

Możliwości optymalizacji sterowania pracą prostego układu wentylacyjnego obsługującego pojedyncze pomieszczenie

Possibilities of optimizing the control of a simple ventilation system serving a single room

JULIUSZ WALASZCZYK

DOI 10.36119/15.2021.11.4

W artykule przedstawiono analityczne rozwiązanie problemu optymalnego sterowania pracą prostego układu wentylacyjnego, którego zadaniem jest utrzymanie wymaganej temperatury powietrza w pomieszczeniu zarówno w okresach letnim, zimowym jak i przejściowym. Efektem przeprowadzonej analizy jest tablica sterowania pozwalająca wyznaczać optymalne akcje sterowania dla układu wentylacji, który obsługuje jedno pomieszczenie. Tabela sterowania pozwala dokładnie wyznaczyć warunki, w jakich może istnieć problem sterowania optymalnego, a w jakich proste sterowanie sekwencyjne PID będzie gwarantowało sterowanie zbliżone do optymalnego. *Słowa kluczowe: zmienny strumień powietrza, free-cooling, zapotrzebowanie energii do ochładzania*

The article presents an analytical solution to the problem of the so-called optimal control of the operation of a simple ventilation system, whose task is to maintain the required air temperature in the room in both summer, winter and transitional periods. The result of the analysis is a control board that allows one to determine the optimal control actions for the ventilation system that supports 1 room. The control table allows you to accurately determine the conditions under which the problem of optimal control may exist and in which simple SEQUENTIAL control PID will guarantee control close to optimal.

Keywords: variable air volume, freecooling, energy demand for air cooling

Wstęp

W dniu 2 czerwca 2021 roku, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) ogłosiło przedsięwzięcie „Wentylacja dla szkół i domów”. Postępowanie konkursowe dotyczyło przygotowania urządzenia, którego zadaniem jest prawidłowa wentylacja pomieszczeń szkolnych (jedna z opcji zadania) lub pomieszczeń mieszkalnych (druga z opcji zadania). Nadzrędnym celem konkursu było wytworzenie prototypów urządzeń, które będą utrzymywały tzw. jakość powietrza w pomieszczeniach na dobrym poziomie przy jak najmniejszym zużyciu energii niezbędnej dla pracy układu. Pod pojęciem jakości powietrza kryta się tutaj nie tylko jego temperatura czy wilgotność względna, ale także stężenie końcowe CO₂ i lotnych związków organicznych (LZO), ilość i jakość pyłów zawieszonych w powietrzu w pomieszczeniu, ogólna liczba bakterii i grzybów itd. W składanych wnioskach konkursowych oferenci byli zobligowani do przygotowania szcze-

gółowego opisu dotyczącego możliwości uzyskania końcowej wartości dla każdego parametru powietrza, który ma wpływ na jego jakość w pomieszczeniu. Należało zatem nie tylko zadeklarować budowę urządzenia wentylacyjnego, ale też przygotować opis pracy układu wentylacyjnego wykorzystującego to urządzenie. Przykładowo, należało określić jak zostanie zrealizowany odzysk ciepła wraz z przyjętym rozwiązaniem systemu antyzamrożeniowego, jak zostanie zrealizowane np. odprowadzenie skroplin, lub jak zostanie zrealizowana komunikacja z np. klimatyzatorami [1]. We wniosku konkursowym, wnioskodawca mógł zadeklarować, że dostarczony przez niego układ wentylacji będzie miał możliwość schładzania pomieszczenia wyłącznie powietrzem zewnętrznym, a opcja ta została nazwana free-coolingiem. Ponadto wnioskodawca powinien precyzyjnie opisać, w jaki sposób zamierza realizować free-cooling w zaproponowanym układzie wentylacji. Dla tego zadania wymagany był „opis, obliczenia oraz schemat działania” [1].

Słowo free-cooling jest dziś używane powszechnie także w kontekście ograniczenia zużycia energii niezbędnej do ochładzania pomieszczeń czy budynków [2, 3]. Takie chłodzenie może być realizowane z wykorzystaniem zdolności chłodzących powietrza zewnętrznego zarówno po stronie powietrznej jak i czynnika żiebniczego. Problem wykorzystania powietrza zewnętrznego do asymilowania zysków ciepła w pomieszczeniu, w gruncie rzeczy, nie jest zagadnieniem prostym i jednoznacznym. Wiele prac naukowych jest poświęconych temu tematowi, a część pozycji piśmienniczych skoncentrowana jest tylko na matematycznym ujęciu tego problemu [4]. Choć definiują one precyzyjnie, jakie sterowanie jest sterowaniem optymalnym, to w rzeczywistym układzie trudno je zastosować. Nie wynika to z problemów przy tworzeniu pętli sterujących, gdyż te są niekiedy bardzo dobrze opisane, ale wynika to przede wszystkim z praktycznego problemu wyznaczania współczynników niezbędnych w równaniach. We wzorach występują np. współczynniki

sprawności, które w rzeczywistości nie są stałe dla wszystkich warunków pracy. Ponadto współczynniki konieczne do wykorzystania w algorytmach muszą normalizować różne rodzaje energii. W prostych rozwiązaniach wentylacyjnych muszą konwertować ciepło (grzanie, chłodzenie) na energię elektryczną. To wszystko powoduje, że trudno posługiwać się samymi wzorami matematycznymi w celu wiarygodnego wyznaczania akcji sterowania pracą układu.

Inna kategoria pozycji piśmienniczych obejmuje propozycje modyfikacji temperatury powietrza nawiewanego [5–7], często w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego [8–11]. Propozycje te określane są jako Supply Air Temperature Reset, w skrócie SAT Reset. Są to skuteczne metody ograniczania zużycia energii przez układ wentylacji. Niemniej często brakuje głębokich podstaw matematycznych, aby uzasadnić, dlaczego konkretna charakterystyka resetowania temperatury powietrza nawiewanego została określona akurat w taki a nie inny sposób. Tylko niewiele pozycji piśmienniczych zawiera szczegółowe wytyczne, które mogą być pomocne przy implementowaniu konkretnego algorytmu sterowania. Same zalecenia dotyczące sterowania, przygotowane z pozycji projektanta systemu wentylacji, nie zawsze są czytelne dla projektanta systemu automatyki. Niniejszy artykuł jest próbą wypełnienia dostrzeżonej luki. W artykule przeprowadzono analizę matematyczną problemu i określono sterowanie optymalne układu wentylacji. Następnie uwzględniając wyniki analizy, zaproponowano dwa algorytmy sterowania, które mogą generować akcje sterowania zbliżone do układu optymalnego. Jednocześnie położono nacisk na uwzględnienie w artykule schematów i opisów pozwalających wykorzystać opracowane algorytmy w popularnych sterownikach automatyki.

Metodologia

Podstawowy układ wentylacyjny powinien zapewniać wymaganą temperaturę powietrza w pomieszczeniu. W praktyce można to zrealizować na wiele sposobów, m.in. poprzez odpowiedni dobór dwóch podstawowych parametrów: strumienia powietrza i temperatury powietrza nawiewanego. Zyski ciepła w pomieszczeniu mogą być w pełni asymilowane przez odpowiednio dobrany strumień powietrza wentylującego, co jednoznacznie determinuje temperaturę powietrza nawiewanego. Dlatego, w takiej sytuacji, problem

optymalizacji sprowadza się do wyznaczenia strumienia powietrza, przy którym zużycie energii będzie jak najmniejsze. Co bardzo istotne, zakłada się tutaj, że układ wentylacji pracuje w warunkach ustalonych.

