

Autonomiczny system zdalnego pomiaru wentylatorów przemysłowych jako rezultat etapu projektu innowacyjnego

Autonomous remote measurement system for industrial fans as a result of an innovative project stage

MARIAN PIWOWARSKI, PAWEŁ ZIEMIAŃSKI, JACEK CZYŻEWICZ, MATEUSZ BORTKIEWICZ, KRZYSZTOF LASZUK, IRENEUSZ GALARA, MARTA PAWŁOWSKA, KAROL CYBULSKI

DOI 10.36119/15.2022.3.3

W artykule przedstawiono proces budowania oraz testowania zdalnego, całkowicie autonomicznego systemu pomiaru parametrów pracy wentylatorów. Proces zrealizowano w ramach pierwszego etapu innowacyjnego projektu. Przedstawiono szczegółowe kroki budowy systemu zbierania i przetwarzania danych pomiarowych z wentylatorów zainstalowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji oraz wyniki ich analizy. W szczególności opracowano i wdrożono infrastrukturę pomiarową w tym również zdefiniowano zestaw niezbędnej aparatury pomiarowej. Zamontowano aparaturę pomiarową na wyselekcjonowanych instalacjach z odpowiednimi wentylatorami. Wdrożono systemy pozwalające na ciągłe pomiary parametrów instalacji, zdalny przesył danych na serwer, gdzie poddawany jest bieżącej analizie i selekcji zebranych danych do wykorzystania w procesie modelowania i diagnostyki. Zweryfikowano eksperymentalnie zadowalający stopień korelacji między wyselekcjonowanymi parametrami mierzonymi w warunkach rzeczywistych, a charakterystyką wentylatora i instalacji. Wyznacznikiem tego było znalezienie czterech istotnych statystycznie parametrów na poziomie ufności 95%.

Słowa kluczowe: wentylatory, pomiary, zdalne systemy pomiarowe i diagnostyczne, charakterystyki wentylatorów, zarządzanie projektem innowacyjnym, przedsiębiorcza organizacja

The article presents the process of building and testing a remote, fully autonomous system for measuring fan operating parameters. The process was completed as part of the first stage of an innovative project. The paper includes detailed steps of constructing a system for collecting and processing measurement data from fans installed in their operating conditions and the results of their analysis. In particular, the measurement infrastructure was developed and implemented, including determining a set of necessary measurement equipment. Measuring equipment was installed in selected fans installations. Systems have been implemented that allow for continuous measurement of installation parameters and remote data transmission to the server, followed by an ongoing analysis and selection of the collected data for use in the modeling and diagnostics process. A satisfactory degree of correlation between the selected parameters measured in actual operating conditions and the characteristics of the fan and the installation was verified experimentally. Its indication was finding 4 statistically significant parameters at the confidence level of 95%.

Keywords: fans, measurements, remote measurement and diagnostic systems, fan characteristics, managing innovative project, entrepreneurial organization

Wprowadzenie

Firma chcąc zbudować lub utrzymać przewagę konkurencyjną musi dążyć do tego, by oferować swoim klientom produkty w możliwie dużym stopniu odpowiadające

ich potrzebom i pomagające im sprostać wyzwaniom, z którymi sami się mierzą [1]. Wyzwania te powiązane są z kolei z megatrendami określanymi jako duże zmiany społeczne, gospodarcze, polityczne i technologiczne, które formują

się powoli i oddziałują na ludzi przez dłuższy czas [2]. Należy do nich między innymi rosnący nacisk społeczeństw i polityków na wprowadzanie rozwiązań zmierzających do ograniczenia negatywnego wpływu człowieka na środowisko [3, 4].

dr hab. inż. Marian Piwowarski <https://orcid.org/0000-0001-8475-5686>, marian.piwowarski@pg.edu.pl,
dr inż. Jacek Czyżewicz <https://orcid.org/0000-0002-7053-4919> – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, jacek.czyzewicz@pg.edu.pl,
dr Paweł Ziemiański <https://orcid.org/0000-0002-4391-9282> – Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii, pawel.ziemianski@pg.edu.pl,
mgr inż. Mateusz Bortkiewicz mbortkiewicz@nyborg-mawent.com, inż. Krzysztof Laszuk klaszuk@nyborg-mawent.com,
inż. Ireneusz Galara igalara@nyborg-mawent.com, mgr Marta Pawłowska mpawlowska@nyborg-mawent.com,
inż. Karol Cybulski kcybulski@nyborg-mawent.com – Nyborg-Mawent

Przykładem jest pakiet regulacji klimatycznych Unii Europejskiej Fit for 55 mających na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w Europie o nie mniej niż 55% do 2030 roku w porównaniu z poziomem z 1990 r. Regulacje takie jak ta wiążą się ze znaczącym wzrostem cen energii i sensowności poszukiwania rozwiązań technicznych, które są bardziej sprawne. Innym megatrendem jest rozwój sztucznej inteligencji i automatyzacji pozwalający na przykład efektywniej zbierać, identyfikować i analizować dane dotyczące eksploatacji urządzeń, dzięki którym możliwe jest ich usprawnianie, dostosowanie parametrów pracy do specyficznych warunków, które napotykają, a także określanie stanu urządzenia i przewidywanie możliwych awarii [3, 5].

Decyzje managerskie zmierzające do takiego dostosowania się do megatrendów, które stawia firmę w awangardzie zmian, nie są łatwe. Wiążą się bowiem z postawieniem na innowacyjność, z podjęciem ryzyka oraz koniecznością proaktywnego działania w celu zdobycia oraz zapewnienia niezbędnych zasobów. Takie działanie firm można określić mianem przedsiębiorczego [6, 7]. W niniejszym artykule opisano wybrane działania i rezultaty jednego z etapów innowacyjnego projektu realizowanego przez firmę Nyborg-Mawent. Projekt ten jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Jego finalnym celem jest opracowanie wentylatora przemysłowego o unikalnej konstrukcji, który będzie stanowił lepszą niż dotychczasowa odpowiedź na stojące przed firmą i jej klientami wyzwania. Plan artykułu jest następujący: w jego pierwszej części opisane zostaną rodzaje wentylatorów oraz zaprezentowane wyzwania, które wiążą się z dotychczas dominującym podejściem do ich konstrukcji i ich częstym przewymiarowaniem, a także wskazanie obszarów możliwej optymalizacji wentylatorów. W dalszej części zostanie zamieszczony opis założeń i przebieg badań realizowanych w ramach pierwszego etapu opisywanego projektu badawczo – rozwojowego, a także pokazane zostanie innowacyjne rozwiązanie, które pozwoliło na poradzenie sobie z napotkanym w ramach realizacji projektu wyzwaniem. Następnie zaprezentowane zostaną wyniki realizowanych na tym etapie projektu badań, których celem będzie budowa modelu matematycznego zawierającego istotne parametry wpływające na sprawność wentylatora. Artykuł zostanie zakończony podsumowaniem zawierającym dyskusję i wnioski.

