9, 17] dodaje się, że redukcję zapotrzebowania na energię można uzyskać dzięki poprawie



Rys. 1. Zespół wentylatorów w centrali wentylacyjnej [12], odpowiednio bez przepustnic oraz z zainstalowanymi przepustnicami na każdym wentylatorze
Fig. 1. The fan array in AHU [12] without and with air dampers on each fan



(a) **(b)**
Rys. 2. Zespół wentylatorów IntelliCUBE firmy Mainstream Fluid & Air LLC [7], a) widok od strony ssawnej, b) widok od strony tłocznej
Fig. 2. The IntelliCUBE Mainstream Fluid & Air LLC fan array [7], a) suction side, b) discharge side

parametrów akustycznych i uwzględnieniu tego w doborze tłumików (konstrukcji systemu). Wydaje się więc, że tablice wentylatorów rzeczywiście mają w sobie potencjał poprawy efektywności energetycznej przy lepszych warunkach akustycznych.

Cel artykułu

Celem artykułu jest analiza możliwości zastosowania zespołu wentylatorów (z ang. fan wall / fan array) zamiast jednego dużego wentylatora, na przykładzie wybranej instalacji wentylacyjnej ze zmiennym strumieniem powietrza.

Do analizy przyjęto istniejącą instalację wentylacyjną obsługującą część pomieszczeń w budynku dydaktycznym Politechniki Wrocławskiej. Instalacja obsługiwana jest przez centralę nawiewno-wywiewną, w której zamontowano po jednym wentylatorze nawiewnym i wywiewnym. Strumień powietrza nawiewanego, według projektu, jest równy strumieniowi powietrza wywiewanego. Do analizy przyjęto wyłącznie część nawiewną instalacji.

Analiza ma na celu określenie, jaki wpływ na zapotrzebowanie na moc elektryczną i parametry akustyczne miałyby zastąpienie jednego wentylatora, dwoma lub kilkoma wentylatorami połączonymi równolegle.

Charakterystyki pracy wentylatorów

Wentylatory można podzielić ze względu na rodzaj wirnika i w tym zakresie wyróżnia się 3 podstawowe typy [13]: osiowe, promieniowe i osiowo-promieniowe (inaczej hybrydowe lub o przepływie mieszanym). Oprócz rozróżnienia na typ wirnika, spotyka się klasyfikację ze względu na typ topatek i rodzaj obudowy [13]. W praktyce można spotkać się również z określeniami, które klasyfikują wentylatory wyłącznie pod względem konkretnych aplikacji, przykładowo wersje dachowe, kanałowe lub oddymiające.

Podstawowymi parametrami każdego wentylatora są: wydajność (strumień powietrza), spręż i sprawność [4]. Spręż, razem ze strumieniem powietrza przetłaczanego, jest podstawą do doboru wentylatora [14].

Charakterystyki pracy opisują zależności między podstawowymi parametrami wentylatorów. Dokładna znajomość charakterystyk pojedynczych wentylatorów daje podstawę przewidywania, w jaki sposób będzie funkcjonował zespół wentylatorów. Do głównych charakterystyk zaliczają się [13, 16]:

- charakterystyka przepływu – ukazuje zależność sprężu (spiętrzenia całkowitego) w funkcji przepływu powietrza dla różnych prędkości obrotowych wirnika;

- charakterystyka sprawności – przedstawia jak zmienia się sprawność wentylatora w funkcji jego wydajności;
- charakterystyka mocy akustycznej – umożliwiła określenie generowanego hałasu.

Producenci wentylatorów powinni dostarczać w swoich materiałach katalogowych wspomniane krzywe charakterystyk, w celu umożliwienia projektantom dokonania poprawnego doboru.

Współpraca wentylatorów

Istnieje możliwość współpracy ze sobą dwóch lub większej liczby wentylatorów, w zależności od potrzeb. Ze względu na sposób połączenia, wyróżnia się współpracę szeregową i równoległą.

Połączenie szeregowe – stosuje się, kiedy dąży się do zwiększenia ciśnienia całkowitego (spiętrzenia całkowitego). Przy znajomości charakterystyki spiętrzenia poszczególnych wentylatorów możliwe jest wykreślenie charakterystyki wypadkowej dla zastosowanego układu. Odbywa się to poprzez dodanie do siebie rzędnych poszczególnych wentylatorów dla jednakowych wartości wydajności.

Połączenie równoległe – stosuje się w celu uzyskania większego strumienia powietrza przy tym samym ciśnieniu dyspozycyjnym. Układy równoległe są najczęściej skonstruowane z takich wentylatorów, które w punktach odejścia po stronie ssawnej i zbieżności na tłoczeniu powinny zachowywać jednakowe ciśnienie, w celu równej pracy maszyn. Niespełnienie tego warunku może doprowadzić do sytuacji, w której jeden z wentylatorów przeszkadzałby drugiemu, a część powietrza mogłaby być miejscowo zawracana poprzez mniej wydajny wentylator. Znając charakterystykę spiętrzenia poszczególnych wentylatorów możliwe jest wykreślenie charakterystyki wypadkowej, poprzez dodanie do siebie strumieni powietrza poszczególnych wentylatorów dla jednakowych wartości sprężu.

Regulacja parametrów pracy instalacji

Zmienne warunki obciążenia cieplnego lub wahania jakości powietrza wewnętrznego wpływają na możliwość zmian parametrów pracy instalacji wentylacyjnej, w szczególności strumienia powietrza. Do głównych metod zmiany strumienia powietrza zaliczają się:

- regulacja prędkości obrotowej silnika wentylatora – w przypadku silników indukcyjnych, klatkowych, uzyskuje się ją poprzez zastosowanie m.in. przekształtników częstotliwości (potocznie zwanych falownikami). Zapewniają one płynną regulację obrotów silnika;
- przemykanie i otwieranie łopatek wlotowych – poprzez zmianę położenia łopatek na ssaniu wentylatora promienio-

- stosowanie regulatorów przepływu – umożliwiając zmianę przepływu powietrza za pomocą przepustnic. Ich praca powinna być skoordynowana z regulacją prędkości obrotowej wentylatora lub z modulacją położenia łopatek wlotowych, w innym wypadku ciśnienie w instalacji może znacznie wzrosnąć.