Zużycie energii układu wentylacji, w tym przypadku, najwygodniej jest odnieść do energii elektrycznej, gdyż można ją stosunkowo prosto wycenić. Faktyczne zużycie energii elektrycznej przez wentylatory można bezpośrednio zmierzyć. Poza tym, w prostych układach wentylacyjnych, energia elektryczna jest wykorzystywana także do wytwarzania energii chłodniczej. Zdarza się, że układy wentylacji, zwłaszcza obsługujące domy jednorodzinne czy lokale mieszkalne, wyposażane są w nagrzewnice elektryczne. Zużycie energii, znormalizowane do zużycia energii elektrycznej, jest tak naprawdę iloczynem mocy i czasu działania. Tym samym zużycie energii należy zawsze rozpatrywać w pewnym przedziale czasu. Aby tego uniknąć i w artykule przedstawić ogólne wnioski, zdecydowano, że optymalizowane będzie bezpośrednio zapotrzebowanie na moc.

Całkowite zapotrzebowanie na moc

Na koszt funkcjonowania systemu wentylacji składają się koszty transportu powietrza i koszty uzdatniania powietrza. W uproszczeniu można stwierdzić, że chwilowy koszt działania instalacji wentylacyjnej to bieżąca moc elektryczna potrzebna do napędu wentylatorów (nawiewnego i wywiewnego) i bieżąca moc wydatkowana na ogrzewanie i ochładzanie powietrza.

Moc elektryczna potrzebna do napędu wentylatorów to suma mocy potrzebna do napędu wentylatora nawiewnego i wywiewnego. Moc potrzebna do napędu wentylatora zależy od strumienia powietrza wentylującego (V), uzyskiwanego sprężu (Δp_w) oraz sprawności (η_s, η_p, η_w) i może być oszacowana na podstawie wzoru:

$$P_w = \frac{V \Delta p_w}{\eta_s \eta_p \eta_w} \quad (1)$$

Spręż wentylatora zależy od zastępczego współczynnika oporu całej instalacji (R) i od kwadratu prędkości powietrza (w), co można zapisać wzorem:

$$\Delta p_w = R w^2 \quad (2)$$

We wzorze 2 prędkość powietrza można zamienić na strumień powietrza i pole przekroju kanału, przez który ten strumień przepływa (F) i w wyniku tego

otrzymać zależność:

$$\Delta p_w = R \left(\frac{V}{F} \right)^2 \quad (3)$$

co ostatecznie pozwala połączyć wzory 1 i 3 i otrzymać wzór na moc niezbędną do napędu wentylatora w funkcji strumienia powietrza:

$$P_w = \frac{R V^3}{F^2 \eta_s \eta_p \eta_w} \quad (4)$$

Moc wymagana do suchego ochładzania, lub podgrzewania powietrza może być obliczona z zależności, w której bierze się pod uwagę ciepło właściwe (c_p) i gęstość powietrza (ρ_p):

$$P_{\text{term}} = \left| \frac{V \rho_p c_p (t_{\text{zew}} - t_{\text{naw}})}{\eta_{\text{term}}} \right| \quad (5)$$

Temperatura powietrza nawiewanego występująca w powyższym wzorze jest wielkością ściśle związaną z zyskami ciepła jawnego w pomieszczeniu i można ją zdefiniować następująco:

$$t_{\text{naw}} = t_{\text{pom}} - \frac{Q}{\rho_p c_p V} \quad (6)$$

Zatem ostateczny wzór na moc potrzebną do ochładzania lub ogrzewania powietrza przyjmuje postać:

$$P_{\text{term}} = \left| \frac{V \rho_p c_p (t_{\text{zew}} - t_{\text{pom}}) + Q}{\eta_{\text{term}}} \right| \quad (7)$$

Ostateczna postać zależności opisującej całkowite zapotrzebowanie na moc to suma mocy potrzebnej do transportu (wentylatory nawiewny i wywiewny) i uzdatniania powietrza (nagrzewnica lub chłodnica sucha). Przy założeniu, że sprawności zespołu wentylator-silnik są te same dla części nawiewnej i wywiewnej oraz przy założeniu, że pole przekroju kanału F , w którym dokonano oszacowania strumienia ma tą samą wartość zarówno w części nawiewnej jak i wywiewnej, można ostatecznie zapisać, że:

$$\begin{aligned} P &= P_{W_{\text{naw}}} + P_{W_{\text{wyw}}} + P_{\text{term}} \\ &= \frac{(R_{W_{\text{naw}}} + R_{W_{\text{wyw}}}) V^3}{F^2 \eta_s \eta_p \eta_w} \\ &+ \left| \frac{V \rho_p c_p (t_{\text{zew}} - t_{\text{pom}}) + Q}{\eta_{\text{term}}} \right| \end{aligned} \quad (8)$$

Wzór (8) jest ogólnym zapisem funkcji, dla której minimum będzie oznaczał optymalny punkt pracy układu wentylacyjnego. Argumentem tej funkcji jest strumień powietrza wentylującego V . Minimum funkcji (8) należy szukać w przedziałach

wynikających z istnienia we wzorze wartości bezwzględnej. Gdy wyrażenie pod wartością bezwzględną jest równe zero, nie następuje proces termicznego uzdatniania powietrza. Nie pracuje wtedy ani nagrzewnica, ani chłodnica, ani żadna forma odzysku ciepła.

Gdy wyrażenie pod wartością bezwzględną jest większe od zera, następuje proces ochładzania powietrza i zapotrzebowanie na moc wyraża się wzorem (9):

$$P_{CH} = \frac{(R_{wnaw} + R_{wyyw})V^3}{F^2 \eta_s \eta_p \eta_w} + \frac{V \rho_p c_p (t_{zew} - t_{pom}) + Q}{\eta_{termCH}} \quad (9)$$

Gdy wyrażenie pod wartością bezwzględną jest mniejsze od zera, następuje proces ogrzewania powietrza i zapotrzebowanie na moc wyraża się wzorem (10):

$$P_N = \frac{(R_{wnaw} + R_{wyyw})V^3}{F^2 \eta_s \eta_p \eta_w} - \frac{V \rho_p c_p (t_{zew} - t_{pom}) + Q}{\eta_{termN}} \quad (10)$$

Funkcje (9) i (10) mogą być analizowane tylko w racjonalnym przedziale argumentów, czyli od strumienia minimalnego V_{min} do strumienia maksymalnego V_{max} . Aby zbadać, gdzie funkcje (9) i (10) mają swoje minimum należy poszukać punktów, w których ich pochodne przyjmują wartości zero i porównać, czy strumień powietrza V_{min} lub V_{max} nie zapewnia bardziej energooszczędnej pracy. Strumień powietrza, dla którego pochodne funkcji (9) i (10) będą przyjmowały wartości równe zero, został oznaczony w dalszej części pracy jako V_{opt} .

