

Budowa laboratorium badawczo-rozwojowego do badań wentylatorów przemysłowych oraz innych urządzeń – podejście projektowe

Design Approach to Building a Research and Development Laboratory for Testing Industrial Fans and Other Equipment

MARIAN PIWOWARSKI, PAWEŁ ZIEMIAŃSKI, PIOTR MIODUSZEWSKI, JACEK CZYŻEWICZ, PIOTR JASKÓLSKI, MATEUSZ BORTKIEWICZ, KRZYSZTOF LASZUK, KRZYSZTOF MADEJ, KRZYSZTOF KOPACZEWSKI, KAROL CYBULSKI, TOMASZ NAUMCZYK, TOMASZ FABIAŃSKI, MARTA PAWŁOWSKA

DOI 10.36119/15.2025.7-8.3

Wentylatory jako urządzenia przemysłowe są jednymi z najważniejszych pojedynczych odbiorników energii napędowej. Dlatego stanowią one ważny obszar potencjalnych oszczędności energii w celu zmniejszenia emisji CO₂. Wszechobecność wentylatorów i ich praca w warunkach odbiegających od optymalnych zapewniają szerokie pole możliwości ukierunkowanych na uzyskanie znaczącej globalnie redukcji energii wykorzystywanej do ich napędzania. Drugim ważnym aspektem, oprócz efektywności energetycznej, jest generowany przez wentylatory hałas i działania podjęte w kierunku jego redukcji. W niniejszym artykule przedstawiono proces budowania oraz testowania nowoczesnego laboratorium badawczego do pomiaru i analizy parametrów pracy wentylatorów. Inicjatywa została zrealizowana w ramach innowacyjnego projektu badawczego COLUBRIS w firmie Nyborg-Mawent. Artykuł zawiera szczegółowe informacje dotyczące struktury laboratorium, jego układu funkcjonalnego, zastosowanych rozwiązań technicznych oraz aparatury pomiarowej umożliwiającej pozyskiwanie wiarygodnych danych dotyczących zarówno sprawności energetycznej, jak i emisji hałasu. Laboratorium to, dzięki swojej elastycznej strukturze i nowoczesnemu wyposażeniu, umożliwia prowadzenie badań przepływowych, akustycznych i drganiowych w kontrolowanych warunkach środowiskowych nie tylko wentylatorów, ale również innych urządzeń. W artykule zaprezentowano również wstępne wyniki pomiarów energetycznych oraz poziomu hałasu uzyskane podczas badań wentylatorów przeprowadzonych w laboratorium. Wyniki te stanowią ważny punkt wyjścia dla rozwoju technologicznego tych urządzeń, ukierunkowanego na zwiększenie ich efektywności przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko i użytkowników.

Słowa kluczowe: wentylatory, zarządzanie projektem innowacyjnym, laboratorium badawcze, analiza hałasu, analiza sprawności

Industrial fans are among the largest standalone consumers of mechanical drive energy in various sectors. As such, they represent a key area for energy savings aimed at reducing CO₂ emissions. The ubiquity of fans and their frequent operation under non-optimal conditions present an opportunity for substantial global reductions in the energy used to power them. In addition to energy efficiency, noise generated by fans constitutes another important concern. This article presents the process of designing and testing of a modern research laboratory dedicated to measurements and analysis of fan performance parameters. The project was implemented as part of an innovative research and development initiative under the COLUBRIS project carried out by the Nyborg-Mawent company. The article provides detailed information on the laboratory's structure, functional layout, applied technical solutions, and measurement equipment, which enables the collection of reliable data related to both energy efficiency and noise emission. Thanks to its flexible structure and advanced equipment, the laboratory enables a controlled flow, acoustic, and vibration testing not only of fans but also of other types of devices under various

dr hab. inż. Marian Piwowarski (M.P.) <https://orcid.org/0000-0001-8475-5686> – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, marian.piwowarski@pg.edu.pl

dr Paweł Ziemiański (P.Z.) <https://orcid.org/0000-0002-4391-9282> – Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii, pawel.ziemianski@pg.edu.pl, (autor korespondencyjny/corresponding author)

dr hab. inż. Piotr Mioduszewski (P.M.) <https://orcid.org/0000-0001-6378-9094> – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, piotr.mioduszewski@pg.edu.pl

dr inż. Jacek Czyżewicz (J.C.) <https://orcid.org/0000-0002-7053-4919> – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, jacek.czyzewicz@pg.edu.pl

inż. Piotr Jaskólski (P.J.) pjaskolski@nyborg-mawent.com, mgr inż. Mateusz Bortkiewicz (M.B.) mbortkiewicz@nyborg-mawent.com – Nyborg-Mawent

inż. Krzysztof Laszuk (K.L.) klaszuk@nmdo.pl – NM Design Office

mgr inż. Krzysztof Madej (K.M.) kmadej@nyborg-mawent.com, mgr inż. Krzysztof Kopaczewski (K.K.), kkopaczewski@nyborg-mawent.com,

inż. Karol Cybulski (K.C.) kcybulski@nyborg-mawent.com, inż. Tomasz Naumczyk (T.N.) tnaumczyk@nyborg-mawent.com, inż. Tomasz Fabiański (T.F.) tfabianski@nyborg-mawent.com, mgr Marta Pawłowska (M.Pa.) mpawlowska@nyborg-mawent.com – Nyborg-Mawent

environmental conditions. The paper presents also preliminary results of energy and noise measurements conducted on fans in this laboratory. These findings serve as an important starting point for the technological development of equipment aimed at improving efficiency while minimizing negative environmental impact and user exposure.

Keywords: fans, managing innovative project, research laboratory, noise analysis, efficiency analysis

Wprowadzenie

Rozwój wentylatorów przemysłowych, zarówno osiowych, jak i promieniowych, związany był, i nadal jest, z postępowaniem w inżynierii, materiałoznawstwie oraz nauce. Zmiany wymuszone są potrzebami przemysłu oraz społeczeństwa, co prowadzi do coraz cichszych, bardziej zaawansowanych i wydajniejszych systemów wentylacyjnych oraz klimatyzacyjnych. Początkowo to efektywność energetyczna była jednym z głównych obszarów rozwoju. Doskonalone były kształty łopatek, materiały używane do produkcji łopatek i pozostałych podzespołów oraz silniki, które służyły do napędzania urządzeń. Pozwoliło to na wzrost wydajności oraz sprawności przy mniejszym zużyciu energii pobieranej przez urządzenia. W latach 30. XX wieku wentylatory osiągały sprawności do 70% przy wykorzystaniu łopatek wieńcowych wirnikowych zagiętych do przodu. Następnie w latach 50. nastąpił przełom, pojawiły się łopatki zagięte do tyłu, co umożliwiło wzrost sprawności do 80%. Kolejnym etapem było stworzenie i wykorzystanie profilowanych łopatek zagiętych do tyłu, które pojawiły się już w latach 60., co pozwoliło na uzyskanie sprawności przekraczających 85%. Osiągnięte sprawności dotyczą jedynie wieńców wirnikowych i są na tyle wysokie, że urządzenia z tego typu łopatkami i podobnymi sprawnościami są stosowane aż do dzisiaj. W późniejszych latach rozwój dotyczył przede wszystkim eksploatacji urządzeń, czyli ich niezawodności, poziomu generowanego hałasu oraz trwałości. Obecnie, oprócz generowanego hałasu, sprawność wentylatorów jest kluczowym aspektem w procesie ich projektowania [1, 2].