Koncepcja wykorzystania zespołu wentylatorów w centrali wentylacyjnej

Tablice wentylatorów są układami skonfigurowanymi w postaci matryc, które najczęściej składają się z kilku identycznych wentylatorów. Według informacji zawartych w [9], zastosowanie tego typu układu ma wiele zalet w porównaniu z tradycyjnymi systemami, wykorzystującymi tylko jeden wentylator w instalacji. Jedną z najważniejszych korzyści jest możliwość montażu wentylatorów o mniejszych gabarytach i wadze, co daje przewagę nad pojedynczymi i często dużymi oraz ciężkimi wentylatorami. Do pozostałych zalet stosowania wentylatorów w zespole zaliczają się [9]:

- niższy poziom hałasu i wibracji w porównaniu z zastosowaniem pojedynczych i większych wentylatorów (z niższym poziomem hałasu polemizuje źródło [18]);
- mniejsza przestrzeń w budynku, która jest potrzebna na montaż centrali;
- skrócenie, a w wielu przypadkach brak przestojów w działaniu systemu spowodowanych awarią wentylatora;
- zwykle mniej kosztowna inwestycja przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności systemu oraz oszczędności energii elektrycznej na napęd wentylatorów (polemizuje z tym źródło [18]);
- tablice wentylatorów zapewniają równomierny rozkład powietrza, gdyż strumień powietrza zasysany jest i tłoczony z całej powierzchni matrycy;
- wentylatory układane są w sześciennych modułach, które wyposażone są w izolację akustyczną, co znacząco obniża poziom hałasu.

System sterowania układem wentylatorów może umożliwiać dynamiczne wyłączenie poszczególnych jednostek wraz ze spadkiem wymaganej wydajności. Zawsze gdy dopuszcza się pracę tablicy wentylatorów z niepełną liczbą jednostek, każdy wentylator musi być wyposażony w przepustnicę odcinającą, aby powietrze nie zawracało poprzez wyłączone wentylatory [10]. Na rys. 1 zamieszczono widok tablicy wentylatorów zarówno bez przepustnic, jak i z przepustnicami odcinającymi.

Niekiedy matryce wentylatorów stosuje się jako tzw. ścianę wentylatorów, która może nawiewać powietrze bezpośrednio do pomieszczenia, tj. bez konieczności stosowania kanałów wentylacyjnych.

Najważniejszą cechą charakteryzującą tablice wentylatorów jest redundancja, czyli nadmiarowość. W przypadku systemu matrycy wentylatorów zastosowanie nadmiarowości ma za zadanie zmniejszenie ryzyka wyłączenia centrali wentylacyjnej w razie awarii wentylatora.

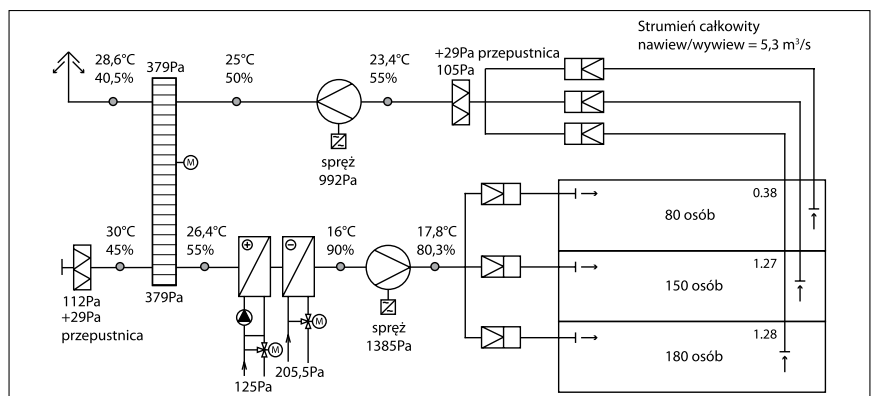
Metodologia

Opis obiektu

Zgodnie z danymi technicznymi (rys. 3) centrali wentylacyjnej zamontowanej w budynku dydaktycznym C-13 Politechniki Wrocławskiej, do analizy przyjęto następujące parametry pracy:

- strumień powietrza nawiewanego: $V = 19080 \text{ m}^3/\text{h}$;
- spręż dyspozycyjny wentylatora: $\Delta p_{\text{d.w.}} = 1385 \text{ Pa}$.

Jak przedstawiono na rys. 3, układ obsługuje 3 pomieszczenia dydaktyczne. Podane na rysunku wartości sprężu dyspozycyjnego wentylatorów oraz strat ciśnienia na poszczególnych elementach instalacji odnoszą się do warunków nominalnych, natomiast przy innych wartościach strumienia powietrza, również będą inne. Charakterystyka pneumatyczna instalacji przy innych niż nominalne strumieniach była wyliczana na podstawie układu równań pochodzącego z pracy [20]. W niniejszym artykule, parametry termodynamiczne nie są rozpatrywane.



Rys. 3. Schemat i obliczeniowe parametry pracy analizowanej instalacji [21]
Fig. 3. The design parameters of the analysed system [21]

Pobór mocy przez silnik wentylatora

Głównym kryterium porównawczym w niniejszej pracy jest moc elektryczna wydatkowana na transport powietrza oraz poziom ciśnienia akustycznego generowanego przez wentylator nawiewany lub zespół wentylatorów nawiewnych.