Strumienie optymalne w obszarze ochładzania V_{optCH} i podgrzewania V_{optN} powietrza nie zależą od bieżących zysków czy strat ciepła. Jeżeli w różnych momentach dnia, zyski czy straty ciepła w pomieszczeniu byłyby inne, a jednocześnie temperatura powietrza zewnętrznego byłaby taka sama, to układ wentylacji powinien pracować z tym samym strumieniem powietrza wentylującego. Oczywiście jeżeli zyski czy straty ciepła byłyby w innym momencie dnia większe, to chłodnica czy nagrzewnica musiałyby pracować z większą wydajnością. Niemniej jednak sam strumień powietrza wentylującego powinien pozostać na niezmiennym poziomie.

Granica pomiędzy okresem ogrzewania i ochładzania powietrza

Jeżeli założyć, że system wentylacyjny

nie wymaga ani grzania, ani chłodzenia to zapotrzebowanie na moc do ochładzania lub ogrzewania powietrza jest równe zero:

$$Q = \frac{V \rho_p c_p (t_{zew} - t_{pom}) + Q}{\eta_{term}} \quad (11)$$

Co po przekształceniu pozwala określić wartość graniczną strumienia powietrza wentylującego:

$$V_{gr} = \frac{Q}{\rho_p c_p (t_{zew} - t_{pom})} \quad (12)$$

Strumień ten może służyć do rozdzielania obszarów podgrzewania i ochładzania powietrza. Jeżeli strumień graniczny V_{gr} będzie większy od V_{min} i mniejszy od V_{max} to w pewnym zakresie strumieni powietrza wentylującego układ wentylacji będzie podgrzewał powietrze, natomiast w pozostałym zakresie strumieni powietrza wentylującego będzie to powietrze ochładzało. Przy granicznym strumieniu powietrza wentylującego V_{gr} do pomieszczenia będzie nawiewane powietrze o temperaturze powietrza zewnętrznego. W każdym z przypadków zyski ciepła w pomieszczeniu będą skutecznie asymilowane. Strumień graniczny będzie miał dodatnią wartość w dwóch przypadkach:

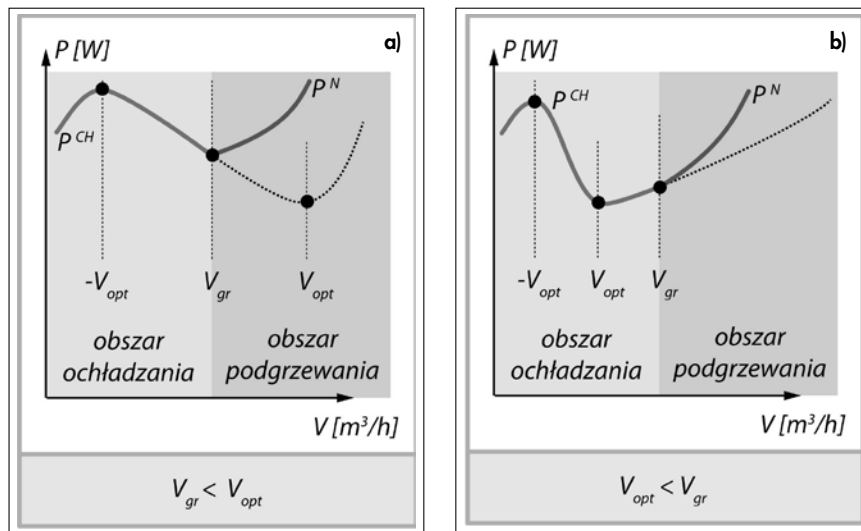
1. bilans ciepła w pomieszczeniu (Q) ma dodatnią wartość oraz $t_{pom} > t_{zew}$
2. bilans ciepła w pomieszczeniu (Q) ma ujemną wartość oraz $t_{pom} < t_{zew}$

W przypadku numer (1) założono, że różnica temperatury powietrza zewnętrznego i w pomieszczeniu we wzorze (7) będzie miała ujemną wartość. Przy określonej wartości bilansu ciepła, każde

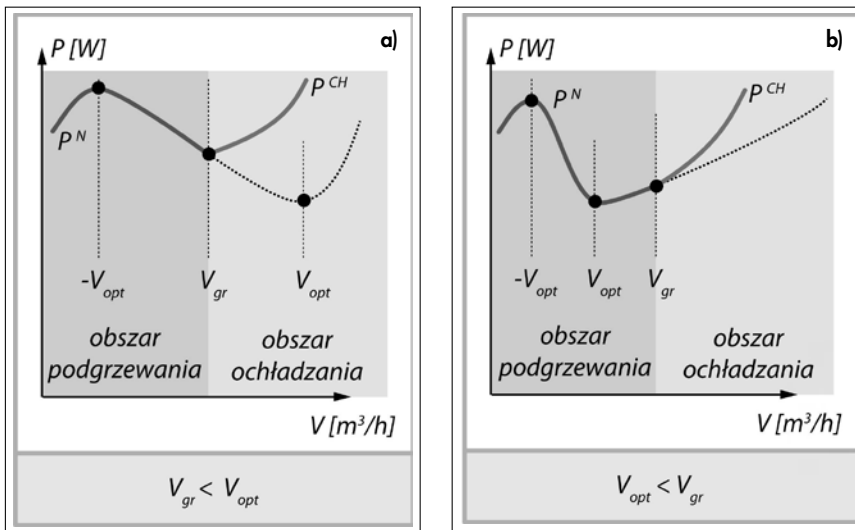
zwiększanie strumienia powietrza wentylującego V będzie powodowało, że liczba pod wartością bezwzględną wzoru (7) będzie malała. Oznacza to, że każde zwiększanie strumienia powietrza wentylującego przesuwają bieżący punkt pracy układu wentylacji w obszar pracy nagrzewnicy (liczba pod wartością bezwzględną będzie malała, a w szczególnym przypadku będzie mniejsza od zera). Zatem jeżeli strumień powietrza będzie większy od strumienia granicznego V_{gr} to liczba pod wartością bezwzględną wzoru (7) będzie mniejsza od zera i układ wentylacji będzie ogrzewał powietrze.

Przypadek numer (1) generuje powstanie dwóch możliwości połączenia obszarów podgrzewania i ochładzania powietrza. Gdy strumień graniczny V_{gr} będzie poniżej strumienia optymalnego V_{opt} w obszarze ochładzania powietrza funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie malejąca. Natomiast w obszarze podgrzewania powietrza funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie rosnąca.

Przy takim złożeniu obu obszarów oraz przy założeniu, że funkcja jest ciągła w punkcie V_{gr} , minimum zapotrzebowania na moc będzie dokładnie przy strumieniu granicznym V_{gr} (rys. 1a). W innym wypadku, gdy strumień graniczny V_{gr} będzie powyżej strumienia optymalnego V_{opt} , zarówno w obszarze ochładzania, jak i podgrzewania powietrza, funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie rosnąca (rys. 1b). W takim wypadku minimum zapotrzebowania na moc będzie dokładnie przy optymalnym strumieniu powietrza niezbędnym do jego ochładzania.



Rys. 1. Wyznaczanie minimalnej wartości zapotrzebowania na moc niezbędną do uzdatniania i transportu powietrza w funkcji strumienia powietrza wentylującego dla założenia, że bilans ciepła w pomieszczeniu (Q) ma dodatnią wartość oraz $t_{pom} > t_{zew}$
 Fig. 1. Determining the minimum value of the demand for the necessary power for air treatment and air transport as a function of the ventilating air stream for the assumption that heat loads (Q) in the room have values greater than zero and $t_{pom} > t_{zew}$



Rys. 2.