Wentylatory są jednymi z najbardziej znaczących urządzeń w kontekście zużycia energii elektrycznej, według raportu IEA [3]. Odpowiadają one za około 20% jej zużycia w budynkach na całym świecie lub ogólnie za 10% całego globalnego zużycia energii elektrycznej. Poprawienie ich efektywności jest kluczem do ograniczenia zużycia energii w skali globalnej oraz zmniejszenia emisji CO₂. Na sprawność tych urządzeń wpływ ma wiele parametrów, takich jak rodzaj napędu, kształt

łopatek wirnika, kształt obudowy, pozostałe elementy instalacji oraz wiele innych. Zasadniczo postęp w dziedzinie konstrukcji wentylatorów jest wynikiem teoretycznych, numerycznych czy też eksperymentalnych badań naukowych oraz intuicji i doświadczenia konstruktorów. Ostateczną oceną własności danej konstrukcji wentylatora jest umiejętne przeprowadzenie doświadczenia, które nie tylko potwierdza osiągnięcia projektantów i konstruktorów, lecz również prowadzi do dalszego ulepszenia istniejących rozwiązań konstrukcyjnych. Nic więc dziwnego, że powstaje wiele laboratoriów badawczych, nie tylko w jednostkach naukowych, ale również w obrębie zakładów wytwórczych, które zapewniają konstruktorom i badaczom warunki do systematycznej pracy w warunkach laboratoryjnych.

Pod pojęciem „badania wentylatorów” należy rozumieć pomiary wszelkich wielkości charakteryzujących właściwości użytkowe wentylatorów w różnych warunkach ich pracy. Będą one prowadzone z reguły na odpowiednich stoiskach badawczych, które pozwalają na dokładny i szybki pomiar wszelkich wielkości charakterystycznych w funkcji odpowiednich parametrów, jak również pomiary samych wentylatorów pracujących w sieci mające na celu sprawdzenie nieprawidłowości ich pracy lub regulację ustawień tych wentylatorów.

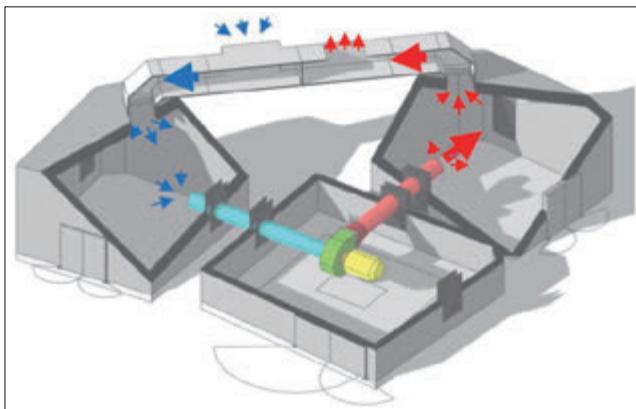
Metrykę wentylatora zawierającą dane pozwalające osobie projektującej instalację na odpowiedni dobór wentylatora, stanowi jego charakterystyka. Zawiera ona krzywe sprężu i sprawności w funkcji wydatku (ilości przetłaczanego powietrza w jednostce czasu) przy różnych prędkościach obrotowych wirnika. Krzywe te uzyskuje się jako wynik szeregu pomiarów prowadzonych na specjalnych stoiskach badawczych, nieraz w wyidealizowanych warunkach pracy wentylatora, w odniesieniu do rzeczywistych. Takie stanowisko badawcze stanowi przewód wentylacyjny lub komora złożona z odpowiednio ukształtowanych elementów zapewniających uzyskanie, w szerokich granicach, zmian wydatku, właściwego przepływu na wlocie do wentylatora przy równoczesnej łatwości obsługi przyrządów regulujących ten przepływ, jak rów-

nież urządzeń pomiarowych. To ostatnie dotyczy w szczególności pomiaru wydatku, sprężu i mocy (momentu). Bardzo ważna jest również uniwersalność stanowiska w rozumieniu możliwości prowadzenia pomiarów szerokiego, z uwagi na wymiary geometryczne i parametry aerodynamiczne, asortymentu wentylatorów. Z fizycznego punktu widzenia pomiar wielkości do określenia charakterystyk wentylatora sprowadza się do pomiaru i obliczenia średnich wartości ciśnienia i prędkości powietrza w jednym lub dwóch (zależne jest to od konstrukcji stanowiska) odpowiednio dobranych przekrojach. Różnica średnich ciśnień statycznych określa spiętrzenie wentylatora, co stanowi energię potencjalną przekazaną masom przepływającego powietrza. Wielkość wydatku i energii kinetycznej (spiętrzenie dynamiczne) otrzymuje się na drodze dokonania odpowiedniego przeliczenia wyników pomiarów ciśnień dynamicznych, wykonanych w odpowiednio dobranych punktach przekrojów pomiarowych. Pomiar momentu (który jest równy przyrostowi krętu masy powietrza przepływającego w jednostce czasu przez wirnik) przeprowadzany jest najczęściej przy użyciu specjalnych urządzeń mechanicznych tzw. kołysek. Pozwalają one na łatwy, w stosunku do innych istniejących metod, pomiar momentu.

W kolejnych rozdziałach niniejszego artykułu przedstawiono prace wykonane w ramach innowacyjnego projektu badawczego COLUBRIS w firmie Nyborg-Mawent, polegające na odpowiednim doborze elementów składowych laboratorium badawczego, które pozwalają na różnorodne badania energetyczne i akustyczne wentylatorów wraz z instalacją. Projekt ten stanowi przykład implementacji elementów zarządzania procesem innowacyjnym w przedsiębiorstwie przemysłowym, obejmujący zarówno planowanie inwestycji badawczo-rozwojowej, jak i wdrożenie nowoczesnych technologii pomiarowych. Utworzenie laboratorium wpisuje się w szerszy kontekst zarządzania innowacjami i rozwoju infrastruktury badawczej jako elementów generowania wiedzy, wspierania nowych produktów i optymalizacji procesów technologicznych.