Rodzaje i zastosowanie wentylatorów

Wentylatory dzielimy ze względu na sposób zabudowy, cechy konstrukcyjne, wartość ciśnienia, liczbę wirników, zastosowanie oraz miejsce zamontowania. Z względu na sposób zabudowy wyróżnia się wentylatory tłoczące, ssące oraz mieszane, czyli tłocząco-ssące. Bardzo szeroką grupą są wentylatory ogólnego zastosowania. Można znaleźć maszyny, które są przeznaczone do użytku tylko w konkretnych miejscach np. wentylatory kopalniane czy morskie. Wentylatory znajdują również zastosowanie w transporcie. Używa się ich do transportowania materiałów aktywnych chemicznie, w tym gazów, spalin oraz kwasów, a także do transportowania pneumatycznego. Wyróżniamy także wentylatory przeciwwybuchowe oraz oddymiające. Te pierwsze wykorzystywane są do zastosowania w pomieszczeniach, zagrożonych wybuchami, między innymi w pracowniach chemicznych czy laboratoriach. Z kolei wentylatory oddymiające znajdują zastosowanie tam, gdzie może zaistnieć potrzeba usuwania powietrza, w którym znajdują się różnego rodzaju dymy, w tym pożarowe. Można je zamontować w galeriach handlowych, na podziemnych parkingach czy w biurach. Znakomicie sprawdzają się również jako urządzenia oddymiające w dużych kuchniach, na przykład w restauracjach czy na stołówkach. Wentylatory można podzielić również ze względu na miejsce ich zamontowania na wentylatory ściennie, sufitowe czy dachowe [8-10]. Przykłady zastosowania wentylatorów: instalacje wentylacyjne (przewietrzanie pomieszczeń), odlewnie, elektrownie, kopalnie, kina, sale wykładowe itp.:

- do chłodzenia silników i generatorów energii elektrycznej;
- do chłodzenia silników spalinowych;
- wentylatorowe chłodnie kominowe;
- skraplacze powietrza w układach chłodniczych;
- jako wentylatory ciągu i podmuchu,
- w układach elektronicznych do chłodzenia podzespołów.

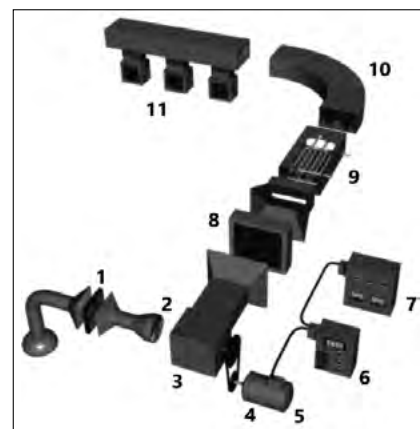
Przyczyny przewymiarowania i podwyższonej energochłonności wentylatorów

Wentylatory oraz ich instalacje to bardzo często niedoceniany składnik instalacji przemysłowych. Dotyczy to, nie tylko generowanego hałasu, a przede wszystkim zużycia energii elektrycznej. Około 80% wytworzonej energii elektrycznej jest

konsumowana przez silniki elektryczne, z czego około 15% zużywają silniki napędzające wentylatory. W USA zainstalowane wentylatory w sektorze przemysłowym zużywają około 11% energii elektrycznej wszystkich przemysłowych napędów silnikowych [11, 12]. Zatem poprawa wydajności wentylatora to bardzo ważny krok w kierunku zmniejszenia globalnego zużycia energii. Wentylator należy rozważać zawsze jako cały system w połączeniu z instalacją i innymi elementami (rys. 1.), w skład których wchodzi:

- dolot (dysze dolotowe, skrzynie dolotowe, dyfuzory łopatkowe, filtry);
- odpowiednio dobrany wentylator (łopatki kierownicze, łopatki wirnikowe, dyfuzory bezłopatkowe, kanały nawrotne itp.);
- napęd wentylatora (bezpośredni, za pomocą paska, przekładniowy) z układem sterowania i regulacji;
- przegrody oraz odpowiednia armatura;
- wylot (kierownice naprowadzające, kolektory wylotowe, tłumiki);
- wymienniki ciepła.

Ekonomiczna eksploatacja i utrzymanie układu wentylacji wymaga właściwego podejścia, nie tylko analizy potrzeb poszczególnych elementów wyposażenia, ale także do systemu jako całość. „Podejście systemowe” analizuje zarówno wlot do układu jak i wylot, ale również sposób ich wzajemnej interakcji. Często projektanci instalacji są bardzo skoncentrowani na bezpośrednie wymagania poszczególnych elementów,



Rys. 1. Przykład instalacji z użyciem wentylatora promieniowego, gdzie 1 – Filtr, 2 – Dysze dolotowe, 3 – Wentylator promieniowy, 4 – Pas napędowy, 5 – Silnik napędowy, 6 – Układ falownikowy, 7 – Układ sterowania, 8 – Przegrody, 9 – Wymiennik ciepła, 10 – Kierownice odwracające przepływ, 11 – Dysze wylotowe
Fig. 1. Installation example with a centrifugal fan, where: 1 – Filter, 2 – Inlet Vanes, 3 – Centrifugal Fan, 4 – Belt Drive, 5 – Motor, 6 – Variable Frequency Drive, 7 – Motor Controller, 8 – Baffles, 9 – Heat Exchanger, 10 – Turning Vanes, 11 – Outlet Diffusers

pomijając system, który oddziałuje na poszczególne jego składowe. Podejście systemowe zazwyczaj obejmuje następujące elementy/rodzaje powiązanych ze sobą działań:

- ustalanie aktualnych warunków i parametrów pracy,
- określanie aktualnego stanu oraz określanie przyszłego stanu produkcji procesowej,
- gromadzenie i analiza danych operacyjnych oraz opracowywanie cykli obciążenia,
- ocena alternatywnych projektów systemów i obszarów ulepszenia,
- określanie najbardziej korzystnych technicznie i ekonomicznie opcji, biorąc pod uwagę wszystkie podsystemy,
- wdrażanie najlepszego wariantu systemu,
- ocena zużycia energii w odniesieniu do warunków pracy,
- ciągłe monitorowanie i bieżąca optymalizacja systemu,
- kontynuacja obsługi i konserwacji systemu dla utrzymania maksymalnej sprawności.