Do obliczenia chwilowego poboru mocy elektrycznej przez wentylatory wykorzystano wzór (1).

$$P = \frac{V \cdot \Delta p_{dw}}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:

- V – strumień powietrza przepływający przez wentylator, m^3/s ;
 Δp_{dw} – spręż wentylatora, Pa;
 η – sprawność całkowita układu silnik-wentylator.

Poziom ciśnienia akustycznego

Z uwagi na fakt, że w materiałach źródłowych [19] podawany był wyłącznie poziom ciśnienia akustycznego korygowanego krzywą A, mierzonego w odległości 1 m od wentylatora, w artykule wykorzystywane jest również pojęcie poziomu ciśnienia akustycznego zamiast poziomu mocy akustycznej. Stosuje się przy tym uproszczenie, że miejsce pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego znajduje się zawsze w odległości 1 m od każdego pojedynczego źródła.

Poziom ciśnienia akustycznego dla źródeł dźwięku o takiej samej emisji hałasu wyznaczono przy pomocy wzoru (2).

$$L_s = L + \Delta L \quad (2)$$

gdzie:

- L_s – poziom ciśnienia akustycznego sumy źródeł, dB;
 L – poziom ciśnienia akustycznego pojedynczego źródła, dB;
 ΔL – przyrost poziomu ciśnienia akustycznego, ze względu na jednoczesną emisję dźwięku ze wszystkich źródeł o identycznych wartościach poziomu ciśnienia akustycznego, dB.

Przyrost poziomu ciśnienia akustycznego obliczono wykorzystując wzór (3).

$$\Delta L = 10 \log(n) \quad (3)$$

gdzie:

- n – liczba źródeł dźwięku o takim samym poziomie ciśnienia akustycznego, jednakowo odległych od miejsca, w którym dokonywany jest sumaryczny pomiar, dB.

Liczba stosowanych wentylatorów

Analizie poddawano 6 układów wentylatorowych w układzie równoległym: (1) jeden wentylator, (2) dwa wentylatory, (3)

trzy wentylatory, (4) cztery wentylatory, (5) pięć wentylatorów, (6) sześć wentylatorów. Dla poszczególnych konfiguracji wentylatory są jednakowego rozmiaru. Wszystkie wentylatory w tablicy zawsze pracują z tą samą prędkością obrotową.

Do doboru wentylatorów wykorzystano karty katalogowe [19]. Zdecydowano, że dobrane zostaną wentylatory PBM (rys. 4) o promieniowym przepływie powietrza i napędzie bezpośrednim. Wirnik wentylatora ma łopatki pochylone do tyłu. Indukcyjny silnik elektryczny trójfazowy ma możliwość regulacji częstotliwościowej przy pomocy falownika.

Wszystkie przebadane konfiguracje, od 1 do 6 wentylatorów, zostały dobrane tak, aby montowany był tylko jeden typ wentylatora tego samego producenta.

Strumień powietrza wentylującego

W układach ze zmiennym strumieniem powietrza, wraz ze zmieniającymi się obciążeniami cieplnymi, lub w wyniku zmieniającej się jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń, zapotrzebowanie na doprowadzany strumień powietrza również ulega zmianom. W systemach VAV strumień powietrza może być dostosowywany indywidualnie dla każdej strefy i trudno wskazać jednoznacznie, przy jakich proporcjach strumieni powietrza do poszczególnych pomieszczeń, najlepiej dokonywać analiz. Dlatego na potrzeby niniejszego artykułu wprowadza się założenie, że strumienie do wszystkich 3 pomieszczeń będą się zmieniały w sposób proporcjonalny. Oznacza to, że dla każdego pomieszczenia strumienie powietrza zmieniają się w procentowo w ten sam sposób, podobnie jak w takim samym procencie zmienia się strumień całkowity. Wartości dla jakich wykonywano analizy to 100%, 80%, 60% oraz 40% strumienia nominalnego.

Stwierdzenie prędkości obrotowej wirnika wentylatora

Praca regulatorów VAV powoduje zmianę układu ciśnienia w instalacji wentylacyjnej. Jeżeli obroty wentylatora nie będą do-

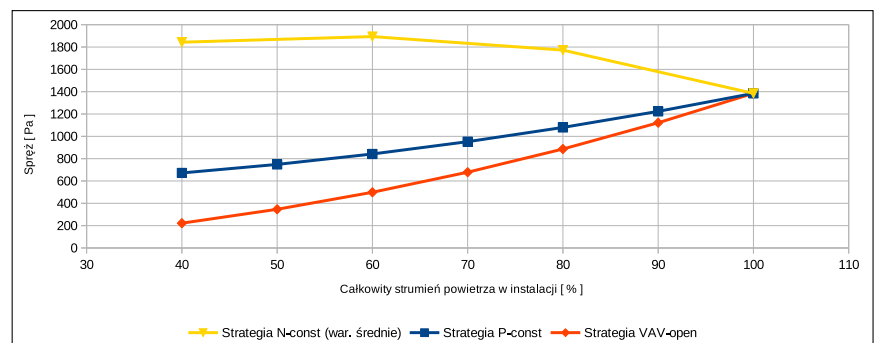
stosowywane do zmniejszonego zapotrzebowania na strumień powietrza, instalacja może pracować przy podwyższonym ciśnieniu i w gorszych warunkach akustycznych. Wiąże się to również z większymi kosztami eksploatacyjnymi [6]. Aby przeciwdziałać tym niekorzystnym zjawiskom wprowadza się różnego rodzaju metody dostosowywania prędkości obrotowej wentylatorów do zmieniających się warunków pracy instalacji. W niniejszej pracy, zgodnie z [20, 21, 22], wykorzystano trzy podejścia do regulacji prędkości obrotowej wentylatorów, oznaczając je w dalszej części jako: N-const, P-const oraz VAV-open.