Opis struktury laboratorium badawczo-rozwojowego

Laboratorium badawcze w Nyborg-Mawent składa się z unikatowego w skali kraju, a nawet Europy, odpowiednio wyposażonego zespołu trzech komór akustycznych oraz pomieszczenia pomiarowego, umożliwiających badania wentylatorów przy wykorzystaniu zebranych danych przepływowych, akustycznych, drganiowych, elektrycznych oraz środowiskowych według serii norm [7-17]. Na rys.1 został zaprezentowany schemat wzajemnego położenia komór akustycznych z zaznaczeniem obiegu czynnika. Tego rodzaju rozmieszczenie dwóch komór pogłosowych oraz jednej bezechowej pozwala na badania nie tylko samego wentylatora, ale również kolektora dolotowego (kolor jasnoniebieski na rys.1) i wylotowego (kolor różowy) wraz z odpowiednim osprzętem. Cechą szczególną takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania bardzo dobrych parametrów akustycznych wnętrza (komora bezchowa) i izolacyjności akustycznej tak, aby zminimalizować poziom tła akustycznego oraz fal akustycznych odbitych od ścian i ograniczyć hałas dochodzący z zewnątrz. Każda z komór ma ponad 200 m² powierzchni użytkowej zapewniając szerokie możliwości pomiarowe. Zespół komór akustycznych pozwala na prowadzenie badań energetycznych oraz akustycznych danego wentylatora w separowanych warunkach środowiska. Pozwala również badać urządzenia wentylacyjne tj. tłumiki, żaluzje, przepustnice, silniki elektryczne oraz wszelkiego rodzaju urządzenia emitujące hałas.



Rys. 1
Schemat układu komór akustycznych z zaznaczonym obiegiem czynnika

Uzyskanie wiarygodnych wyników pomiarów wymaga zapewnienia wysokiej jakości sprzętu pomiarowego, oprogramowania oraz procedur gwarantujących pozyskanie danych w zakładanym przedziale błędów pomiarowych. Oprzyrządowanie opisywanego laboratorium

składa się z szeregu czujników pomiarowych pozwalających na określenie następujących parametrów:

- temperatura i ciśnienie otoczenia,
- wilgotność względna powietrza,
- temperatura i ciśnienie przed zwężką,
- spadek ciśnienia na zwężce pomiarowej,
- temperatura i ciśnienie na ssaniu (wlocie),
- temperatura i ciśnienie na tłoczeniu (wylocie),
- prędkość obrotowa silnika elektrycznego napędzającego wirnik,
- napięcie i natężenie prądu dla każdej fazy,
- napięcia międzyfazowe,
- częstotliwość prądu,
- moc czynna pobierana przez silnik,
- sygnał akustyczny z mikrofonów rozmieszczonych w komorze bezchowej oraz pogłosowych,
- wielkość drgań,
- sygnał określający aktualne położenie dławownicy.

Wymienione wyżej sygnały są pozyskiwane przy użyciu wysokiej klasy specjalistycznych urządzeń, które zostały omówione w dalszej części artykułu.

Wielokanałowy analizator dźwięku i drgań firmy Hottinger Bruel & Kjaer – 4 moduły wraz z oprogramowaniem do rejestracji i analizy danych (BK Connect, PULSE LabShop), który w 18 kanałach umożliwia rejestrację pomiarów wielkości dynamicznych tj.: ciśnienia akustycznego, drgań i prędkości obrotowej, a dodatkowo 16 kanałów umożliwia pomiary sygnałów wolnozmiennych tj.: temperatury, wilgotności, sterowania urządzeniem poprzez sygnały napięcia lub natężenia, np.

– od małych urządzeń, takich jak słuchawki czy mikrofoniki do pojazdów czy nawet w diagnostyce samolotów.

Zestaw kamer akustycznych „Nor848B/Multi-K1” firmy NORSONIC pozwala na rejestrację obrazów rozkładu ciśnienia akustycznego emitowanego przez badany obiekt. W skład trzech matryc kamery akustycznej wchodzi łącznie 384 mikrofony, odpowiednio rozmieszczone względem siebie, oraz centralnie umieszczony rejestrator wideo.

Główne właściwości kamery akustycznej to:

- lokalizacja przemysłowych źródeł hałasu,
- wskazywanie niepożądanego źródła hałasu wytwarzanego przez maszyny,
- lokalizacja zarówno stacjonarnych jak też niestacjonarnych źródeł hałasu, także niskich częstotliwości,
- detekcja nieszczelności występujących w ścianach, przewodach wentylacyjnych,
- identyfikacja wlotów i wylotów powietrza w wentylatorach na terenie zakładów przemysłowych,
- bardzo szybki pomiar z wizualizacją wyników w porównaniu z np. sondą natężeniową.

Kamera do wizualizacji i analizy drgań, która w systemie bezdotykowym umożliwia między innymi monitorowanie drgań różnych urządzeń w czasie rzeczywistym, wizualizację całego procesu produkcyjnego i wyszukiwanie usterek dla poszczególnych urządzeń.

Sonda natężenia dźwięku „B&K 3599” firmy Hottinger Bruel & Kjaer służy do identyfikacji i lokalizacji źródeł dźwięku, również w warunkach wysokiego natężenia dźwięku otoczenia.

Sonda natężenia dźwięku pozwala również wyznaczyć moc akustyczną w komorze bezchowej, a jej główne cechy to:

- możliwość precyzyjnego pomiaru dźwięku z jednego wybranego kierunku, pomijając hałas dochodzący z innych kierunków,
- bardzo dokładne wskazanie najgłośniejszych elementów lub obszarów maszyny zarówno pod względem głośności jak i częstotliwości dźwięku,
- praca w bliskiej odległości od urządzenia,
- możliwość wizualizacji mapy hałasu urządzenia,
- dynamiczna ocena jakości widma akustycznego i jego uciążliwości dla otoczenia.

Referencyjne źródło dźwięku to wzorcowe źródło dźwięku „Nor278”, które znajduje zastosowanie w pomiarach

urządzeniem dławiącym wraz z odpowiedzią zwrotną z czujników wychyleń i położenia. System tego rodzaju wykorzystywany do pomiarów mocy akustycznej znajduje zastosowanie zarówno w przypadku testowania urządzeń o niemalże nieograniczonym spektrum gabarytowym

pozwalających wyznaczyć moc akustyczną. Jego budowa zapewnia jednolitą moc dźwięku o wyjątkowej stabilności długoterminowej. W laboratorium Nyborg-Mawent urządzenie to stanowi referencyjne źródło dźwięku będące podstawowym parametrem do dalszych prac przy wyznaczaniu mocy akustycznej w komorach pogłosowych wg normy ISO 3741, metodą substytucji zgodnie z metodyką ISO 3747. Wysoka wartość emitowanej mocy akustycznej pozwala również na pomiary izolacyjności ścian i konstrukcji dźwiękoizolacyjnych z wyszukiwaniem ścieżek przejścia, słabych miejsc lub eliminowania nadmiarowych efektów izolacji w procesie testowania prototypów.