Wyznaczanie minimalnej wartości zapotrzebowania na moc niezbędną do uzdatniania i transportu powietrza w funkcji strumienia powietrza wentylującego dla założenia, że bilans ciepła w pomieszczeniu (Q) ma ujemną wartość oraz $t_{pom} < t_{zew}$.
 Fig. 2. Determining the minimum value of the demand for the necessary power for air treatment and air transport as a function of the ventilating air stream for the assumption that heat loads (Q) in the room have values less than zero and $t_{pom} < t_{zew}$.

Przypadek numer 2 zakłada, że różnica temperatury powietrza zewnętrznego i w pomieszczeniu we wzorze (10) będzie miała dodatnią wartość. Przy stratach ciepła Q, każde zwiększanie strumienia powietrza wentylującego V będzie powodowało, że liczba pod wartością bezwzględną we wzorze (10) będzie rosła. Oznacza to, że każde zwiększanie strumienia powietrza wentylującego przesuną bieżący punkt pracy układu wentylacji w obszar ochładzania powietrza (liczba pod wartością bezwzględną będzie rosła, a w szczególnym przypadku będzie większa od zera. Zatem, gdy strumień powietrza wentylującego będzie większy od strumienia granicznego V_{gr} to liczba pod wartością bezwzględną będzie większa od zera i powietrze będzie w nim ochładzane.

W tym przypadku pojawiają się dwie możliwości połączenia obszarów podgrzewania i ochładzania powietrza. Gdy strumień graniczny V_{gr} będzie poniżej optymalnego strumienia powietrza V_{opt} w obszarze podgrzewania powietrza funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie funkcją malejącą. Natomiast w obszarze ochładzania powietrza funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie funkcją rosnącą. Przy takim złożeniu obu obszarów oraz, gdy przyjmie się ciągłość funkcji w punkcie granicznej wartości strumienia powietrza wentylującego V_{gr} minimum zapotrzebowania na moc będzie dokładnie przy strumieniu granicznym V_{gr} (rys. 2a). W innym wypadku, gdy graniczny strumień powietrza wentylującego będzie powyżej strumienia powietrza

optymalnego - zarówno w obszarze ochładzania, jak i podgrzewania powietrza - funkcja całkowitego zapotrzebowania na moc będzie rosnąca (rys. 2b).

Tabela 1. Warunki prawidłowego doboru strumienia powietrza wentylującego, aby zminimalizowane było całkowite zapotrzebowanie na moc niezbędną do pracy prostego układu wentylacyjnego
 Table 1. Conditions for the correct selection of the air volume to minimize the total demand for the power necessary for the operation of a simple ventilation system

	Q<0	Q>0
$t_{zew} < t_{pom}$	<p>POLE NR 1</p> <p>Nastawa strumienia V*: V_{min}</p> <p>Obszar pracy: podgrzewanie powietrza</p>	<p>POLE NR 2</p> <p>Nastawa strumienia V* Gdy $V_{gr} < V_{opt}$ V_{gr} Gdy $V_{gr} > V_{opt}$ V_{opt}</p> <p>Obszar pracy: gdy $V < V_{gr}$ ochładzanie powietrza gdy $V = V_{gr}$ brak obróbki termicznej gdy $V > V_{gr}$ ogrzewanie powietrza</p>
$t_{zew} = t_{pom}$	<p>POLE NR 3</p> <p>Nastawa strumienia V*: V_{min}</p> <p>Obszar pracy: podgrzewanie powietrza</p>	<p>POLE NR 4</p> <p>Nastawa strumienia V*: V_{min}</p> <p>Obszar pracy: ochładzanie powietrza</p>
$t_{zew} > t_{pom}$	<p>POLE NR 5</p> <p>Nastawa strumienia V*: Gdy $V_{gr} < V_{opt}$ V_{gr} Gdy $V_{gr} > V_{opt}$ V_{opt}</p> <p>Obszar pracy: gdy $V < V_{gr}$ podgrzewanie powietrza gdy $V = V_{gr}$ brak obróbki termicznej gdy $V > V_{gr}$ ochładzanie powietrza</p>	<p>POLE NR 6</p> <p>Nastawa strumienia V*: V_{min}</p> <p>Obszar pracy: ochładzanie powietrza</p>

Tabela 2. Dane niezbędne do przeprowadzenia symulacji dających obraz prawidłowości nastaw
 Table 2. All data necessary to carry out the simulations

Parametr zadany	Wartość
Temperatura powietrza w pomieszczeniu	$t_{pom} = 21^{\circ}\text{C}$
Jednostkowy maksymalny strumień powietrza wentylującego	$V_{imax} = 50\text{m}^3/\text{hos}$
Bilans ciepła w pomieszczeniu	$Q = 3,51 t_{zew} + 4,39\text{ W}$
Minimalny strumień powietrza wentylującego	$V_{min} = 0,4V_{max}$
Nominalny spręż wentylatora nawiewnego	300 Pa
Nominalny spręż wentylatora wywiewnego	150 Pa
Pole przekroju kanału, w którym dokonywany jest pomiar prędkości powietrza	0,09m ²
Sprawność zespołu wentylator-silnik 0,2018	0,2018
Sprawność chłodzenia	3,7994
Sprawność ogrzewania	3,9711

W takim wypadku minimum zapotrzebowania na moc będzie dokładnie dla strumienia powietrza optymalnego V_{opt} .

Tablica sterowania

W tabeli 1 zebrano informacje, dotyczące prawidłowego doboru strumienia powietrza wentylującego, aby zminimalizowane było całkowite zapotrzebowanie na moc niezbędną do pracy prostego układu wentylacyjnego. Sugerowane w tabeli nastawy strumienia powietrza (oznaczone *) należy zawsze porównać z minimalną i maksymalną wartością strumienia powietrza dopuszczalnego. Jeżeli sugerowana wartość strumienia będzie poniżej wartości strumienia powietrza minimalnego $V < V_{min}$, należy wówczas nastawić strumień powietrza na wartość minimalną V_{min} . Jeżeli sugerowana wartość strumienia będzie powyżej wartości maksymalnego strumienia powietrza wentylującego $V > V_{max}$, należy go ustawić na wartość maksymalną V_{max} . Oznaczenie * przy nastawach strumienia dotyczy także konieczności spełnienia wymogów dotyczących temperatury powietrza nawiewanego. Zadany strumień powietrza wentylującego nie może wiązać

się z nawiewaniem do pomieszczenia zbyt chłodnego, lub zbyt gorącego strumienia powietrza. Na przykład, jeżeli tabela sterowania zaleca strumień V_{min} i przy tym strumieniu temperatura powietrza nawiewanego mieliby zbyt niską wartość, strumień ten należy zwiększyć, tak, aby temperatura powietrza nawiewanego miała akceptowalną wartość.

Eksperyment

Celem zobrazowania prawidłowego przyjmowania nastaw wentylacyjnych założono, że projektowany system, którego schemat przedstawiono na rys. 3, będzie obsługiwał salę lekcyjną o wymiarach 9 m x 9 m. Przewiduje się, że w sali będzie przebywało 30 uczniów i 1 nauczyciel. W tabeli 2 zestawiono wszystkie niezbędne informacje potrzebne do przeprowadzenia symulacji dających obraz prawidłowości nastaw.