Zapewnienie niezawodności pracy wentylatora często powoduje, że instalatorzy systemów projektują układy wentylatorów zachowawczo i mają tendencję do kompensowania niepewności w projekcie procesu zwiększając ich wydajność i ciśnienie [13]. Niestety, przewymiarowanie systemów wentylatorów stwarza problemy, które mogą zwiększyć koszty operacyjne systemu przy jednoczesnym zmniejszeniu niezawodności wentylatora. Wentylatory, które są przewymiarowane ze względu na wymagania serwisowe nie działają w najlepszych punktach pracy. W skrajnych przypadkach mogą działać niestabilnie, generując nadmiar strumienia objętości, co powoduje wysoki hałas przepływu powietrza i zwiększone obciążenie wentylatora oraz systemu. W rezultacie przewymiarowane wentylatory nie tylko kosztują więcej ale są również droższe w eksploatacji.

Obszary możliwej optymalizacji wentylatorów

Z przeglądu istniejących rozwiązań wentylatorów oraz prowadzonych badań wentylatorów można wyodrębnić trzy podstawowe trendy w poprawie procesów transportu gazów z użyciem wentylatorów przepływowych:

1. Poprawa efektywności energetycznej samego wentylatora jako urządzenia, łącznie z napędem;
2. Prowadzenie szeregu zabiegów obniżających generowany hałas;

3. Poprawa efektywności transportu gazu w samej instalacji.

Największe rezerwy kryją się w rozwiązaniu instalacji i doborze wentylatora do instalacji, a następnie w samym wentylatorze, jego układzie napędowym i sposobie regulacji parametrów. Należy jednak podkreślić, że wszystkie trzy zabiegi są ze sobą wzajemnie związane oraz bezpośrednio na siebie wpływają.

Wybór wentylatora to złożony proces, który zaczyna się od poznania podstawowych wymagań operacyjnych systemu oraz warunków pracy, takich jak: natężenie przepływu powietrza, temperatura, ciśnienie, właściwości strumienia powietrza i struktura instalacji. Zmienność tych czynników i inne względy, takie jak: koszt, wydajność, żywotność, utrzymanie, prędkość, rodzaj materiału, ograniczenia przestrzenne, układy napędowe, temperatura i zakres warunków pracy czynią wybór wentylatora bardzo skomplikowanym. Często typ wentylatora jest wybierany z przyczyn nietechnicznych, takich jak cena, dostawa, dostępność, projektant lub operator czy znajomość modelu wentylatora chociaż poziom hałasu, koszty energii, wymagania konserwacyjne, niezawodność systemu, lub wydajność wentylatora są gorsze niż oczekiwano. Wentylatory są zwykle wybierane z szeregu modeli i wielkości, a nie zaprojektowane specjalnie dla konkretnej aplikacji. Wybór wentylatora jest oparty o obliczenia wymagań dotyczących przepływu gazu i ciśnienia w instalacji, a następnie znalezienie odpowiedniego wentylatora spełniającego te wymagania. Niestety istnieje wysoki poziom niepewności związany z przewidywaniem oporów przepływu gazu w instalacji. Ta niepewność połączona z efektami zanieczyszczenia i przewidywanymi zmianami oporów instalacji zmuszając do wprowadzania nadwyżek wydajności i ciśnienia ponad stan potencjalnie nominalny. Problemy i koszty związane ze złym wyborem wentylatorów, można eliminować w przyszłości poprzez odpowiednie zbieranie danych jako sprzężenie zwrotne z eksploatacji. Te dane mogą pomóc projektantom i operatorom poprawić wydajność systemu wentylatora poprzez lepszy wybór wentylatora i poprawione działanie o dobre praktyki eksploatacyjne [14].

Określając zależności między warunkami eksploatacyjnymi a charakterystyką samych wentylatorów i instalacji oraz znając rodzaj wpływu poszczególnych elementów systemu możemy w istotny sposób wpływać na proces projektowania i doboru wentylatorów. Z tego powodu przed przystąpieniem do prac badawczych nad konstrukcją wyso-

kosprawnego i emitującego niski hałas wentylatora należy posiadać zweryfikowany numerycznie oraz eksperymentalnie w rzeczywistych warunkach pracy model matematyczny jego pracy w systemie.

Podczas przeglądu bibliograficznego nie znaleziono kompleksowych rozwiązań zdalnego, całkowicie autonomicznego systemu pomiaru parametrów pracy wentylatorów. Pojawiły się próby budowy modelu cyfrowego połączonych sieci wentylacyjnych i możliwości wykorzystania do obliczeń perspektywicznego rozwoju sieci wentylacyjnej [15]. Można spotkać systemy do sterowania i diagnostyki, które zapewniają tylko bieżącą kontrolę parametrów stacji wentylatorowych oraz sygnalizację stanów awaryjnych [16]. Czy znaleźć system nadzoru pracy wentylatorów głównego przewietrzania, w ramach którego zainstalowano układ sterowania napędów wentylatorów, układ sterowania klapami, aparaturę AKP oraz system nadzoru pracy wentylatorów, którego zadaniem jest monitorowanie i wizualizacja pracy wentylatorów [17]. Spotyka się również analityczne metody stworzenia systemu optymalnego sterowania pracą prostego układu wentylacyjnego wykorzystujące dane pomiarowe [18].

W dalszej części niniejszego artykułu zostanie opisany proces budowania zdalnego systemu pomiarów parametrów pracy wentylatorów w warunkach rzeczywistych. W tym celu zostały wykonane następujące czynności:

- odpowiedni dobór punktów i parametrów mierzonych w wybranych lokalizacjach, który pozwoli zbierać dane masowe w sposób zapewniający odpowiednią powtarzalność i adekwatność pomiarów [19];
- selekcja danych w postaci szeregu czasowego (dobowe charakterystyki z częstotliwością próbkowania 1 Hz) przeznaczonych do przyszłego uczenia algorytmów, opisu próbek oraz selekcji i ekstrakcji atrybutów.

Docelowo, w dalszych etapach prac zostanie stworzony model matematyczny dokonujący oceny stanu danego wentylatora w określonej konfiguracji instalacyjnej na podstawie kilku wybranych parametrów pomiarowych.