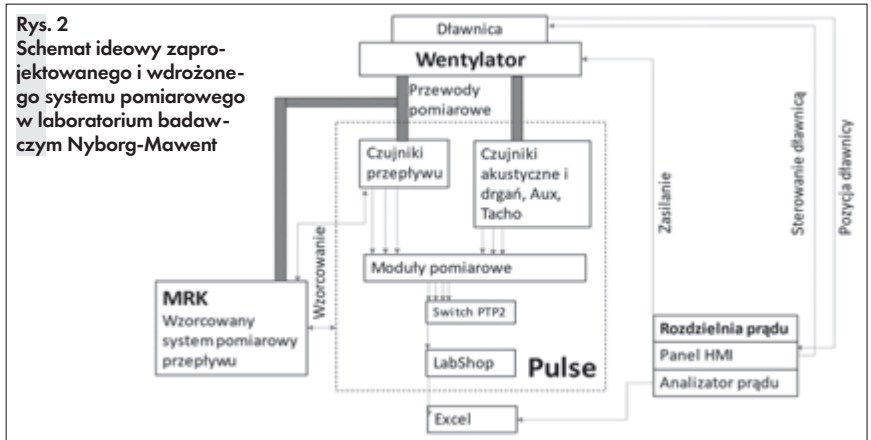
Urządzenie dławicę, w którym zaprojektowana i wykonana w Nyborg-Mawent konstrukcja w kształcie stożka pozwala, przy użyciu siłownika, krańcówek i sterownika, na zdalne i precyzyjne dławienie przepływu czynnika.

Dodatkowo laboratorium do badań wentylatorów przemysłowych firmy Nyborg-Mawent wyposażone jest w urządzenie i aparaturę, które usprawniają proces projektowania i prototypowania wentylatorów przemysłowych wraz z osprzętem. Do tych sprzętów należą:

Skaner 3D ATOS Compact Scan
Jest to lekki, mobilny i szybki optyczny system pomiarowy 3D w technologii niebieskiego światła LED dedykowany do wykonywania precyzyjnych pomiarów konstrukcji z wysoką dokładnością obiektów o wielkości do 3000 mm. Pomiary znajdują zastosowanie zarówno w inżynierii odwrotnej, jak i w analizie metrologicznej, idealnie spełniając swoje zadanie w kontroli jakości półfabrykatów oraz gotowych produktów, a także przy wdrażaniu nowych konstrukcji do produkcji.

Kamera termowizyjna FLIR 96, która pozwala na bezpieczne pomiary badanych obiektów pod kątem gorących punktów oraz szybko diagnozuje awarie elektryczne i mechaniczne różnych urządzeń.

System „Nor1517A” służy do pomiaru porowatości nowych materiałów izolacyjnych w fazie testowania prototypów. System jest zgodny ze standardem ISO9053/DIN EN 29053. Zawiera platformę testową z pistofonem generującym w komorze testowej zmiany ciśnienia o częstotliwości 2 Hz oraz uchwytami do próbek o grubości 0-40 mm i do próbek o grubości 200 mm. Pozwala na kontrolę jakości w procesie wytwarzania oraz umożliwia badania laboratoryjne podczas dopuszczania urządzeń do obrotu. Główne zalety urządzenia to szybkie i dokładne pomiary oraz wydruk ich wyników,



możliwość testów różnych form oraz rozmiarów materiałów oraz prosta konfiguracja i użytkowanie.

Nadrzędnym systemem do akwizycji i analizy danych jest zakupiony w projekcie system PULSE firmy Hottinger Bruel and Kjaer (HBK), wraz z czujnikami i oprogramowaniem. Poniżej został przedstawiony schemat ideowy działania systemu pomiarowego.

Pomiary odbywają się w trzech komorach akustycznych, dźwiękowo odizolowanych od siebie. Główne pomiary odbywają się jednocześnie w dwóch z nich: bezchowej i jednej z pogłosowych: na wlocie lub wylocie wentylatora. Po drugiej stronie: wylocie lub wlocie, znajduje się urządzenie dławicę i w tej komorze pogłosowej nie odbywają się pomiary hałasu, mierzona jest jedynie różnica ciśnienia między komorami pogłosowymi. W komorach tych mierzone są takie parametry, jak:

- ciśnienia statyczne, temperatury do wyznaczenia charakterystyk przepływowych;
- ciśnienia akustyczne do wyznaczenia hałasu wentylatora oraz hałasu na wlocie lub wylocie tegoż wentylatora;
- warunki środowiskowe: wartości temperatury, wilgotność, ciśnienie w komorach pomiarowych oraz ciśnienie atmosferyczne.

Poza komorą, w rozdzielni energii elektrycznej, mierzone i rejestrowane w analizatorze sieci są również parametry prądu.

Badania prowadzone są w celu uzyskania i określenia akustycznych oraz przepływowych charakterystyk wentylatora. Wstępne wyniki badań w laboratorium zaprezentowano w rozdziale następnym.

Wstępne wyniki pomiarów energetycznych oraz generowanego hałasu

Jak zaznaczono w poprzednim rozdziale, badania wykonywane są jednocześnie w dwóch głównych obszarach:

obszar badań przepływowych, pozwalających na stworzenie charakterystyki wentylatora oraz obszar badań akustycznych i drgań. W pierwszym obszarze analizowano przede wszystkim sprawność wentylatora, która odgrywa istotną rolę w ocenie efektywności technicznej tego typu urządzeń. Pozwala ona na identyfikację skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych, które prowadzą do maksymalizacji sprawności, a tym samym do obniżenia zużycia energii elektrycznej oraz kosztów eksploatacji. Dodatkowo, analiza ta wskazuje obszary możliwego rozwoju i dalszej optymalizacji wentylatora.

Zgodnie z aktualnymi normami, parametrami opisującymi pracę wentylatora o stałej lub regulowanej prędkości obrotowej są wydajność, spiętrzenie statyczne lub całkowite oraz moc pobierana przez urządzenie. Wydajność oznacza strumień objętości transportowanego gazu i określa zdolność wentylatora do przetłaczania medium w określonym czasie. Spiętrzenie statyczne to różnica ciśnienia statycznego między wlotem a wylotem wirnika, natomiast spiętrzenie całkowite uwzględnia również składnik dynamiczny, czyli całkowity wzrost ciśnienia powietrza. Moc pobierana wyraża ilość energii zużywanej przez wentylator w trakcie pracy – jest to energia przekazywana do gazu przez wirnik, zwiększająca jego prędkość i ciśnienie. Sprawność całkowita, inaczej nazywana sprawnością wewnętrzną wentylatora, określa stosunek mocy użytecznej do mocy wewnętrznej (mocy mechanicznej na wale wentylatora). Prędkość obrotowa wirnika wentylatora to liczba obrotów jakie wykonuje wirnik w jednostce czasu. Wymienione wielkości tj. spiętrzenie statyczne lub całkowite, moc i sprawność w funkcji wydajności przedstawione na jednym wykresie oraz dla jednej konkretnej prędkości obrotowej nazywane są charakterystyką wentylatora. Pozwalają one na dobór urządzenia w konkretnym zakresie ciśnień i przepływu czynnika, pozwalają

także przewidzieć zużycie energii elektrycznej przez urządzenie przy różnych wartościach przepływu powietrza.