N-const – utrzymywanie stałej prędkości obrotowej wentylatorów, niezależnie od wymaganych strumieni powietrza. Punkt pracy wentylatora zmienia się w funkcji wydajności i sprężu, ale „porusza się” po tej samej charakterystyce, czyli po tej samej krzywej wykreślonej dla danej prędkości obrotowej. Zmianie ulega przy tym sprawność wentylatora, która jest silnie skorelowana z punktem pracy na charakterystyce.

P-const – regulacja prędkości obrotowej wentylatorów w celu utrzymywania stałego ciśnienia dyspozycyjnego centrali.

VAV-open – regulacja prędkości obrotowej wentylatorów, w celu umożliwienia całkowitego otwarcia regulatorów zmiennego przepływu VAV.

Na rys. 4 zamieszczono wykres sprężu dyspozycyjnego wentylatora dla poszczególnych metod sterowania prędkością obrotową. W przypadku strategii N-const punkty na wykresie to średnie wartości sprężu dyspozycyjnego wszystkich konfiguracji wentylatorów (od 1 do 6). W przypadku strategii P-const i VAV-open wykreślone na wykresie punkty to wartości teoretyczne, wynikające z hydrauliki instalacji nawiewnej. Zdarzało się, że niektóre konfiguracje nie były w stanie pracować przy tak niskich sprężach, jak w przypadku VAV-open. W takim przypadku układ pracował przy wyższych wartościach sprężu, a nadmiarowe ciśnienie było tłumione na przepustnicach VAV.



Rys. 4.

Charakterystyka całkowitego spadku ciśnienia na instalacji nawiewnej w funkcji strumienia powietrza nawiewanego

Fig. 4. The total pressure drop at supply part of duct system in relation to supply airflow

Możliwość wyłączenia wentylatorów

Standardowo, w układzie z jednym wentylatorem, wraz ze zmniejszaniem się strumienia powietrza, zmniejszaniu ulega również prędkość obrotowa wentylatora. W przypadku większej liczby wentylatorów połączonych równolegle, zmniejszenie ich prędkości obrotowej również jest jak najbardziej uzasadnione. Jednakże oprócz tego, może pojawić się możliwość wyłączenia jednego wentylatora z tablicy i pozostawienie tej samej (lub lekko skorygowanej) prędkości obrotowej na pozostałych pracujących wentylatorach. Pojawienie się możliwości wyłączenia zbędnych wentylatorów, przy jednoczesnym dostosowywaniu prędkości obrotowej wszystkich pozostałych, znacznie poszerza potencjalne możliwości sterowania takim układem. Przy najmniej teoretycznie istnieje wówczas możliwość uzyskania większej sprawności układu wentylator-silnik.

Wyniki doboru wentylatorów i łączenia ich w zespoły

Zapotrzebowanie na moc niezbędną do transportu powietrza

W ramach tego opracowania wielokrotnie wykonywano proces doborowy wentylatorów, tak aby uwzględnić wymienione w metodologii kryteria analizy. Pierwsza część wszystkich doborów (A) była realizowana przy założeniu, że żadnego wentylatora z tablicy nie można wyłączać. W drugiej części (B) przyjęto założenie, że gdy tylko będzie to możliwe, część wentylatorów z tablicy należy wyłączać. W ten sposób wykonano dwie serie doborów, które pozwalają wyciągać wnioski na temat zasadności wyłączenia wentylatorów.

Zarówno w serii doborów A i B przeprowadzono doboru punktów pracy wentylatorów dla wszystkich konfiguracji. Przy czym każda konfiguracja była podzielona na 3 strategię sterowania prędkością obrotową (N-const, P-const, VAV-open). Natomiast w ramach danej strategii sterowania prędkością obrotową, doboru były wykonywane dla 4 analizowanych strumieni powietrza.

W wyniku przeprowadzanych doborów powstały 33 tabele z wynikami, które szcze-

gółowo zostały przedstawione w pracy [8]. Na potrzeby tego artykułu opracowane punkty pracy były weryfikowane i niekiedy nieznacznie korygowane. Wszystkie opracowane punkty pomiarowe zostały naniesione na wykres zamieszczony na rys. 5. Wykres został tak przygotowany, aby w sposób jednoczesny uwidocznili różnice między poszczególnymi konfiguracjami wentylatorów i strategiami regulowania obrotów.

Praca w warunkach nominalnych

Praca układu przy strumieniu nominalnym w szczególny sposób eliminuje z rozważań sposób sterowania prędkością obrotową oraz w oczywisty sposób wielkość samego strumienia. Z kolei wykonanie serii doborów A i B poszerza w szczególny sposób liczbę potencjalnych konfiguracji. Dzieje się tak, ponieważ w serii A wszystkie wentylatory musiały pracować przy strumieniu 100% przy projektowej prędkości obrotowej. Z kolei w serii B zastanawiano się, czy można wyłączyć jeden wentylator i zwiększyć prędkość obrotową pozostałych, aby również dotrzymać strumień 100%. Przykładowo przy 3 zainstalowanych wentylatorach dało się utrzymać strumień nominalny jedynie przy 2 pracujących wentylatorach, ale kosztem podwyższonej prędkości obrotowej wirników wentylatorów. W tym przypadku wiązało się to z wzrostem zapotrzebowania na moc, ze względu na to, że wentylatory nie pracowały w dogodnym punkcie pracy (patrz rys. 5).