Na rys. 4 przedstawiono zmienność bilansu ciepła jawnego Q w pomieszczeniu w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego oraz numery pól z tabeli sterowania, w których pracuje układ wentylacyjny.

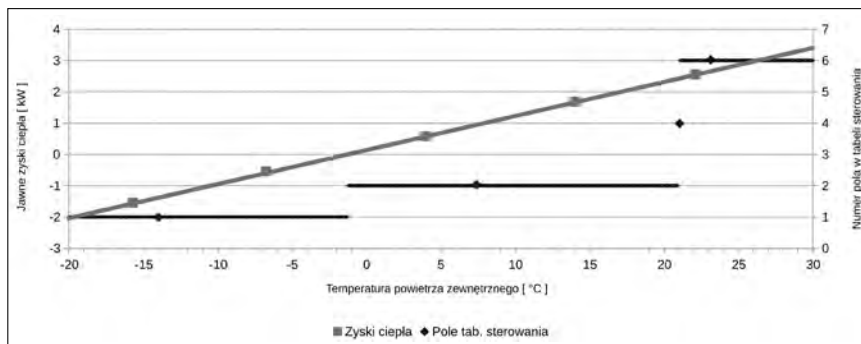
Sterowanie optymalne

Ogrzewanie i ochładzanie powietrza przy minimalnym strumieniu powietrza nawiewanego

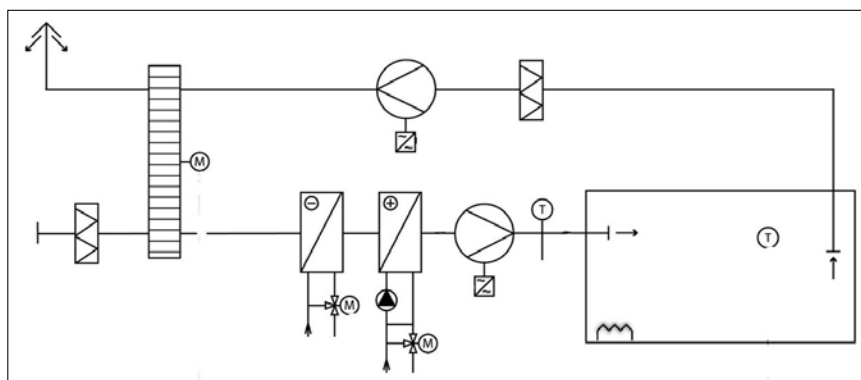
Układ wentylacji pracuje zgodnie ze sterowaniem opisanym w polu nr 1 tabeli 1. Zmienność strumienia powietrza wentylującego określoną dla sterowania optymalnego przedstawiono na rys. 5. Natomiast na rys. 6. przedstawiono zmienności temperatury powietrza w różnych miejscach układu oraz sprawności wymiennika do odzysku ciepła w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego.

Gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest poniżej $-1,3^{\circ}\text{C}$ (rys. 4) minimalny strumień powietrza V_{min} jest utrzymywany przez cały czas, z wyjątkiem najniższych wartości temperatury powietrza zewnętrznego (rys. 5). Gdy temperatura powietrza zewnętrznego spadnie poniżej $-16,5^{\circ}\text{C}$ w układzie wentylacyjnym należy zwiększyć strumień powietrza wentylującego, aby do pomieszczenia nie było nawiewane powietrze o zbyt wysokiej temperaturze. W takim wypadku do pomieszczenia nawiewane jest powietrze o najwyższej akceptowalnej temperaturze, czyli 29°C (rys. 6). W zakresie temperatury powietrza zewnętrznego $(-20) \div (+5)^{\circ}\text{C}$ strumień powietrza zewnętrznego jest ogrzewany w nagrzewnicy.

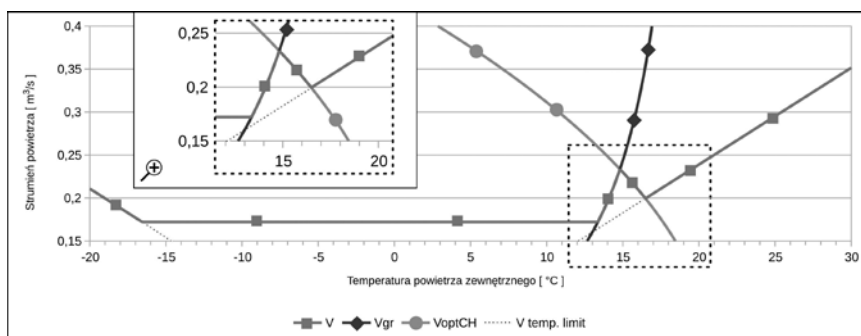
W okresie przejściowym i letnim, gdy



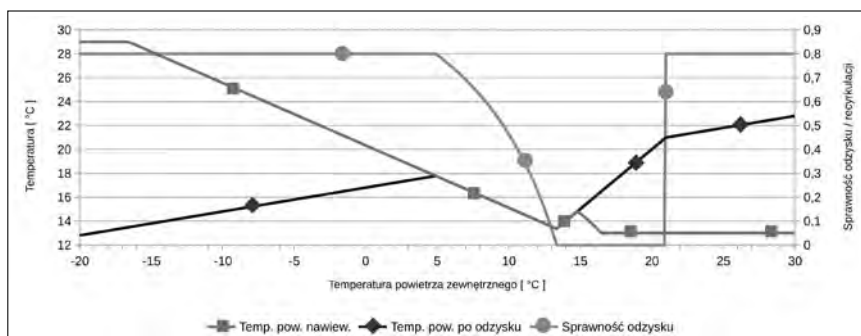
Rys. 4. Zmienność bilansu ciepła jawnego Q w pomieszczeniu oraz numery pól z tabeli sterowania (tabela 1), w których pracuje układ wentylacyjny w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego
Fig. 4. Variability of the balance of sensible heat Q and range of fields from the control table (table 1) in the room as a function of the outside air temperature



Rys. 3. Schemat prostego układu wentylacyjnego z wymiennikiem obrotowym do odzysku ciepła z powietrza usuwanego z pomieszczenia oraz z możliwością ochładzania powietrza latem oraz ogrzewania powietrza zimą
Fig. 3. Diagram of a simple ventilation system with a rotary exchanger for heat recovery from the air removed from the room and with the possibility of air cooling in summer and air heating in winter



Rys. 5. Zmienność strumienia powietrza wentylującego w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego
Fig. 5. Variability of the ventilating air stream as a function of the outside air temperature



Rys. 6. Zmienności temperatury powietrza w różnych miejscach układu oraz sprawności wymiennika do odzysku ciepła w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego
Fig. 6. Air temperature variability in different places of the system and efficiency of the heat recovery

temperatura powietrza zewnętrznego jest powyżej 21,1°C, gdyby jednak układ wentylacji pracował przy minimalnym strumieniu powietrza wentylującego V_{\min} to do pomieszczenia byłoby nawiewane zbyt chłodne powietrze, co mogłoby dawać w efekcie odczucie nieprawidłowej wentylacji. Dlatego w tym obszarze należałoby zmienić strumień powietrza wentylującego w taki sposób, aby temperatura powietrza nawiewanego do pomieszczenia była na najniższym akceptowalnym poziomie tj. 13°C.