Sprawność wewnętrzna wentylatorów przemysłowych uwzględnia wszystkie straty energii powstające podczas konwersji energii mechanicznej na wale wirnika na przyrost ciśnienia czynnika. Obliczamy ją ze stosunku mocy użytecznej i mocy wewnętrznej:

$$\eta_i = \frac{N_u}{N_i} \quad (1)$$

gdzie:

N_u – moc użyteczna,
 N_i – moc wewnętrzna.

Moc użyteczna jest to energia, którą otrzymał gaz od silnika elektrycznego w danym czasie. Wartość mocy użytecznej obliczana jest za pomocą iloczynu wydajności i spiętrzenia całkowitego gazu. W przypadku wysokociśnieniowych wentylatorów o spiętrzeniu całkowitym większym niż 3,6 kPa należy dodatkowo uwzględnić współczynnik korekcyjny. Wzór umożliwiający obliczenie tego parametru został przedstawiony poniżej:

$$N_u = \dot{Q}_s \cdot \Delta P_{całk} \cdot f \quad (2)$$

gdzie:

\dot{Q}_s – wydajność wentylatora,
 $\Delta P_{całk}$ – spiętrzenie całkowite wentylatora,
 f – współczynnik korekcyjny, inaczej nazywany liczbą zmniejszenia mocy (pomijalny dla $\Delta P_c < 3,6$ kPa).

Wydajność wentylatora jest określona jako strumień objętości gazu przepływającego przez wentylator. Obliczana jest za pomocą poniższego wzoru:

$$\dot{Q}_s = A_2 \cdot c_{2m} = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \text{tg}\beta_1 \cdot \frac{1}{\tau_1} \quad (3)$$

gdzie:

A_2 – przekrój charakterystyczny u wylotu z koła wirnikowego z uwzględnieniem grubości łopatki,
 c_{2m} – składowa merydionalna prędkości,
 D_1 – średnica wewnętrzna rury,
 b_1 – szerokość wirnika na wlocie,
 β_1 – kąt łopatki na wlocie,
 τ_1 – współczynnik zwężenia przekroju na wlocie.

Spiętrzenie całkowite określone jest jako przyrost ciśnienia pomiędzy wlotem a wylotem z wirnika wentylatora. Obliczane jest za pomocą poniższego wzoru:

$$\Delta P_{całk} = \Delta P_{całk_{wylot}} - \Delta P_{całk_{wlot}} = \mu \cdot \eta_p \cdot \rho \cdot (u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}) \quad (4)$$

gdzie:

$\Delta P_{całk_{wylot}}$ – ciśnienie całkowite gazu na wylocie z wirnika,

$\Delta P_{całk_{wlot}}$ – ciśnienie całkowite gazu na wlocie do wirnika,

η_p – sprawność przepływu wentylatora,

ρ – gęstość gazu,

u_2, u_1 – prędkości obwodowe u wylotu i wlotu wirnika,

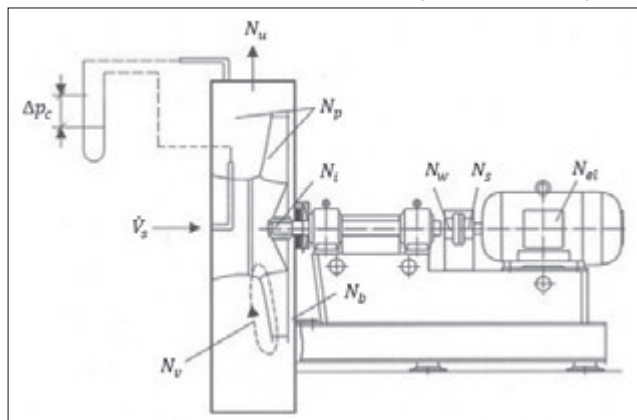
c_{2u}, c_{1u} – składowe obwodowe prędkości bezwzględnych,

f – liczba zmniejszenia mocy.

Liczba zmniejszenia mocy jest parametrem, który należy uwzględnić ze względu na różnicę pomiędzy wirnikiem rzeczywistym, a fikcyjnym ujęciem wirnika przez Eulera. Euler zakładał nieskończoną liczbę kanałów międzyłopatkowych, podczas gdy w rzeczywistości ich liczba jest skończona. Rozbieżności są również w profilach prędkości względnych i bezwzględnych.

Moc wewnętrzna jest to całkowita moc mechaniczna przekazana do wirnika przez silnik, określa się ją jako moc elektryczną silnika po uwzględnieniu spraw-

Rys. 3
Moc użyteczna oraz straty mocy nanesione na schemat wentylatora promieniowego [1]



ności silnika i strat mocy w układzie mechanicznym:

$$N_i = N_{el} \cdot \eta_{sil} - N_m \quad (5)$$

gdzie:

N_{el} – moc elektryczna silnika,
 η_{sil} – sprawność silnika wzięta z charakterystyki producenta dla punktu pracy wentylatora,
 N_m – straty mocy w układzie mechanicznym złożonym z łożyskowania i sprzęgła.

Moc wewnętrzną można również opisać jako sumę mocy użytecznej i trzech rodzajów strat mocy występujących w wentylatorach promieniowych

$$N_i = N_u + N_p + N_v + N_b \quad (6)$$

gdzie:

N_u – moc użyteczna,
 N_p – strata mocy przepływowej,
 N_v – strata mocy wolumetryczna,
 N_b – strata mocy brodzenia.

Straty w wentylatorach promieniowych są bardzo istotne, ponieważ poprzez ich minimalizowanie możemy uzy-

ścić większą sprawność urządzenia, która jest ważnym zagadnieniem w niniejszym artykule. Wyróżniamy trzy główne rodzaje straty mocy:

1. Strata ciśnienia w przepływie przez wirnik i obudowę, w której skład wchodzi:
 - straty w leju wlotowym,
 - straty zmiany kierunku przepływu z osiowego na promieniowy,
 - straty tarcia (w wirniku w kanale międzyłopatkowym oraz w obudowie),
 - straty niestycznego napływu do wieńca,
 - straty w obudowie spiralnej.
2. Strata brodzenia.
3. Strata wolumetryczna.

Znane i wcześniej opisane moce, straty mocy oraz inne parametry można nanieść na układ przepływowy i napędowy wentylatora, co zostało przedstawione na rys.3.