W związku z powyższym wszystkie wyniki doborów dla warunków nominalnych potraktowano jako zbiór danych statystycznych, do oceny na ile sama procedura doboru przekłada się na zapotrzebowanie na moc finalnego układu. Wszystkie przeanalizowane układy, we wszystkich możliwych konfiguracjach, miały zapotrzebowanie na moc od 10,8 do 12,9 kW, średnio 11,6 kW przy odchyleniu standardowym 0,83 kW. Należy mieć na uwadze, że zaobserwowane różnice w zapotrzebowaniu na moc nie mają istotnego związku z liczbą stosowanych wentylatorów. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że staranny dobór układów silnik-wentylator może wiązać się średnio z oszczędnościami około

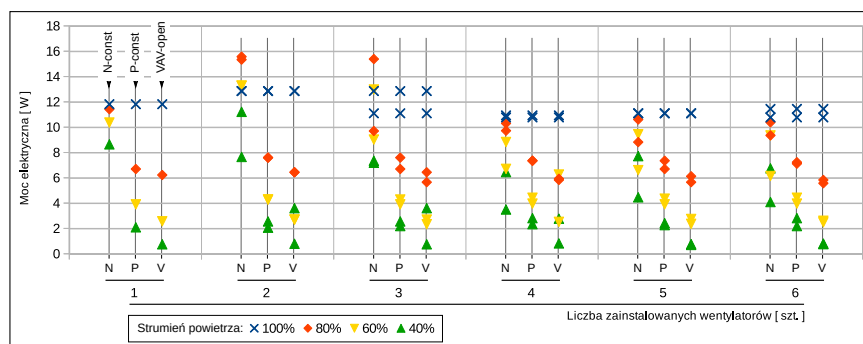
7% (licząc między średnią mocą a zaobserwowanym minimum).

Oszczędności mocy elektrycznej rzędu 7% podczas przeprowadzania procesu doborowego uznano za wartość realną i wartą zapisania we wnioskach końcowych. Natomiast istnieje jeszcze możliwość wyliczenia oszczędności zapotrzebowania na moc elektryczną licząc między maksymalną odnotowaną mocą, a zaobserwowanym minimum. Wtedy, minimalne zapotrzebowanie na moc jest 16% mniejsze, od wartości maksymalnej. Warto dodać za [15], że w rzeczywistości często typ wentylatora jest wybierany z przyczyn nietechnicznych, czyli pod uwagę brana jest cena, dostępność danego modelu, a nawet przyzwyczajenia projektanta. Ponadto istnieje wysoki poziom niepewności związany z rzeczywistymi oporami powietrza, co zmusza do wprowadzania nadwyżek wydajności i ciśnienia. Z tych powodów, stwierdzenie, że wnikliwy proces doboru układu silnik-wentylator pozwala zaoszczędzić 16% mocy elektrycznej silnika, może w rzeczywistości wcale nie być przesadzone.

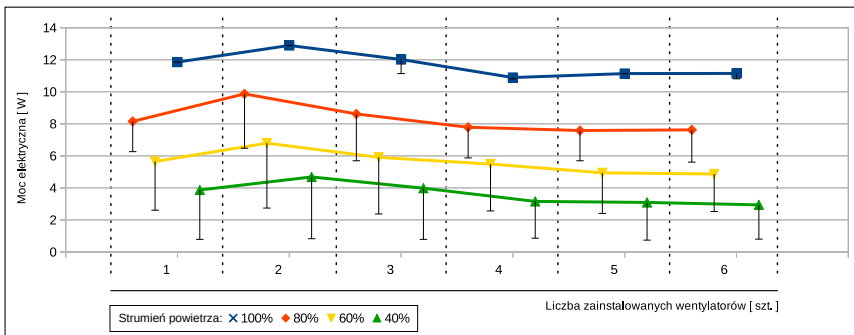
Liczba stosowanych wentylatorów

Aby przeanalizować wpływ liczby stosowanych wentylatorów wyłączono wszystkie inne cechy z analizy oprócz strumienia powietrza i liczby wentylatorów. Następnie wyliczono średnie zapotrzebowania na moc elektryczną przy danym strumieniu. Przykładowo, rozpatrując dane z rys. 5, niezależnie dla każdej konfiguracji (od 1 do 6 wentylatorów) wyliczono średnie ze wszystkich strategii sterowania prędkością obrotową dla każdego strumienia osobno. W efekcie otrzymano zależność: średnia moc elektryczna w funkcji liczby wentylatorów przy konkretnym strumieniu. Na podstawie tak przygotowanych danych wykonano wykres zamieszczony na rys. 6, przy czym dodatkowo naniesiono najniższe uzyskane moce dla każdego punktu reprezentującegogo średnią. Przyglądając się wartościom średnim, można zaobserwować, że wraz ze wzrostem liczby jednostek, maleje średnie zapotrzebowanie na moc. Przy strumieniu 80% współczynnik korelacji to $-0,63$, strumieniowi 60% odpowiada $-0,75$, a strumieniowi 40% odpowiada $-0,81$. Współczynniki korelacji są ujemne, gdyż ze wzrostem liczby wentylatorów maleje średnia moc. Porównując tylko układ z jednym wentylatorem i sześcioma, zmniejszenie zapotrzebowania na moc to odpowiednio 6%, 14% i 24% (dla strumieni 80%, 60% i 40% wartości strumienia nominalnego).