Warto zauważyć, że praca układu wentylacyjnego opisana w polach 1 i 6 tabeli 1 tak naprawdę nie wymaga żadnej optymalizacji (w granicach założeń przyjętych w tym artykule). Dość łatwo jest zaprojektować odpowiednie sekwencje sterowania, które będą załączane sekwencyjnie. Znacznie bardziej skomplikowany przebieg ma praca układu wentylacji w polu nr 2 opisanym w tabeli sterowania (tabela 1).

Ogrzewanie i ochładzanie powietrza przy strumieniu powietrza nawiewanego zmieniającego się w zakresie $V_{gr} \cdot V_{opt}$

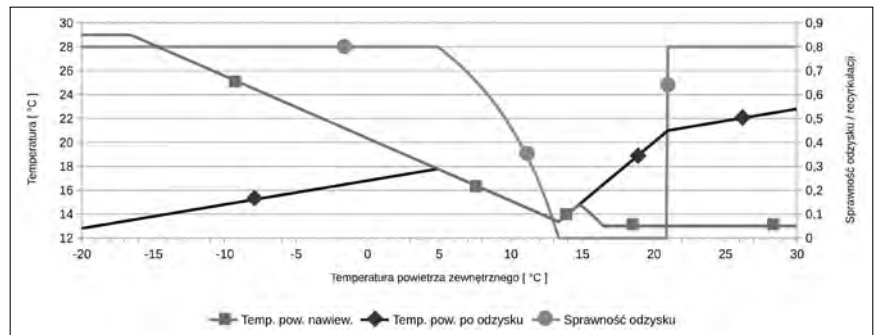
Na rys. 7 zobrazowano pracę układu wentylacyjnego w zakresie nastaw opisanych w polu 2 tabeli sterowania (tabela 1).

Omawiany układ wentylacji będzie pracował w polu nr 2 tabeli sterowania przy temperaturze powietrza zewnętrznego od około (-1,2)°C do około (+20,9)°C. Dlatego jedyna możliwość jakiegokolwiek optymalizacji występuje właśnie we wspomnianym zakresie temperatury powietrza zewnętrznego. Jak wynika z rys. 5 gdy $V_{gr} < V_{optCH}$ należy ustawić graniczny strumień powietrza wentylującego V_{gr} . Strumień powietrza graniczny V_{gr} jest większy od strumienia powietrza minimalnego V_{\min} dopiero przy temperaturze powietrza zewnętrznego powyżej 13,4°C. Dopiero wtedy rzeczywiście może zostać ustawiony graniczny strumień powietrza V_{gr} .

Dla temperatury powietrza zewnętrznego poniżej 13,4°C układ wentylacji powinien pracować z minimalnym strumieniem powietrza. Oznacza to, że układ pracuje w trybie podgrzewania ($V_{gr} < V_{\min}$).

Warto zauważyć, że do temperatury powietrza zewnętrznego wynoszącej +5°C pracuje nagrzewnica oraz wymiennik do odzysku ciepła, a w zakresie temperatury $t_z = <+5°C, 13,4°C>$ regulowana jest sprawność odzysku ciepła (rys. 7). W omawianym zakresie temperatury powietrza zewnętrznego, wymiennik do odzysku ciepła pracuje zawsze jako element podgrzewający powietrze.

Obszar podgrzewania powietrza



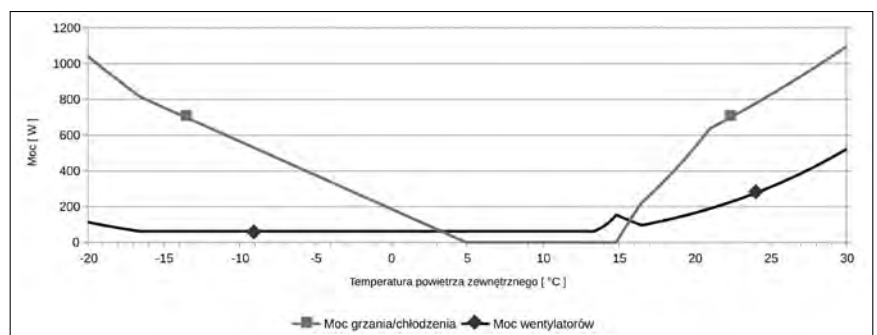
Rys. 7.

Zmienności temperatury powietrza w różnych miejscach układu oraz sprawności wymiennika do odzysku ciepła w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego dla strumienia powietrza wentylującego z zakresu $<V_{gr} \cdot V_{opt}>$

Fig. 7. Variability of air temperature in different places of the system and efficiency of the heat recovery exchanger as a function of outside air temperature for the stream of ventilating air in the range $<V_{gr} \cdot V_{opt}>$

zewnętrznego kończy się, gdy temperatura powietrza zewnętrznego osiąga wartość 13,4°C. Wtedy strumień powietrza graniczny V_{gr} zaczyna być większy od strumienia powietrza minimalnego V_{\min} , przy czym jest jednocześnie mniejszy od strumienia powietrza optymalnego związanego z potrzebą chłodzenia V_{optCH} . Od tego momentu układ wentylacji powinien pracować wtedy wyłącznie na tylko oczyszczanym powietrzu zewnętrznym. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego, gdy optymalny strumień powietrza w obszarze chłodzenia V_{optCH} staje się mniejszy od V_{gr} , układ wentylacji zaczyna pracować już na strumieniu V_{optCH} i jednocześnie uruchomiona zostaje chłodnica. Gdyby układ wentylacji podjął dalej wzdłuż krzywej obrazującej V_{optCH} zauważalne byłoby mniejsze zapotrzebowanie na energię, ale do pomieszczenia byłoby nawiewane zbyt chłodne powietrze. W efekcie powietrze w pomieszczeniu byłoby przeschłodzone. Taka sytuacja nie może mieć miejsca, dlatego tutaj układ wentylacji musi byćysterowany jak w polu 6 tabeli sterowania.

Moc chwilowa urządzeń



Rys. 8.

Wykres zapotrzebowania na moc potrzebną do transportu, ogrzewania i ochładzania powietrza (moc cieplna jest tu przedstawiana jako ekwiwalent mocy elektrycznej, aby była bezpośrednio porównywalna z zapotrzebowaniem na moc potrzebną do napędu wentylatorów)

Fig. 8. Diagram of power demand for transport, heating and cooling of the air (the thermal power is presented here as an equivalent of electric power, so that it is directly comparable with the power demand for driving the fans)

Na rys. 8 zamieszczono wykres obrazujący zapotrzebowanie na moc potrzebną do transportu, ogrzewania i ochładzania powietrza wentylującego. W przedziale temperatury powietrza zewnętrznego $t_{zew} = <5°C, 14,8°C>$ nie pracuje ani nagrzewnica, ani chłodnica, stąd zapotrzebowanie na moc do ogrzewania/ochładzania powietrza wynosi 0 W. Nie oznacza to jednak całkowitego braku zapotrzebowania na ogrzanie czy ochładzanie powietrza.