Opis badań – selekcja wentylatorów i zbieranie danych

W ramach działań projektowych dokonano selekcji wentylatorów promieniowych produkcji Nyborg-Mawent pracujących w warunkach rzeczywistych. Selekcji dokonano kierując się kilkoma kryteriami, do

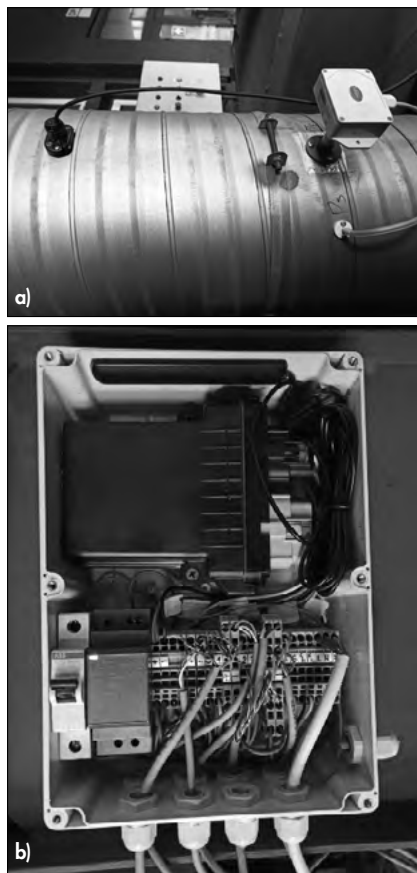
których należały między innymi: rodzaj wentylatora, warunki pracy wentylatora, dostępność lokalnej infrastruktury internetowej. Jednym z głównych kryteriów było znaczenie strategiczne danego wentylatora w ofercie Nyborg-Mawent. Istotne było bowiem skoncentrowanie prac i badań na tych wentylatorach, które są nabywane i instalowane najczęściej. Ich potencjalna modyfikacja i podniesienie sprawności przyniesie najwyższe korzyści producentowi, jego klientom, a także szerszemu otoczeniu. Do pomiarów wytypowane zostały reprezentatywne konstrukcje wentylatorów promieniowych spośród typów ZWP, ZWWOax, ZWPSe oraz WPSS produkcji Nyborg pracujących w rzeczywistych warunkach użytkowania do analizy ich parametrów pracy w miejscu zabudowy w porównaniu do założeń projektowych.

W toku wykonywania wizji lokalnych oraz montażu aparatury pomiarowej napotkano problem związany z koniecznością doprowadzenia zasilania do zestawu pomiarowego. W przypadku niektórych wentylatorów było to trudne, ze względu na odległość wentylatora od źródła zasilania. Problem ten został z powodzeniem rozwiązany poprzez zaprojektowanie autorskiego, innowacyjnego urządzenia umożliwiającego pozyskanie prądu bezpośrednio z falownika wentylatora. Przeprowadzone eksperymenty w warunkach laboratoryjnych pozwoliły zbudować unikalne rozwiązanie zasilacza, który pozwala dostarczać energię elektryczną o właściwych parametrach oraz z wystarczającą dobrą dokładnością do wszystkich czujników pomiarowych. Jest ono w chwili obecnej przedmiotem badania czystości patentowej.

W dalszych działaniach zdefiniowano niezbędną aparaturę pomiarową czyli czujniki ciśnienia, temperatury, przepływu, wilgotności, elementów elektrycznych i elektronicznych do wykonywania zdalnych pomiarów masowych. Było to konieczne dla poprawnego przeprowadzenia pomiarów czyli precyzyjnego określenia mierzonych wielkości fizycznych oraz metody ich pomiaru. W tym celu opracowano specyfikację techniczną dla każdego z elementów pomiarowych zgodnie z zakładanymi wymaganiami zbioru danych. Dokonano specyfikacji, następnie zamontowano czujniki temperatury, ciśnienia, poboru prądu, prędkości obrotowej, wilgotności oraz prędkości przepływu.

Z powodu różnorodnych warunków pracy wentylatorów w instalacjach (warunki atmosferyczne, duży stopień zapylenia, wibracje, brak lokalnej infrastruktury internetowej) zastosowana aparatura wyma-

gała indywidualnego podejścia. W tym celu opracowano takie rozwiązania techniczne teje aparatury, które pozwala na zbieranie pomiarów aktualnych parametrów pracy, ich akwizycję, a następnie przesył do serwera (rys.3). Zamontowana, na wyselekcjonowanych urządzeniach o różnych mocach, przeznaczeniu, pracujących w niskich lub wysokich temperaturach (około 200°C), aparatura pomiarowa została zweryfikowana ze względu na poprawność działania.



Rys.2. Kilka zamontowanych czujników pomiarowych (a) oraz skrzynka przyłączy elektrycznych, wraz z sygnałami pomiarowymi oraz modemem do transmisji danych do serwera (b)
Fig. 2. Several installed measuring sensors (a) and an electrical connection box with measuring signals and a modem for data transmission to the server (b)

Rozwiązanie to umożliwiło zebranie danych z odpowiedniej liczby wentylatorów, które w następnych etapach posłużyły do budowy modeli matematycznych. Wcześniej przesyłane do serwera dane z czujników były weryfikowane, a mianowicie analizowano ich poprawność poprzez porównanie aktualnych punktów pracy na tle charakterystyk danych typów wentylatorów [20]. Poniżej przedstawiono metodę przeliczeń danych uzyskanych z czujników pomiarowych, które były weryfikowane i zbierane na serwerze. Prze-

czne i przeanalizowane dane zostały porównane do aktualnych punktów pracy na tle charakterystyk danych typów wentylatorów, co pokazano dla przykładowego wentylatora nr 20178 (rys.4).

Ciśnienie bezwzględne:

$$P = P_b \pm p_{1,2}$$

gdzie:

- P_b – ciśnienie atmosferyczne [Pa],
 p_1 – ciśnienie manometryczne na ssaniu (znak „-”) [Pa],
 p_2 – ciśnienie manometryczne na tłoczeniu (znak „+”) [Pa],

Gęstość powietrza:

$$\rho = \frac{P_{st}}{R \cdot T}$$

gdzie:

- P_{st} – statyczne ciśnienie bezwzględne mieszaniny [Pa],
 T – temperatura bezwzględna mieszaniny [K],
 R – stała gazowa mieszaniny [kJ/kgK] określana ze wzoru empirycznego:

$$R = 0,462 \cdot \frac{0,622 + x}{1 + x}$$

gdzie x to zawartość wilgoci liczona ze wzoru:

$$x = \frac{0,622 \cdot \phi \cdot P_s}{P_{st} - \phi \cdot P_s}$$

oraz gdzie

- ϕ – pomierzona wilgotność względna [-],
 P_s – ciśnienie nasycenia pary wodnej dla danej temperatury [Pa] (p. tabela 1),
 P_{st} – statyczne ciśnienie bezwzględne mieszaniny [Pa].

Wydajność objętościowa:

$$V = A \cdot w$$

gdzie:

- A – pole przekroju rurociągu ssawnego lub tłocznego [m²],
 w – pomierzona średnia prędkość czynnika w rurociągu ssawnym lub tłocznym [m/s].