Posługując się powyższe przedstawioną mocą użyteczną N_u i elektryczną N_{el} oraz

stratami mocy, można dla każdej z tych strat wyznaczyć również sprawności:

– sprawność przepływu

$$\eta_p = \frac{N_u}{N_u + N_p} \quad (7)$$

– sprawność brodzenia

$$\eta_b = \frac{N_u + N_p}{N_u + N_p + N_b} \quad (8)$$

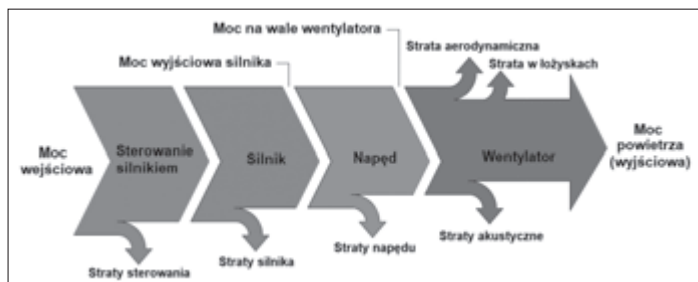
– sprawność wolumetryczna

$$\eta_v = \frac{N_u + N_p + N_b}{N_u + N_p + N_b + N_v} \quad (9)$$

Mnożąc sprawność przepływu, sprawność brodzenia oraz sprawność wolumetryczną przez siebie otrzymujemy sprawność wewnętrzną wentylatora:

$$\eta_i = \eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_v \quad (10)$$

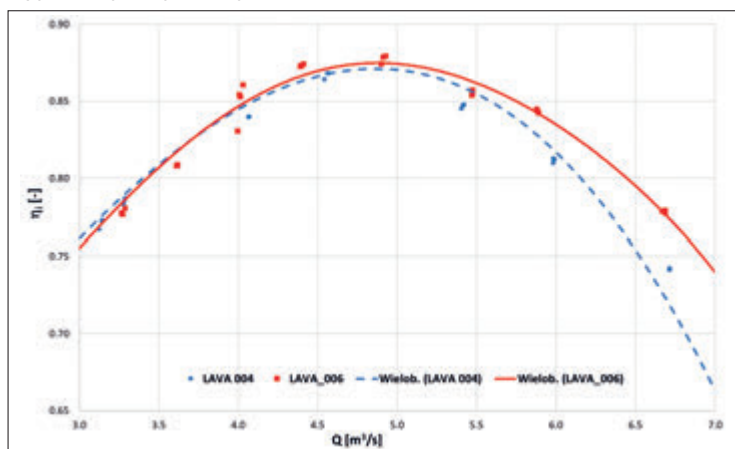
Na podstawie literatury [4] został sporządzony rys.4, który przedstawia moce oraz straty na wykresie Sankeya. Moc przedstawiona na tego typu wykresie



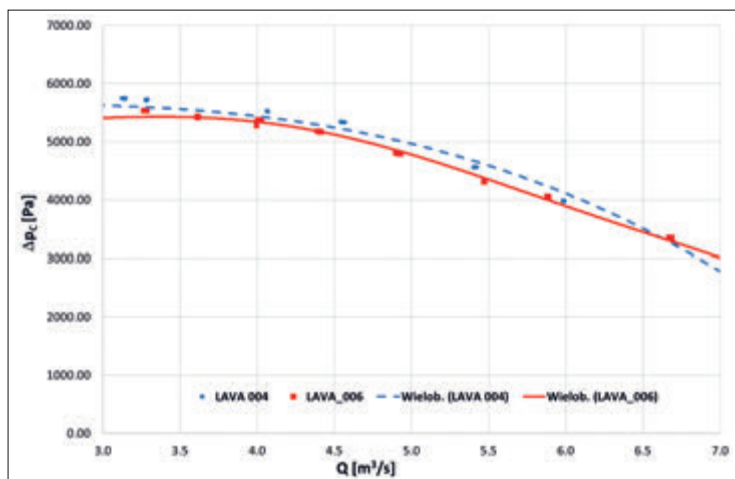
Rys. 4
Wykres Sankeya przedstawiający moce oraz ich straty w poszczególnych elementach wentylatora promieniowego [4]

przechodzi od lewej do prawej strony. Każdy element wentylatora przynosi wcześniej opisane już straty i dla każdego komponentu można oddzielnie opisać jego sprawność poprzez stosunek mocy wyjściowej i wejściowej.

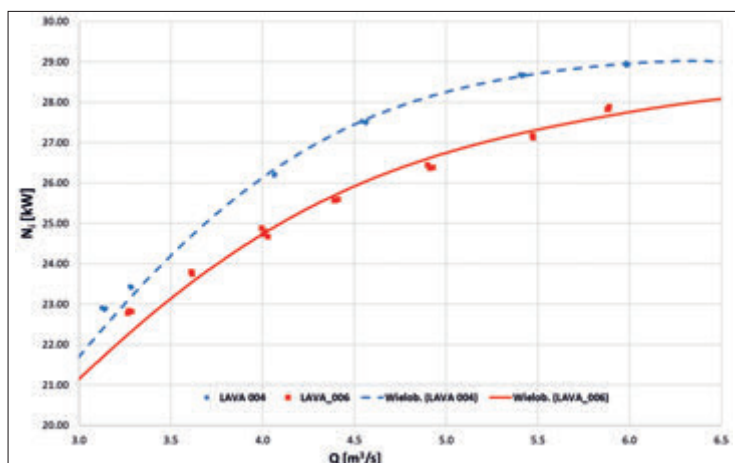
Poniżej zaprezentowano przykładową charakterystykę sprawności wewnętrznej (rys.5) spiętrzenia całkowitego (rys.6) oraz mocy (rys.7) w funkcji wydajności dla przypadku jednego typu wentylatora w dwóch rozwiązaniach konstrukcyjnych



Rys. 5
Wykres sprawności wewnętrznej w funkcji wydajności dla dwóch przykładowych rozwiązań konstrukcyjnych tego samego typu wentylatora



Rys. 6
Wykres spiętrzenia całkowitego w funkcji wydajności dla dwóch przykładowych rozwiązań konstrukcyjnych tego samego typu wentylatora



Rys. 7
Wykres mocy wewnętrznej w funkcji wydajności dla dwóch przykładowych rozwiązań konstrukcyjnych tego samego typu wentylatora

(oznaczenie LAVA004 oraz LAVA006). Na wykresach przedstawiono wartości obliczonych sprawności dla danych punktów pomiarowych w każdym rozwiązaniu konstrukcyjnym wentylatora oraz aproksymację charakterystyki za pomocą wielomianu. Procedura pomiarowa zapewnia zapis po trzy punkty pomiarowe dla każdego ustawienia urządzenia dławiącego, które potem są uśredniane.

Drugim analizowanym aspektem brany pod uwagę w budowie laboratorium był hałas generowany przez wentylatory, ponieważ w procesach wentylacji przemysłowej wibracje i emitowany hałas mogą stanowić poważny problem. Źródłem hałasu wentylatora są wibracje jego wirnika, korpusu, orurowania, fundamentu, silnika napędowego i wielu innych elementów. Wysoki poziom hałasu jest szkodliwy dla człowieka – powoduje zmęczenie i zdenerwowanie pracowników, osłabia ich koncentrację, ma negatywny wpływ na zdrowie osób narażonych na hałas i w efekcie może prowadzić do uszkodzenia słuchu. W instalacjach, w których pracują wentylatory, hałas wytwarzany jest przez zjawiska mechaniczne, elektromagnetyczne i aerodynamiczne [19].