Uwzględnienie mocy średnich jest miarodajne w odniesieniu do dużej liczby przeprowadzonych doborów, gdy każdy proces doboru traktowany jest jednakowo. Gdyby jednak zamiast mocy średnich, uwzględnione były wyłącznie moce minimalne osiągnięte dla danego układu (przy danym strumieniu), to punktem odniesienia stają się wyłącznie



Rys. 5. Moc elektryczna wszystkich dobranych konfiguracji silnik-wentylator
Fig. 5. The electric power of the all considered motor-fan sets

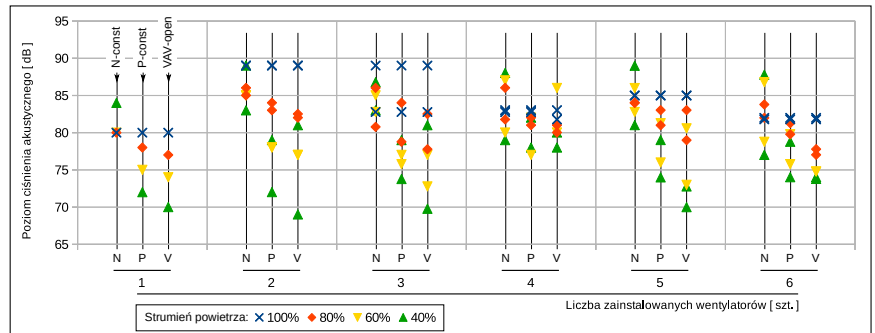


Rys. 6. Średnia i minimalna moc elektryczna układu w funkcji liczby zainstalowanych wentylatorów
Fig. 6. The average and minimum electric power of the fan sets in relation to the number of fans

najlepsze punkty pracy, przy najbardziej korzystnej metodzie sterowania prędkością obrotową. Obserwuje się wtedy tendencję, że wraz ze wzrostem liczby jednostek, w dalszym ciągu maleje zapotrzebowanie na moc, choć zależność ta jest dużo słabsza. Przy strumieniu 80% strumienia nominalnego współczynnik korelacji to $-0,82$, a strumieniowi 60% odpowiada $-0,48$, a strumieniowi 40% odpowiada $-0,17$ (praktycznie nie występuje korelacja). Porównując i tym razem, układ z jednym wentylatorem i sześcioma, zmniejszenie zapotrzebowania na moc to odpowiednio 10% i 3% (dla strumienia 80%, 60% wartości strumienia nominalnego). Dla strumienia 40% najbardziej wydajny układ z 6 wentylatorami pobierał prawie 2% mocy więcej, niż jeden wentylator. Potwierdzają to wartości minimalne naniesione na wykres zamieszczony na rys. 6. Praktycznie wszystkie wartości minimalne dla danego strumienia są na zbliżonym poziomie, niezależnie od liczby wentylatorów w układzie.

Ostatecznie można stwierdzić, że w ogólności zwiększenie liczby wentylatorów w tablicy może przyczynić się do oszczędności energii, choć jeżeli jeden wentylator jest dobrany i użytkowany w sposób przemyślany i efektywny, to przewaga tablicy wentylatorów nie jest znacząca. Niezależnie od konfiguracji, kluczowe wydaje się, aby zapewnić pracę wentylatorów w punktach pracy o najwyższych sprawnościach silnik-wentylator, natomiast sama liczba wentylatorów ma znaczenie drugorzędne. Z pewnością przy większej liczbie jednostek istnieje więcej potencjalnych sposobów ichysterowania, przez co pojawiają się szanse, aby pracować z większymi sprawnościami. Jednak pojawia się tutaj osobne zagadnienie, w jaki sposób skutecznie wybierać takie bardziej wydajne punkty pracy podczas pracy ciągłej układu.

Wydaje się, że praca tablic wentylatorów może być bardziej efektywna w porównaniu do jednego dużego wentylatora, jak to stwierdza się w [1, 11], ale jednak praktyczna realizacja tego zagadnienia nie jest prosta i istnieją materiały bibliograficzne wskazujące, że układ z jednym wentylatorem jest bardziej efektywny [18].



Rys. 7. Poziom ciśnienia akustycznego analizowanych konfiguracji wentylatorów
Fig. 7. The sound pressure level of the analysed fan sets

Poziom ciśnienia akustycznego

Analizując wykres zamieszczony na rys. 7 można stwierdzić, że tablice wentylatorów generalnie potrafią być głośniejsze, od jednego wentylatora. Podobne wnioski są prezentowane w [18]. Przykładowo przy strumieniu nominalnym, wyraźnie daje się zaobserwować fakt, że wzrost liczby wentylatorów wiąże się ze wzrostem poziomu ciśnienia akustycznego. Jeden wentylator generuje około 80 dB(A), natomiast pięć mniejszych wentylatorów około 85 dB(A), a sześć około 82 dB(A) (rys. 7). Podobnie jak w przypadku ograniczania zapotrzebowania na moc elektryczną, również przy ograniczaniu hałasu bardzo istotne, aby stosować wydajną metodę regulacji prędkości obrotowej wentylatorów. Niezależnie od liczby wentylatorów, najciszej pracują układy przy strategii VAV-open.

Jako kluczowe w sprawach akustyki należy jednak podać to, że zastosowana metodologia traktuje każdy włączony wentylator w tablicy, jako niezależne źródło dźwięku o tym samym poziomie ciśnienia akustycznego. Dwa działające wentylatory to 3 dB więcej od jednego wentylatora, a sześć wentylatorów to zawsze 7,8 dB więcej, zgodnie ze wzorem (3). Przy czym proces dodawania charakterystyk wentylatorów zwiększa ich wydajność, pozostawiając spręż na tym samym poziomie. Natomiast jak potwierdza [16], hałas generowany przez wentylator zależy od jego typu, prędkości przepływu powietrza i ciśnienia. Czyli w metodologii uwzględnia się zwiększenie poziomu ciśnienia akustycznego wraz z każdym wentylato-

rem, mimo że zarówno prędkość przepływu jak i spręż pozostają bez zmian. A skoro prędkość i spręż pozostają bez zmian, to być może poziom ciśnienia akustycznego większej liczby wentylatorów nie będzie się zmienił zgodnie z zależnością (3), co założono w metodologii. Na ten moment jednak trudno zaproponować inną metodologię, szczególnie bez przeprowadzenia badań na odpowiednim stanowisku eksperymentalnym.