Wydajność masowa:

$$m = V \cdot \rho$$

gdzie:

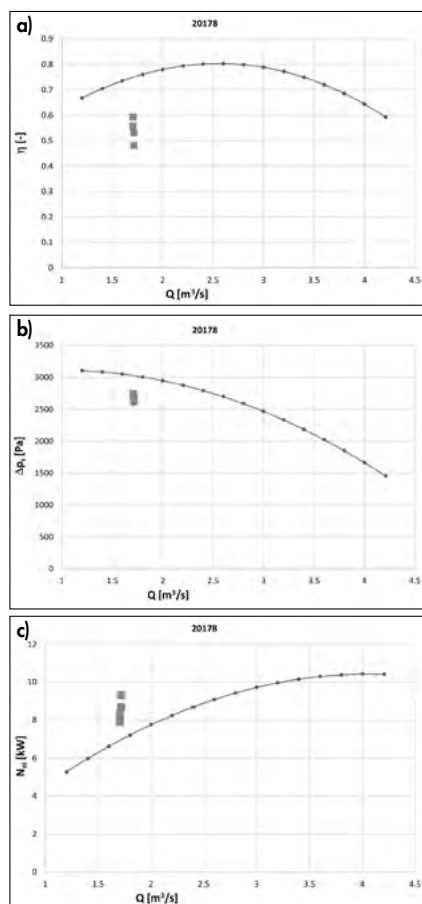
- V – strumień objętości [m³/s],
 ρ – gęstość czynnika [kg/m³].

Śpiętrzenie statyczne:

$$\Delta P_{st} = P_2 - P_1$$

gdzie:

- P_1 – ciśnienie absolutne w rurociągu ssawnym [Pa],



Rys. 3. Wybrane wyniki pomiarów w okresie od czerwca do listopada 2021 r. na tle charakterystyki przykładowego wentylatora 20178, gdzie: a) – sprawność w funkcji wydajności, b) – przyrost ciśnienia w funkcji wydajności, c) – moc w funkcji wydajności, (linia ciągła – charakterystyka, kwadratowe punkty – pomiary)

Fig. 3. Selected measurement results in the period from June to November 2021 against the background of the characteristics of an exemplary 20178 fan, where: a) – efficiency as a function of flow, b) – increase in pressure as a function of flow, c) – power as a function of flow, (solid line – characteristic, square points – measurements)

P_2 – ciśnienie absolutne w rurociągu tłocznym [Pa].

Śpiętnienie dynamiczne:

$$\Delta P_d = P_{d2} - P_{d1} = \frac{\rho_2 \cdot w_2^2}{2} - \frac{\rho_1 \cdot w_1^2}{2}$$

gdzie:

P_{d1} – ciśnienie dynamiczne w rurociągu ssawnym [Pa],

P_{d2} – ciśnienie dynamiczne w rurociągu tłocznym [Pa],

w_1 – średnia prędkość gazu w rurociągu ssawnym [m/s],

w_2 – średnia prędkość gazu w rurociągu tłocznym [m/s],

ρ_1 – gęstość gazu w rurociągu ssawnym [kg/m³].

ρ_2 – gęstość gazu w rurociągu tłocznym [kg/m³].

Śpiętnienie całkowite:

$$\Delta P_C = \Delta P_{st} + \Delta P_d$$

Moc użyteczna:

$$N_u = V \cdot \Delta P_C$$

gdzie:

V – strumień objętości [m³/s],

ΔP_C – spiętnienie całkowite [Pa].

Sprawność zespołu:

$$\eta_z = \frac{N_u}{N_{el}}$$

gdzie:

N_u – moc użyteczna [W],

N_{el} – pobrana moc elektryczna [W], określona na podstawie wzoru:

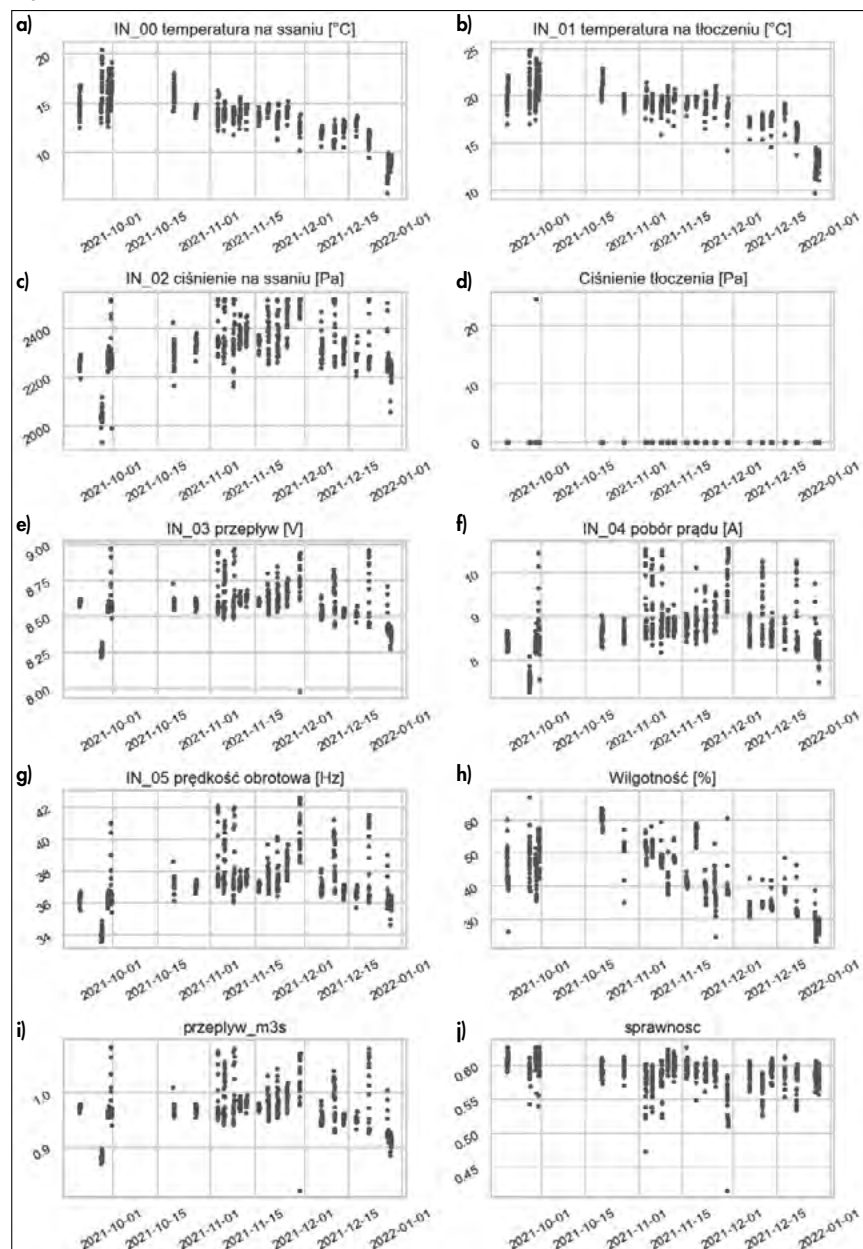
$$N_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

gdzie:

I – pomierzona wartość natężenia prądu [A],

$\cos(\varphi)$ – dla współczesnych silników asynchronicznych można szacować ~0,85,

U – napięcie prądu [V] określane na podstawie znanej częstotliwości obrotowej (f) z zależności:



Rys. 4.