Hałas generowany przez wentylator zależy od jego typu, prędkości przepływu powietrza i ciśnienia. Zwiększony poziom hałasu danego typu wentylatora jest często wynikiem jego nieefektywnej pracy. Źródłami wibracji i hałasu w samym wentylatorze są m.in.:

- konstrukcja, niewyważenie termiczne (nierównomierność nagrzewania, nierównomierność przepływu), niewyważenie eksploatacyjne (osadzanie się cząstek czynnika roboczego, erozja wirnika),
- zginanie, np. z powodu dużych sił stałych i ugięcia materiału,
- zgubione elementy, np. łopatka,
- tarcie o elementy korpusu w wyniku wysokich wibracji, trwałe zginanie wirnika lub osiowe przemieszczenie wirnika jako całości,
- rezonans łopatek prowadzący do drgań rezonansowych, a w konsekwencji do zmęczenia materiału.

Również silniki napędzające wentylator wytwarzają znaczący hałas podczas pracy. Jednak wirniki wentylatorów są głośniejsze, a różnica między poziomami dźwięku wentylatora i silnika często przekracza 6 dB, więc są one z reguły niesłyszalne przez człowieka. Istnieją tabele przedstawiające poziom hałasu silników o różnych rozmiarach dla różnych prędkości obrotowych [1].

Niestacjonarny przepływ gazu z dyszy jest typowym monopolarnym źródłem dźwięku. Zgodnie ze wzorem (11) moc akustyczna takiego źródła jest proporcjonalna do czwartej potęgi prędkości gazu c^4 i jego gęstości ρ , kwadratu wymiaru geometrycznego strumienia l^2 i odwrotnie proporcjonalna do prędkości dźwięku a_d .

$$N \frac{\rho \cdot c^4}{a_d} \cdot l^2 \quad (11)$$

Na podstawie analizy wymiarowej natężenie dźwięku można przedstawić wzorem (12):

$$l = \rho \cdot c^3 = \frac{\rho^2 \cdot c^4}{\rho \cdot c} = \frac{\bar{p}^2}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

gdzie \bar{p} jest efektywną wartością ciśnienia akustycznego RMS (ang. Root Mean Square).

Hałas rzeczywisty, modelowany przez dipol akustyczny, jest wytwarzany przez stacjonarne i niestacjonarne siły istniejące w źródle. W przypadku wentylatorów siły są generowane, gdy łopatki wirnika i niektóre elementy obudowy przepływają wokół strumienia gazu z dowolnym rozkładem prędkości zależnym od czasu lub z profilem niezależnym od czasu (stacjonarnym).

W bilansie strat energii wentylatora można pominąć moc akustyczną. Jednak hałas związany z rozprzestrzenianiem się tego typu energii jest bardzo dokuczliwy.

Cząsteczki powietrza stykające się z powierzchniami wentylatora wprowadzane są w drgania, które ze względu na sprężystość ośrodka przenoszone są na sąsiednie cząsteczki. Energia przekazywana w celu wytworzenia ruchu wibracyjnego otaczających cząstek jest energią wypromieniowywaną.

Moc akustyczna wypromieniowywana do przestrzeni wokół wentylatora zależy w pierwszym przybliżeniu od mocy silnika napędzającego wentylator, która z kolei zależy od wydajności i wzrostu ciśnienia. Poziom mocy akustycznej można obliczyć z dużym przybliżeniem ze wzoru (13):

$$L_N [dB] = 70 + 10 \lg N_s (kW) + 10 \lg \Delta p_c \quad (13)$$

gdzie:

N_s – moc znamionowa silnika elektrycznego [kW],

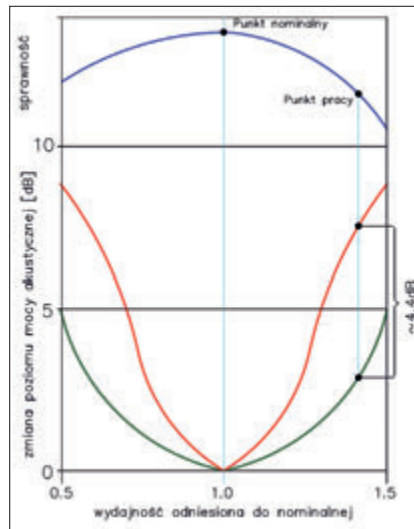
Δp_c – tłumienie wentylatora [Pa].

Wibracje wentylatorów mogą również generować hałas. Wibracje mechaniczne wentylatora lub jego elementów powstają w wyniku:

- niewyważenia mas wirujących,

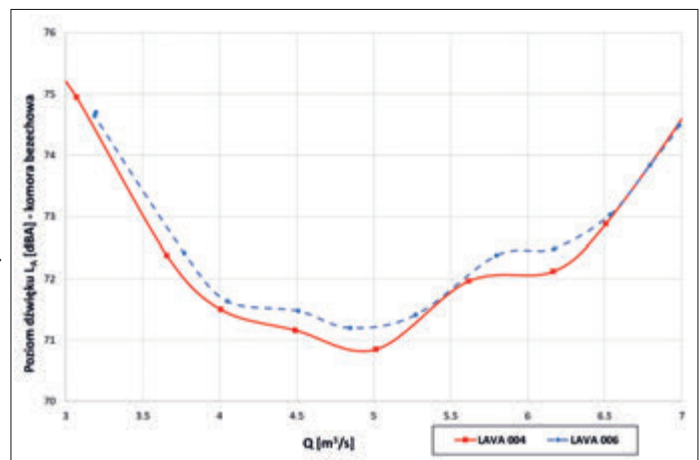
- nieosiowego sprzężenia części sprzęgła,
- pracy w pobliżu rezonansu,
- zaburzeń przepływu aerodynamicznego,
- uszkodzenia łożysk i nieprawidłowych luzów,
- zakłócenia elektromagnetycznego wpływającego na silnik,
- zakłóceń spowodowanych wibracjami zewnętrznymi.

Ponieważ wentylator może pracować w dowolnym punkcie swojej charakterystyki w zależności od rezystancji instalacji, rzeczywisty punkt pracy w instalacji jest definiowany jako punkt pracy. Specyficzny poziom mocy akustycznej wentylatora zmienia się wraz z natężeniem przepływu. Najniższy poziom hałasu generowanego przez wentylator odpowiada w przybliżeniu optymalnej wydajności. Poszczególne odchylenia przepływu objętościowego,



Rys. 8
Charakterystyka przykładowego wentylatora, gdzie: sprawność – linia niebieska, różnica poziomu mocy akustycznej właściwej w nominalnym punkcie pracy – linia zielona oraz zmiana różnicy poziomu mocy akustycznej właściwej w funkcji zmiany strumienia objętości – linia czerwona

Rys. 9
Wykres poziomu generowanego hałasu w funkcji wydajności w komorze bezchłowej dla dwóch przykładowych rozwiązań konstrukcyjnych tego samego typu wentylatora



zgodnie z rys.8, pokazują wpływ przesunięcia punktu pracy na poziom generowanego hałasu [20]. Przykładowo, wzrost strumienia objętości o około 40 % w stosunku do wartości nominalnej powoduje wzrost jednostkowego poziomu mocy akustycznej o ponad 4 dB.