W zakresie temperatury powietrza zewnętrznego $t_{zew} = <5°C, 13,4°C>$ powietrze zewnętrzne jest ogrzewane, ale wyłącznie w wymienniku do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego. Natomiast w zakresie temperatury powietrza zewnętrznego $t_{zew} = <13,4°C, 14,8°C>$ do pomieszczenia nawiewane jest jedynie oczyszczone powietrze zewnętrzne. W tym wąskim zakresie temperatury powietrza zewnętrznego, regulowana jest tylko wydajność wentylatorów nawiewnego i wywiewnego.

Problemy z praktycznym wykorzystaniem tabeli sterowania (tabela 1)

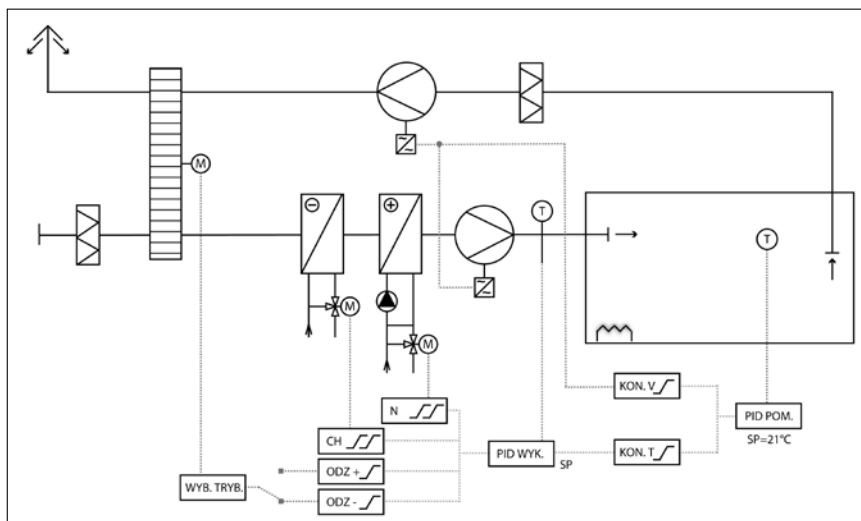
W przypadku rzeczywistych układów

największym problemem jest wyznaczenie wartości granicznego strumienia powietrza wentylującego V_{gr} oraz optymalnego dla obszaru ochładzania powietrza V_{optCH} tym bardziej, że jej moc zależy od wielu czynników [12].

Strumień powietrza graniczny V_{gr} można wyznaczyć w sterowniku swobodnie programowalnym korzystając ze wzoru (12). Wyznaczenie strumienia powietrza wentylującego optymalnego dla obszaru ochładzania powietrza V_{optCH} dla rzeczywistego układu nie jest już tak oczywiste, a przez to dość trudne. Związane jest to m.in. z koniecznością określenia współczynników sprawności urządzeń, a jak wiadomo, sprawność działania wentylatora zmienia się wraz ze zmianą prędkości obrotowej wirnika. W przypadku ogrzewania i ochładzania powietrza sprawa tych współczynników jest jeszcze bardziej skomplikowana. W omawianym przykładzie można było wyznaczyć współczynnik, który konwertuje wartość mocy cieplnej na ekwiwalent mocy elektrycznej, ale zostało to wykonane tylko dla nominalnych parametrów pracy układu. Tymczasem problem optymalizacji ujawnia się już dość szybko, zanim układ chłodzenia osiągnie nominalne parametry pracy.

Przykładowy układ wentylacji pracuje na krzywej V_{optCH} (rys. 6) przy średnim schłodzeniu powietrza wynoszącym $1,7^{\circ}C$. Odpowiada temu średnia moc chłodnicza na poziomie 430W. Tymczasem przy maksymalnym obciążeniu cieplnym układu, chłodnica pracuje z mocą wynoszącą ponad 4,1kW. Tym samym występują tu duże różnice pomiędzy mocą nominalną, a mocą, przy której układ ma możliwości jego optymalizacji. Dlatego współczynniki sprawności wyznaczone w warunkach nominalnych, mogą być niewiarygodne przy obciążeniach chłodnicy rzędu 10%. Na to wszystko należałoby nałożyć problem nierównomierności poboru energii przez układ chłodzenia. W niektórych przypadkach, praca sprężarki może odbywać się w innym czasie niż faktyczny pobór energii chłodniczej. Trudno w takich okolicznościach w sposób pewny oszacować sprawność urządzenia chłodniczego.

Nie bez konsekwencji pozostaje także fakt przyjętych w propozycji sterowania optymalnego współczynników oporu $R_{w,N}$ i $R_{w,W}$. Oczywiście jest, że współczynniki te zależą m.in. od stanu zanieczyszczenia filtrów powietrza. Ponadto cała analiza przeprowadzana na potrzeby artykułu jest wykonywana dla konkretnych wartości strumienia powietrza wentylującego, a strumień ten jest argumentem funkcji



Rys. 9. Schemat blokowy uniwersalnego algorytmu sterowania, bez wbudowanej możliwości jakiegokolwiek optymalizacji

Fig. 9. Universal control block diagram, no optimization technology selectable

całkowitego zapotrzebowania na moc. Tymczasem w rzeczywistych układach strumień powietrza wentylującego jest mierzony relatywnie rzadko, choć należy zauważyć, że sytuacja rynkowa zaczyna się w tej materii zmieniać.

Sterowanie bez optymalizacji – BO

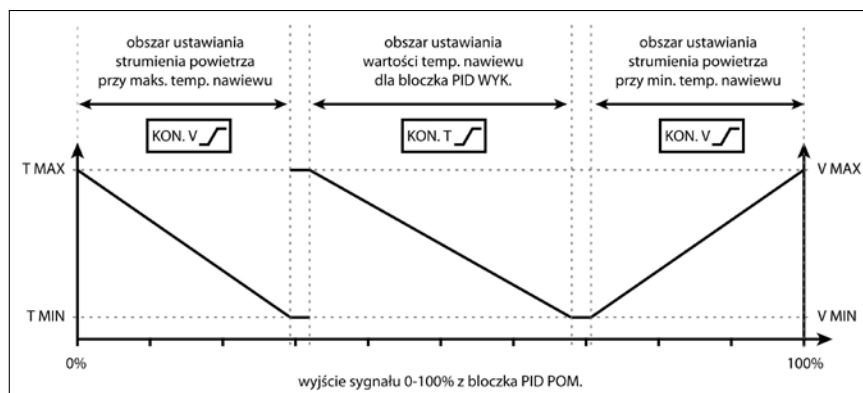
Biorąc pod uwagę liczne problemy związane z wyznaczeniem strumienia V_{optCH} w pierwszym przybliżeniu zostanie zaproponowany uniwersalny algorytm sterowania, który pomija wszelkie wymienione komplikacje techniczne i pozatechniczne. Idea jest taka, aby układ wentylacji pomijał pola nr 2 i 5 tabeli sterowania (tabela 1). Przykładowy układ pracowałby najpierw w polu nr 1 i wraz ze wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego przechodziłby od razu poprzez pole nr 4 do pola nr 6. Realizacja takiego uniwersalnego algorytmu sterowania nie odbiega w praktyce od strategii powszechnie stosowanych we współczesnych układach wentylacyjnych.

Jedną z propozycji realizacji takiego układu automatyki została zilustrowana na schemacie zamieszczonym na rys. 9.