Punkty pomiarowe z wybranych dni użyte do opracowania modelu matematycznego, gdzie: a) – temperatura na ssaniu [°C], b) – temperatura na tłoczeniu [°C], c) – ciśnienie na ssaniu [Pa], d) – ciśnienie na tłoczeniu [Pa], e) – przepływ [V], f) – pobór prądu [A], g) – prędkość obrotowa [Hz], h) – wilgotność [%], i) – przepływ [m³/s], j) – sprawność [-]

Fig. 4. Measurement points from selected days used to develop a mathematical model, where: a) – suction temperature [°C], b) – discharge temperature [°C], c) – suction pressure [Pa], d) – discharge pressure [Pa], e) – flow [V], f) – current consumption [A], g) – rotation speed [Hz], h) – humidity [%], i) – flow [m³/s], j) – efficiency [-]

$$U = \frac{f}{50} \cdot 400.$$

Następnie w sposób ciągły prowadzono pomiary, realizowano bieżącą analizę oraz selekcję zebranych danych do wykorzystania w procesie modelowania i weryfikacji modeli. Poniżej zaprezentowano kilka punktów pomiarowych zebranych w okresie od czerwca do listopada 2021 r. określonych na podstawie powyższej metody obliczeń na tle charakterystyki przykładowego wentylatora 20178 (rys.4). Przedstawione pomiary wyraźnie pokazują, że analizowany wentylator został dobrany z dużym przewymiarowaniem wydajności. Punkty pracy znacząco odbiegają od wartości optymalnej sprawności.

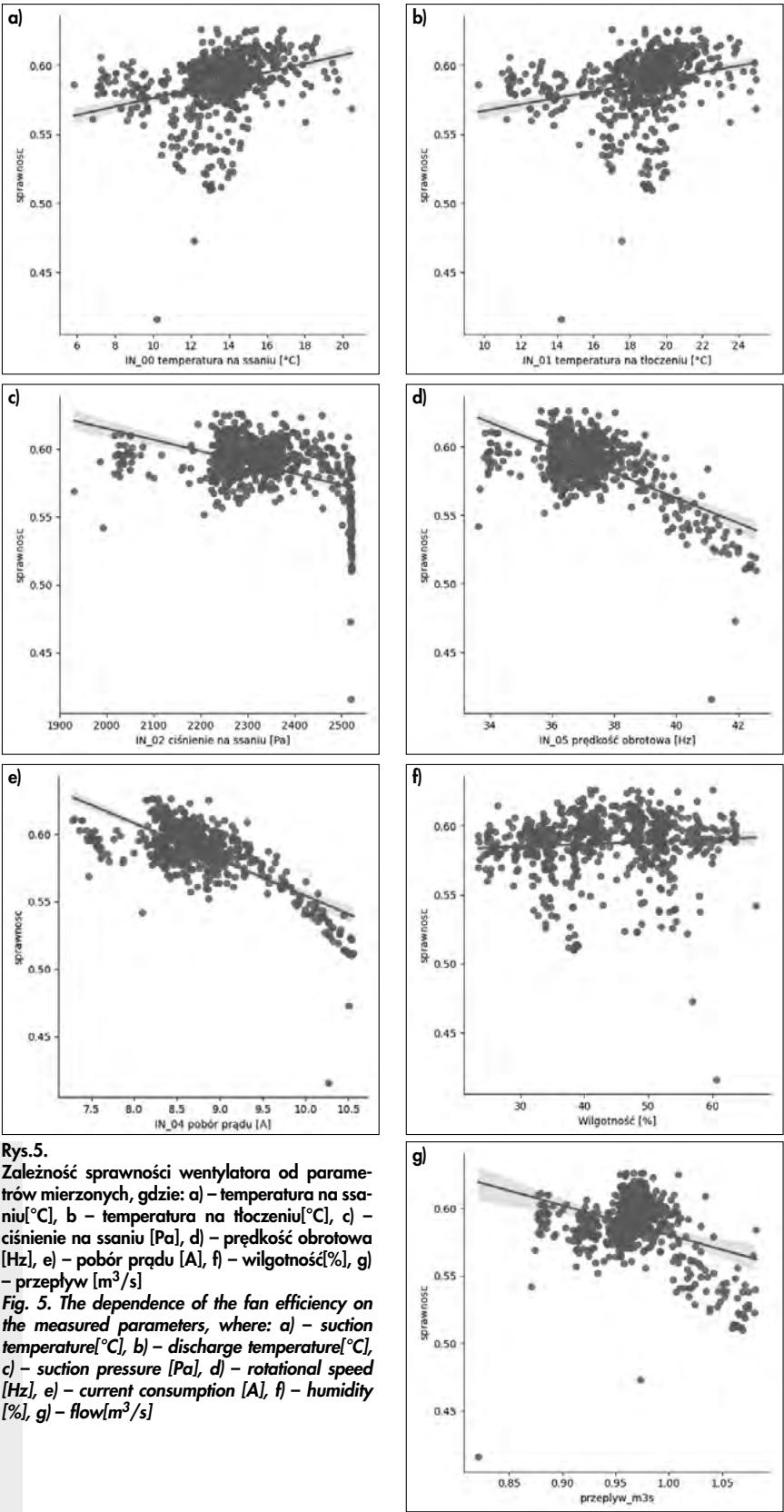
Na potrzeby dalszych analiz badawczych dane pomiarowe zostały poddane filtracji i czyszczeniu z zakłóceń i w ten sposób przygotowywane do uwzględnienia w przyszłym modelu matematycznym.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe punkty pomiarowe z wybranych dni użyte do analizy danych. Zebrane dane pomiarowe pozwolą wyselekcjonować zbiory uczące i weryfikujące model przewidujący proces zmian charakterystyk instalacji oraz wentylatora w czasie oraz ocenić istotność wpływu różnorodnych parametrów konstrukcyjnych wentylatora oraz instalacji. Zebrane dane pozwolą zweryfikować budowane modele oraz doprecyzować zmienne wymagane do oceny ich istotności w trakcie długotrwałej eksploatacji.