Jeśli nie można uniknąć wysokiego poziomu hałasu wentylatora, należy zastosować środki mające na celu zmniejszenie energii akustycznej. Aby zmniejszyć hałas, inżynierowie stosują różne metody, np. izolację kanałów, gumę lub odpowiedni izolator sprężynowy lub montaż wentylatora na miękkiej podstawie, również z zastosowaniem materiałów wibroizolacyjnych. Innym sposobem jest zaizolowanie dźwiękochłonnego materiału tłumiącego lub przegród pochłaniających wibracje. Aktywne metody kontroli hałasu są również bardzo ważnym obszarem redukcji hałasu.

Poniżej zaprezentowano przykładową charakterystykę generowanego hałasu przez wentylator w komorze bezchłowej (rys.9) w funkcji wydajności dla przypadku jednego typu wentylatora w dwóch rozwiązaniach konstrukcyjnych (oznaczenie LAVA004 oraz LAVA006). Można zauważyć, że różnice poziomów dźwięku w całym zakresie wydajności przekraczają 4 dB, natomiast różnica pomiędzy oboma badanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi wynosi w tym przypadku około 0,5 dB.

Dyskusja i podsumowanie

W artykule przedstawiono kompleksowy proces projektowania, budowy i uruchomienia nowoczesnego laboratorium badawczo-rozwojowego przeznaczonego do analiz wentylatorów przemysłowych, realizowanego w ramach innowacyjnego projektu „COLUBRIS” w firmie Nyborg-Mawent. Zaprojektowana i wykonana infrastruktura umożliwiła prowadzenie wszechstronnych badań przepływowych,

akustycznych i drganiowych w kontrolowanych warunkach środowiskowych, zgodnie z obowiązującymi normami. Laboratorium wyposażone zostało w zestaw trzech komór akustycznych (jednej bezechowej i dwóch pogłosowych), stanowiska pomiarowe oraz zaawansowane systemy rejestracji i analizy danych. Zastosowane urządzenia – w tym analizatory dźwięku i drgań, kamery akustyczne, skanery 3D, sondy natężenia dźwięku czy urządzenia dławiące – pozwalają na prowadzenie badań z dużą dokładnością oraz wysokim poziomem powtarzalności. W ramach pierwszych eksperymentów wykonano pomiary przepływowe i akustyczne wybranych konstrukcji wentylatorów promieniowych. Wyniki potwierdziły możliwość precyzyjnego wyznaczenia charakterystyk urządzeń, w tym sprawności wewnętrznej, strat mocy i poziomów hałasu. Przeprowadzone badania wykazały m.in. istotny wpływ przesunięcia punktu pracy od punktu nominalnego na wzrost emisji hałasu.

Laboratorium stanowi nie tylko platformę do testów wentylatorów, ale także narzędzie wspierające proces projektowania i optymalizacji tych urządzeń. Umożliwia weryfikację założeń konstrukcyjnych, identyfikację źródeł hałasu, a także walidację modeli numerycznych i symulacyjnych. Pozwala również na badania nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych, które mają kluczowe znaczenie w kontekście efektywności energetycznej i wymogów środowiskowych. Zrealizowane przedsięwzięcie wpisuje się w globalne działania na rzecz ograniczenia zużycia energii elektrycznej i emisji hałasu przemysłowego. Zastosowana metodologia oraz opracowane rozwiązania mogą stanowić punkt odniesienia dla podobnych inicjatyw w skali krajowej i międzynarodowej. Takie inicjatywy,

jak ta, którą przedstawiono w artykule, będą prawdopodobnie coraz ważniejsze w obliczu rosnących wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju i efektywności energetycznej w przemyśle. Rozwój zaawansowanej infrastruktury badawczej wspierającej innowacje technologiczne będzie odgrywać kluczową rolę w transformacji przemysłu ku bardziej ekologicznym i cichszym rozwiązaniom.

WYKAZ BIBLIOGRAFII

- [1] Fortuna Z. Wentylatory Podstawy teoretyczne zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie Sprężarki przepływowe, Wydawnictwo: Techwent s.c., Kraków 1998.
- [2] Piwowarski M. Sprężarki przepływowe, Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2017.
- [3] Strona internetowa: <https://www.iea.org> (dostęp: 05.08.2024 r.)
- [4] Tuliszka E., Sprężarki, dmuchawy i wentylatory, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1976
- [5] Walczak J. Promieniowe sprężarki, dmuchawy i wentylatory, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2013
- [6] Witkowski A. Sprężarki wirnikowe, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013
- [7] Norma PN-EN-ISO-5801:2008E-1 Wentylatory przemysłowe – badanie charakterystyk działania na stanowiskach znormalizowanych, 2008,
- [8] Norma PN-EN-ISO-5801:2017-12 Wentylatory – – Badanie właściwości użytkowych z zastosowaniem stanowisk znormalizowanych, 2017,
- [9] Norma PN-EN ISO 5167-1:2022-12 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężeń pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym – – Część 1: Zasady i wymagania ogólne, 2022,
- [10] Norma PN-EN ISO 5167-2:2022-12 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężeń pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym – – Część 2: Kryzy, 2022,
- [11] Norma PN-EN ISO 13349-1:2023-04 Wentylatory – – Terminologia i definicje kategorii – – Część 1: Słownictwo, 2023,
- [12] Norma PN-EN ISO 13351:2025-02 Wentylatory – – Wymiary, 2025,
- [13] Norma PN-EN ISO 5802:2008 Wentylatory przemysłowe – – Badania charakterystyk działania w miejscu zainstalowania, 2008,
- [14] Norma PN-EN ISO 3741:2011 Akustyka – – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – – Metody dokładne w komorach pogłosowych, 2011,
- [15] Norma PN-EN ISO 3745:2012 Akustyka – – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – – Metody dokładne w komorach bezechowych i w komorach bezechowych z odbijającą podłogą, 2012,
- [16] Norma PN-ISO 9613-2:2002 Akustyka – – Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej – – Ogólna metoda obliczania 2002,
- [17] Norma PN-EN ISO 354:2005 Akustyka – – Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej 2005,
- [18] Kryłłowicz W., Kabałyk K. Charakterystyki promieniowych sprężarek procesowych, INSTAL 5/2021, DOI: 10.36119/15.2021.5.2
- [19] Sorgüvena, E.; Doğan, Y. Acoustic optimization for centrifugal fans Noise Control Engr. J. 60 (4), July–August 2012.
- [20] Strona internetowa: <https://www.reitzgroup.com/en/downloads.html>, [data dostępu 26-10-2022], Reitz - Handbook Radial Fans, 2012.

Finasowanie

Opisane w artykule działania zostały wykonane w ramach projektu „Opracowanie wentylatorów o konstrukcji uwzględniającej w unikalnym stopniu uwarunkowania instalacyjne w celu redukcji emisji hałasu i wzrostu sprawności energetycznej” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020. Rolę Instytucji Pośredniczącej w programie pełni Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.