Strumień powietrza wentylującego

Wylączając wszystkie inne cechy z analizy, potwierdza się oczywisty wniosek, że

strumień powietrza ma istotny wpływ na zapotrzebowanie na moc. Wszystkie systemy, we wszelkich analizowanych konfiguracjach, przy strumieniu nominalnym odpowiadały za pobór mocy średnio 11,6 kW, a przy najmniejszym przebadanym strumieniu, czyli 40%, było to średnio 3,6 kW. Współczynnik korelacji między strumieniem powietrza a średnią mocą wyniósł 0,99. Jest to bardzo wysoka dodatnia korelacja, co potwierdza konieczność ograniczania strumienia powietrza, gdy tylko to możliwe, czyli przy częściowych obciążeniach cieplnych, lub przy wystarczającej jakości powietrza w pomieszczeniu.

Sterowanie prędkością obrotową

Wylączając wszystkie inne cechy z analizy, potwierdza się, że strategią odpowiedzialną za największe zapotrzebowanie na moc jest utrzymywanie stałej prędkości obrotowej. Z drugiej strony najlepszą strategią jest utrzymywanie maksymalnie otwartych przepustnic w regulatorach VAV. Przewaga strategii P-const oraz VAV-open względem N-const najbardziej uwidacznia się wraz ze zmniejszaniem się strumienia powietrza. Przykładowo przy strumieniu stanowiącym 80% strumienia nominalnego, utrzymywanie stałego ciśnienia obniża moc średnio o 37%, a otwartych VAV średnio o 48%, w porównaniu do utrzymywania stałych obrotów. Z kolei przy strumieniu 40%, średnie ograniczenie mocy będzie odpowiednio 64% i 78%. Dodatkowo można zauważyć, że poziom mocy akustycznej również ulega poprawie, choć różnice między strategiami ze stałym ciśnieniem i otwartymi VAV są relatywnie małe.

Możliwość wyłączenia wentylatorów

Zdarzały się sytuacje, że wyłączenie wentylatora z pracującej tablicy, powodowało obniżenie zapotrzebowania na moc przeznaczoną do transportu powietrza. Przykładowo przy 6 wentylatorach, przy strumieniu 100%, praca 5 wentylatorów okazała się bardziej korzystna niż pełnych 6. Sześć wentylatorów potrzebowało 11,48 kW, natomiast pięć wentylatorów 10,81 kW. Układ pracował przy większej sprawności, przy tych samych parametrach transportu powietrza (rys. 5).

Dla strategii N-const wyłączenie wentylatora poprawiało zapotrzebowanie na moc w 12 przypadkach z 20. Wyłączenie wentylatora przy tak niekorzystnej strategii, jaką jest utrzymywanie stałej prędkości obrotowej wszystkich wentylatorów, okazywało się najczęściej korzystne. Jednak w przypadku strategii P-const (poprawa w 7 przypadkach na 20) i VAV-open (poprawa w 4 przypadkach na 20), trudno wyciągać jednoznaczne wnioski.

Wnioski

Niniejsza praca miała na celu studium przypadku wykorzystania technologii zespołu wentylatorów w centralach wentylacyjnych i przeanalizowanie możliwych korzyści związanych z eksploatacją tych systemów.

Uzyskane wyniki prowadzą do wniosku, że samo zastosowanie tablicy wentylatorów, zamiast jednego dużego wentylatora, nie gwarantuje obniżenia zapotrzebowania na moc elektryczną. Niezależnie od liczby wentylatorów w systemie, kluczowe wydaje się, aby zapewnić pracę wentylatorów w punktach pracy o najwyższych sprawnościach silnik-wentylator. W szczególności istotna poprawa powinna występować wraz z użyciem silników EC, a nie wraz z samym faktem zastąpienia jednego wentylatora kilkoma mniejszymi.

Gdyby potraktować wszystkie przeprowadzone próby doboru układów silnik-wentylator jako równoznaczne i wnioskować wyłącznie na podstawie średnich mocy elektrycznych, daje się zaobserwować korelację, że wraz ze wzrostem liczby wentylatorów, spada średnia moc elektryczna wydatkowana na transport powietrza. Wniosek ten przestaje być jednak prawdziwy, im bardziej starannie dobrany i sterowany jest jeden duży wentylator oraz gdy cały system pracuje wyłącznie przy jednej nominalnej wartości strumienia powietrza.

Niepodważalnym argumentem przemawiającym za korzystaniem z tablic wentylatorów jest chęć zabezpieczenia centrali przed wyłączeniem spowodowanym awarią któregoś z wentylatorów. Ponadto zastosowanie zespołu wentylatorów powinno pozwolić na skrócenie centrali, a tym samym oszczędność miejsca.

Przeprowadzone analizy wskazują, że w układzie z tablicą wentylatorów warto przewidzieć możliwość wyłączenia pojedynczych wentylatorów z tablicy. Należy to jednak robić świadomie, wybierając między regulacją prędkości obrotowej wentylatorów w tablicy, a ewentualnym wyłączeniem pojedynczych egzemplarzy. Dzięki temu układ silnik-wentylator może pracować z najwyższymi możliwymi sprawnościami.

Wszystkie systemy, we wszelkich analizowanych konfiguracjach, przy strumieniu maksymalnym odpowiadały za pobór mocy średnio 11,6 kW, a przy najmniejszym przebadanym strumieniu, czyli 40%, było to średnio 3,6 kW. Współczynnik korelacji między strumieniem powietrza a mocą wyniósł 0,99. Świadczy to bardzo mocnej dodatniej korelacji, a tym samym o istotnej potrzebie ograniczenia strumienia powietrza, gdy tylko to możliwe.

Odpowiednia regulacja prędkości obrotowej wentylatorów przyczynia się do znaczących oszczędności energii na transport powietrza. Kluczowy jest taki dobór odpowiedniej prędkości obrotowej wentylatorów, aby w instalacji nie było zbyt wysokiego ciśnienia w stosunku do minimalnego ciśnienia, przy którym udaje się zapewnić wymagane strumienie powietrza. Najlepszą i zalecaną strategią jest utrzymywanie maksymalnie otwartych przepustnic w regulatorach VAV.