Przed etapem budowy przyszłego modelu matematycznego należy wykonać analizę korelacji pomiędzy poszczególnymi mierzonymi parametrami, a sprawnością wentylatora. Za istotne przyjęto korelację Pearsona dla $p < 0.05$. W tabeli 1. zestawiono współczynniki korelacji Pearsona (r) oraz ich wartości w przedziale ufności 95%. „r” przyjmuje wartości od - 1 do

Tabela 1. Korelacje (Pearsona) pomiędzy mierzonymi parametrami a sprawnością wentylatora
Table 1. Correlations (Pearson) between the measured parameters and the fan efficiency

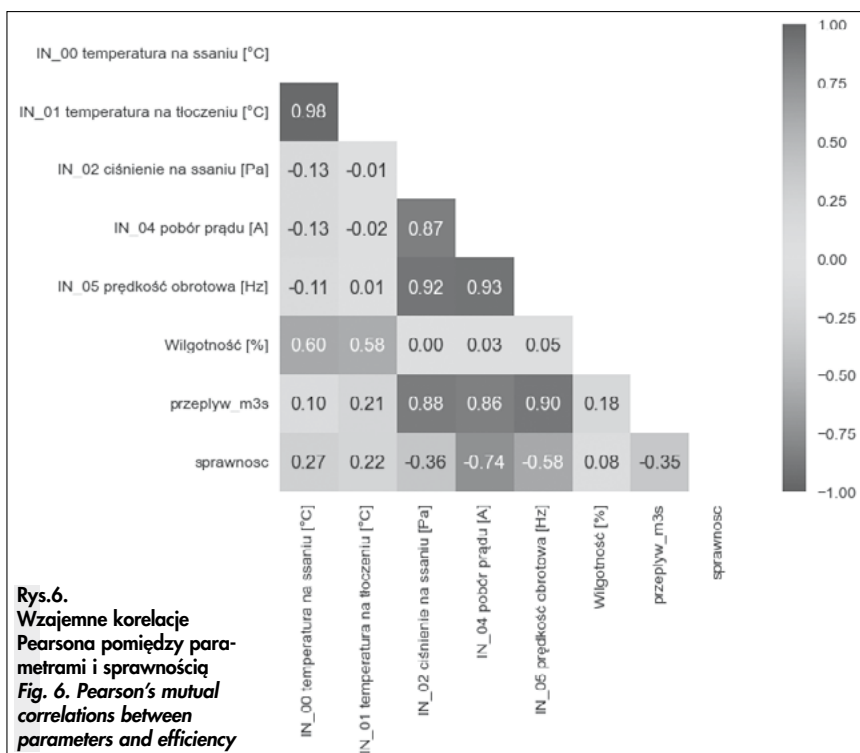
parametr	r	CI95%	p	korelacja
Temperatura na ssaniu [°C]	0.272	[0.23 0.31]	0.000	bardzo słaba
Temperatura na tłoczeniu [°C]	0.220	[0.18 0.26]	0.000	bardzo słaba
Ciśnienie na ssaniu [Pa]	-0.362	[-0.40 - 0.32]	0.000	umiarkowana
Pobór prądu [A]	-0.738	[-0.76 - 0.72]	0.000	bardzo silna
Prędkość obrotowa [Hz]	-0.583	[-0.61 - 0.55]	0.000	silna
Wilgotność [%]	0.077	[0.03 0.12]	0.001	bardzo słaba
Przepływ [m³/s]	-0.349	[-0.39 - 0.31]	0.000	umiarkowana



Rys.5. Zależność sprawności wentylatora od parametrów mierzonych, gdzie: a) – temperatura na ssaniu[°C], b) – temperatura na tłoczeniu[°C], c) – ciśnienie na ssaniu [Pa], d) – prędkość obrotowa [Hz], e) – pobór prądu [A], f) – wilgotność[%], g) – przepływ [m³/s]
Fig. 5. The dependence of the fan efficiency on the measured parameters, where: a) – suction temperature[°C], b) – discharge temperature[°C], c) – suction pressure [Pa], d) – rotational speed [Hz], e) – current consumption [A], f) – humidity [%], g) – flow[m³/s]

1, gdzie 1 oznacza całkowitą korelację, 0 oznacza brak korelacji, a - 1 całkowitą ujemną korelację (im większy x tym mniejszy y). Są to korelacje uwzględniające zależności pomiędzy jednym parametrem, a sprawnością, bez uwzględniania wzajemnych zależności pomiędzy parametra-

mi, dlatego należy traktować ten etap jako wstępną eksplorację zależności. Analiza korelacji wskazała, że wszystkie siedem parametrów są istotnie skorelowane ze sprawnością ($p < 0.001$). Jednak dla wilgotności i temperatury mieszaniny w kanałach ssawnym i tłocznym korelację



Rys.6.
Wzajemne korelacje
Pearsona pomiędzy para-
metrami i sprawnością
Fig. 6. Pearson's mutual
correlations between
parameters and efficiency

są bardzo słabe, odpowiednio $r=0.077$, 0.272 i 0.220 (wszystkie poniżej 0.30).

Korelacje widoczne są również na wykresach parametr – sprawność (rys.6). Przeanalizowano również korelacje pomiędzy parametrami mierzonymi oraz sprawnością (rys.7):

- Zaobserwowano bardzo silną korelację pomiędzy temperaturą mieszaniny w kanale ssawnym i temperaturą mieszaniny w kanale tłocznym ($r=0.98$).
- Prędkość przepływu jest bardzo silnie skorelowana z poborem prądu ($r=0.86$), prędkością obrotową wentylatora ($r=0.90$) oraz ciśnieniem w kanale ssawnym ($r=0.88$). Tak wysokie korelacje sugerują, że te cztery parametry mogą zostać zastąpione jednym/dwoma parametrami w modelu matematycznym bez wyraźnego spadku dokładności modelu.

Przedstawione analizy pozwolą w przyszłości stworzyć model matematyczny odzwierciedlający relacje pomiędzy parametrami mierzonymi w rzeczywistych warunkach a sprawnością wentylatora. Wskazano cztery istotne statystycznie parametry powiązane ze sprawnością:

- ciśnienie w kanale ssawnym,
- pobór prądu,
- prędkość obrotowa,
- prędkość przepływu czynnika.

Mierzone parametry: temperatura czynnika w kanale ssawnym oraz tłocznym, oraz wilgotność względna nie są istotnie skorelowane ze sprawnością wentylatora w rzeczywistym obiekcie. Wyżej

wymienione istotności oparte zostały na przedziale ufności 95%.

Uzyskany w przyszłości model będzie budowany, rozwijany i rozbudowywany o dane pomiarowe uzyskane w dłuższym okresie eksploatacji. Przewiduje się również zbudowanie modelu opartego na sieciach neuronowych, który pozwoli nakreślić szczegółowo kierunek dalszych prac związanych ze zmianami projektowymi oraz konstrukcyjnymi wentylatorów oraz instalacji. Tym samym będzie wykorzystywany w procesie projektowania jako najkorzystniejsze narzędzie do generowania i weryfikowania koncepcji modernizacyjnych systemów oraz samych wentylatorów.

Podsumowanie i dyskusja

W artykule przedstawiono działania realizowane w ramach pierwszego projektu badawczo-rozwojowego, który uzyskał dofinansowanie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz wyniki tych prac. Przedstawiono szczegółowe kroki budowy systemu zbierania i przetwarzania danych pomiarowych z wentylatorów zainstalowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji oraz wyniki ich analizy. W szczególności wykonano następujące zadania:

- Opracowano i wdrożono infrastrukturę pomiarową, w tym również zdefiniowano zestaw niezbędnej aparatury pomiarowej;
- Zamontowano aparaturę pomiarową na wyselekcjonowanych instalacjach z odpowiednimi wentylatorami;

- Wdrożono systemy pozwalające na ciągłe pomiary parametrów instalacji, zdalny przesył danych do serwera, gdzie poddawane są bieżącej analizie i selekcji zebranych danych do wykorzystania w procesie modelowania i diagnostyki;
- Zweryfikowano eksperymentalnie zadowalający stopień korelacji między wyselekcjonowanymi parametrami mierzonymi w warunkach rzeczywistych, a charakterystyką wentylatora i instalacji. Wyznacznikiem tego było znalezienie czterech istotnych statystycznie parametrów na poziomie ufności 95%.

Należy zaznaczyć, że realizowany projekt rozwojowo-badawczy ma także swoje szersze uzasadnienie – społeczne i biznesowe. Podkreślanie ich znaczenia przy prezentowaniu rozwiązań technicznych jest ważne i pożądane [21,22]. W literaturze dotyczącej funkcjonowania współczesnych firm podkreśla się rolę orientacji przedsiębiorczej, która polega na zdolności do innowacji, na proaktywności i aktywnym podejmowaniu inicjatywy oraz na podejmowaniu ryzyka. Stanowi ona nierzadko podstawę sukcesu projektów [23,24]. Opisujący projekt, który jest współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, może zostać opisany jako przejaw takiej właśnie orientacji przedsiębiorczej. Jego planowany efekt, czyli wentylator przemysłowy o unikalnej konstrukcji będzie stanowił lepszą niż dotychczasowa odpowiedź na stojące przed firmą i jej klientami wyzwania w obliczu przewidywanych skutków megatrendów kształtujących obecną i przyszłą rzeczywistość.

WYKAZ BIBLIOGRAFII

- [1] Ferreira, J., Coelho, A., & Moutinho, L. (2020). Dynamic capabilities, creativity and innovation capability and their impact on competitive advantage and firm performance: The moderating role of entrepreneurial orientation. *Technovation*, 92, 102061. DOI: 10.1016/j.technovation.2018.11.004
- [2] Kotler P. (2002) *Marketing management—analysis, planning, implementation, and control*, 9th edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- [3] Project Management Institute. (2022). *Global Megatrends 2022*. https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pmi-mega-trends-2022.pdf?v=ce857578-0d48-4c91-b3db-41a21c09c7df&sc_lang=temp=en
- [4] Talus, K., & Hancher, L. (2022). 'Fit for 55'-Europe's Man on the Moon Moment? Oil, Gas & Energy Law, 20(1).
- [5] Selcuk, S. (2017). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part*

- B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9), 1670-1679. DOI: 10.1177/0954405415601640
- [6] Zahra, S. A. (2008). Being entrepreneurial and market driven: implications for company performance. *Journal of Strategy and Management*. DOI: 10.1108/17554250810926339
- [7] Lee, S. M., & Peterson, S. J. (2000). Culture, entrepreneurial orientation, and global competitiveness. *Journal of World Business*, 35(4), 401-416. DOI: 10.1016/S1090-9516(00)00045-6
- [8] Fortuna Z. Wentylatory Podstawy teoretyczne zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie Sprężarki przepływowe, Wydawnictwo: Techwent s.c., Kraków 1998.
- [9] Piwowarski M. Sprężarki przepływowe, Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2017.
- [10] Cory W.T.W. Fans and Ventilation A Practical Guide, Roles & Associates Ltd., Published by Elsevier Ltd Amsterdam Boston Heidelberg London New York Oxford Paris San Diego San Francisco Singapore Sydney Tokyo, 2005.
- [11] Sathaye N., Phadke A., Shah N., Letschert V. Potential Global Benefits of Improved Ceiling Fan Energy Efficiency Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL Report, 2012.
- [12] Yu J., Zhang T., Qian J. Electrical motor products International energy-efficiency standards and testing methods, Woodhead Publishing Limited, Sawston, Cambridge UK, 2011.
- [13] Legg R. Air Conditioning System Design, Butterworth-Heinemann, London, 2017.
- [14] Bleier. F. P. Fan Handbook: Selection, Application and Design, The McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1998.
- [15] Rosiek F., Sikora M., Urbański J., Augustyn W. Zintegrowany model sieci wentylacyjnych kopalń KGHM „Polska Miedź” SA Napędy i Sterowanie, R.14, nr 7/8 p.60-63, 2012
- [16] Szymański Z. Nowoczesne, inteligentne systemy sterowania i diagnostyki kopalnianych stacji wentylatorowych Napędy i Sterowanie, R.15, nr 7/8 p.104-111, 2013
- [17] Halama A., Hefczyk M., Krzemiński Z. System nadzoru pracy wentylatorów głównego przewietrzania przy szybie IV KWK „Staszic” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 9, p.91-96, 2003.
- [18] Walaszczyk J. Możliwości optymalizacji sterowania pracą prostego układu wentylacyjnego obsługującego pojedyncze pomieszczenie, INSTAL 11/2021, DOI: 10.36119/15.2021.11.4
- [19] Norma PN-EN-ISO-5802_2008E-1 „Badania wentylatorów w miejscu zainstalowania”, XII 2008
- [20] Kryłowicz W., Kabatyk K. Charakterystyki promieniowych sprężarek procesowych, INSTAL 5/2021, DOI: 10.36119/15.2021.5.2
- [21] Jamróz, M., Piwowarski, M., Ziemiański, P., & Pawlak, G. (2021). Technical and Economic Analysis of the Supercritical Combined Gas-Steam Cycle. *Energies*, 14(11), 2985, DOI: 10.3390/en14112985.
- [22] Plutecki, Z., Lichota, J., Sattler, P., & Ryszczyk, K. (2021). Identyfikacja warunków pracy elektrociepłowni dla potrzeb oceny możliwości zabudowy akumulatora ciepła. *INSTAL*, 12/2021, 7-14, DOI: 10.36119/15.2021.12.1
- [23] Martens, C. D. P., Machado, F. J., Martens, M. L., & de Freitas, H. M. R. (2018). Linking entrepreneurial orientation to project success. *International Journal of Project Management*, 36(2), 255-266. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.10.005
- [24] Shan, P., Song, M., & Ju, X. (2016). Entrepreneurial orientation and performance: Is innovation speed a missing link?. *Journal of Business Research*, 69(2), 683-690. DOI: 10.1016/j.jbusres.2015.08.032

Opisane w artykule działania zostały zrealizowane 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.



Fundusze Europejskie
Inteligentny Rozwój



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