Staranny dobór układów silnik-wentylator i wybór rozwiązania korzystniejszego pod względem osiąganych sprawności, wiąże się z oszczędnościami mocy elektrycznej średnio 7%. Warto zatem podczas projektu kilkakrotnie dobrać wentylator i wybrać lepsze rozwiązanie, niż opierać się wyłącznie na pierwszym wyborze.

W związku z przyjętą w pracy metodologią nie potwierdzono doniesień literaturowych, że wentylatory w tablicy pracują generalnie ciszej od jednego dużego wentylatora. Co ważne, może wiązać się to dodatkowo z obniżeniem zapotrzebowania na moc elektryczną, ze względu na fakt, że pozwalałoby to instalować mniejsze i lżejsze tłumiki akustyczne. Takie tłumiki akustyczne miałyby mniejsze opory przepływu, a przez to całkowita strata ciśnienia na instalacji byłaby mniejsza. A to przekładałoby się na mniejsze zapotrzebowanie na moc elektryczną, gdyż „słabsze” wentylatory wystarczyłyby do zapewnienia tego samego strumienia powietrza. Dlatego, mimo że bezpośrednio w pracy nie wykazano istotnych oszczędności w zapotrzebowaniu na moc elektryczną, w tablicach wentylatorów istnieje jeszcze potencjał, który powinien być tematem dalszych analiz w przyszłości.

BIBLIOGRAFIA

[1] Conrad D., Mayer J., Reichert E.; Optimization, Control, and Design of Arbitrarily Shaped Fan Arrays; International Journal of Turbomachinery Propulsion and Power; 2023; nr 8; DOI 10.3390/ijtp8020012.

[2] European Commission; The Monitoring and Reporting Regulation – General guidance for ETS2 regulated entities; 2024.

[3] Hoevenaars A., Landrette J.; EC Fan Array Implementation – How to Capture the Energy Savings without Sacrificing Power Quality; ASHRAE Transactions; 2021; nr 127; str. 158-165.

[4] Kuczewski S.; Wentylatory; 1978.

[5] Kwizdziński K.; Sierpień 2025 – Węgiel pod gruszą; Miesięcznik Forum Energii; dostęp: 15.09.2025; adres: www.forum-energii.eu.

[6] Liu M., Zhu Y., Claridge D., White E.; Impacts of Static Pressure Set Level on the HVAC Energy Consumption and Indoor Conditions; Proceedings of the Tenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates; 1996.

[7] Mainstream Fluid & Air LLC; IntelliCUBE FAN ARRAYS; materiały producenta; dostęp: 15.09.2025; adres: mainstream-corp.com/case-study-smithsonian.

[8] Mazur W.; Ograniczanie zużycia energii na transport powietrza poprzez stosowanie zespołu wentylatorów; Praca magisterska; 2025.

[9] MEP Academy; How Fan Walls or Fan Arrays Work; 2023; dostęp: 12.06.2025; adres: mepacademy.com.

[10] National Institutes of Health (Division of Technical Resources); Fan arrays in Air Handling Systems; Technical News Bulletin; 2023, nr 133.

[11] Ostmann P., Kremer M., Mathis P., Müller D.; Efficiency Increase of Air Handling Units by Parallely Operated Fans; Ventilation 2022: 13th International Industrial Ventilation Conference for Contaminant Control; str. 298-306; DOI: 10.18154/RWTH-2022-08049.

[12] Ostmann P., Rätz M., Kremer M., Müller D.; Prediction of Fan Array Performance with Polynomial and Support Vector Regression Models; International Journal of Turbomachinery Propulsion and Power; 2024; nr 9; DOI 10.3390/ijtp9040032.

[13] Pacific Gas and Electric Company, Advanced Variable Air Volume VAV System Design Guide, 2009.

[14] Pelech A.; Wentylacja i klimatyzacja – Podstawy; 2008.

[15] Piwowarski M., Ziemiański P., Czyżewicz J., Borkiewicz M., Laszuk K., Galara I., Pawłowska M., Cybulski K.; Autonomiczny system zdalnego pomiaru wentylatorów przemysłowych jako rezultat etapu projektu innowacyjnego; Instal; 2022; nr 3; str. 14-21; DOI 10.36119/15.2022.3.3.

[16] Piwowarski M., Ziemiański P., Mioduszewski P., Czyżewicz J., Jaskólski P., Borkiewicz M., Laszuk K., Madej K., Kpaczewski K., Cybulski K., Naumczyk T., Fabiański T., Pawłowska M.; Budowa laboratorium badawczo-rozwojowego do badań wentylatorów przemysłowych oraz innych urządzeń – podejście projektowe; Instal; 2025; nr 7-8; str. 28-35; DOI 10.36119/15.2025.7-8.3.

[17] Taylor S.; VAV System Design Tips; Air System Engineering & Technology (ASET) Conference-US; AMCA International; 2018.

[18] Trane; Direct-Drive Plenum Fans and Fan Arrays; Engineers newsletter; 2010.

[19] Venture Industries; Wentylator promieniowy PBM; Karta katalogowa w języku polskim; str. 173-180.

[20] Walaszczyk J.; Metody sterowania pracą wentylatorów w systemach ze zmiennymi strumieniami powietrza wentylującego; Air, Heat & Energy in Buildings 2014; str. 195-200.

[21] Walaszczyk J., Przydróżny E.; Zapotrzebowanie na moc do transportu powietrza w systemie ze zmienną ilością powietrza wentylującego; Air, Heat & Energy in Buildings 2014; str. 201-206.

[22] Wei G., Liu M., Claridge D., Sakurai Y.; Improved Air Volume Control Logic for VAV Systems; Proceedings of the Twelfth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates; 2000.