Sygnal pomiaru temperatury powietrza w pomieszczeniu jest doprowadzany do blozka PID POM. Blozdek, określany jako regulator PID powietrza w pomieszczeniu, odpowiada za porównywanie zmierzonej temperatury powietrza z wartością zadaną. Wyjście z blozka PID POM jest podawane na dwa blozki sekwencji. Blozki KON. V i KON. T odpowiadają za wygenerowanie wartości zadanej temperatury powietrza nawiewanego oraz wartości zadanej strumienia powietrza wentylującego.

Blozdek KON. V nie musi generować konkretnej wartości strumienia powietrza wentylującego, a jedynie może w procentach wskazywać na zadaną wydajność wentylatora. Działanie blozków KON. V i KON. T ilustrują wykresy sekwencji, które zostały zamieszczone na rys. 10.

Sekwencje zobrazowane na rys. 10



Rys. 10. Sekwencje kształtujące wartości zadane temperatury powietrza nawiewanego oraz strumienia powietrza wentylującego (strumień powietrza wentylującego może być ujęty jako procent prędkości obrotowej wirnika wentylatora)

Fig. 10. The sequence of supply air temperature and airflow set points (air flow set point can be treated as percentage of rotational speed of fan)

gwarantują, że układ automatyki będzie w pierwszej kolejności powodował uzdatnianie powietrza. Dopiero, gdy układowi automatyki nie uda się zapewnić wymaganych dla pomieszczenia parametrów komfortu, przy strumieniu minimalnym, obroty wentylatora będą zwiększane. Jest to zasada, która jest zapisana w polach nr 1, 3, 4 i 6 tabeli sterowania (tabela 1). Układ wentylacji będzie również w ten sposób pracował w polu nr 2 (i ewentualnie w polu nr 5). Może to spowodować większe zużycie energii, ale rekompensatą tego jest fakt, że sam układ sterowania jest mniej złożony, a co za tym idzie tańszy.

Wartość zadana temperatury powietrza nawiewanego jest podawana na regulator wykonawczy, nazwany na schemacie PID WYK. Wyjście z regulatora PID WYK. jest podawane na bloki sekwencji, które zostały zilustrowane na rys. 11. W artykule proponuje się zastosowanie dodatkowego blocka wyboru trybu pracy WYB. TRYB. Block ten odpowiada za przełączanie odpowiedniej sekwencji sterowania pracą wymiennika do odzysku ciepła. Jeżeli temperatura powietrza wskazuje, że w wymienniku do odzysku ciepła powietrze będzie podgrzewane, block WYB. TRYB. aktywuje sekwencję ODZ+. Jeżeli z pomiarów wynika, że w wymienniku do odzysku ciepła powietrze będzie ochładzane, wówczas block WYB. TRYB. przełączy sekwencję sterowania pracą tego wymiennika na ODZ-.

W typowych układach automatycznej regulacji i sterowania pracą układów z odzyskiem ciepła najczęściej wymiennik do odzysku ciepła jest „uruchamiany” wraz ze startem chłodnicy (lub przy jej niskiej wydajności chwilowej) i szybko osiąga wartość maksymalnej sprawności.

W propozycji sterowania przedstawionej na rys. 11 obie sekwencje sterowania pracą wymiennika do odzysku ciepła są niejako symetryczne względem strefy

martwej. Takie podejście pozwala odzyskiwać chłód (free-cooling), wtedy kiedy nie pracuje chłodnica.

W rzeczywistości takie sytuacje nie zdarzają się często, jednak w kilku specyficznych przypadkach mogą one wystąpić. W szczególności, jeżeli w pomieszczeniu będzie źródło chłodu, czyli np. mocno chłodzący układ typu Split, który nie jest sprzężony z układem wentylacyjnym. Wtedy układ wentylacyjny byłby w stanie jedynie odzyskiwać chłód z powietrza wywiewanego i nie musiałby uruchamiać własnej chłodnicy. W innych okolicznościach, kiedy zyski ciepła w pomieszczeniu będą małe, układ wentylacyjny może wygaszać proces chłodzenia powietrza powoli. Najpierw wyłączy chłodnicę, a potem przez jakiś czas będzie regulował temperaturę powietrza nawiewanego poprzez regulację pracy wymiennika do odzysku ciepła. Gdyby sekwencja sterująca pracą wymiennika do odzysku ciepła wyłączała się w momencie wyłączenia chłodnicy, układ automatyki w żaden sposób nie byłby w stanie wykorzystywać chłodu zakumulowanego w pomieszczeniu.

Ostatnim argumentem za pozostawieniem sekwencji odzysku ODZ- całkowicie przed sekwencją chłodnicy jest fakt, że odzysk ciepła lub recyrkulacja to pierwsze możliwości uzdatniania powietrza, które praktycznie nie generują kosztów eksploatacyjnych. Dlatego układ wentylacyjny zawsze mógłby sprawdzać, w jakim trybie pracuje wymiennik do odzysku ciepła i odpowiednio do potrzeb go załączać lub wyłączać. Z pewnością układ automatyki i sterowania obsłuży wtedy każdy, nawet niecodzienny wariant zysków czy strat ciepła i temperatury powietrza zewnętrznego.

Pewną wadą proponowanego rozwiązania jest fakt, że nieco później może załączać się chłodnica. Gdy wymiennik do odzysku ciepła nie będzie pracował w trybie chłodzenia, to aktywna będzie sekwencja ODZ+. Wtedy odzysk będzie

wyłączony, a regulator PID WYK. będzie musiał przejść przez strefę martwą, w której normalnie regulowany jest ODZ-. Dopiero po uruchomieniu chłodnicy praca wymiennika do odzysku przestawi się w tryb chłodzenia i aktywna będzie sekwencja ODZ-. W takim wypadku sprawność wymiennika do odzysku ciepła będzie maksymalna.

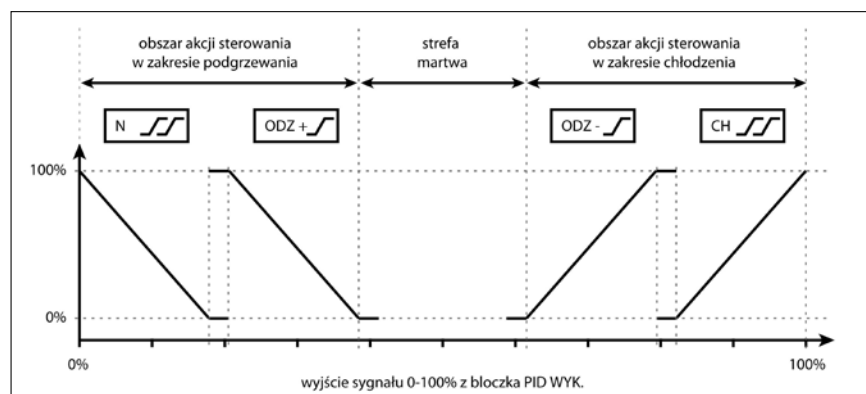
Sterowanie z okresową optymalizacją – ZOO

W przypadku sterowania pracą układu wentylacyjnego z częściową optymalizacją chodzi o to, aby zbliżyć się do rozwiązania optymalnego, czyli do rozwiązania zawartego w tabeli sterowania (tabela 1). Strategie takie nazywane są w literaturze SAT Reset. W niniejszym artykule zostanie zaproponowana jedna z takich strategii, która w sposób pewny, będzie podążała według krzywej V_{gr} , przynajmniej przez pewien okres pracy układu wentylacyjnego.

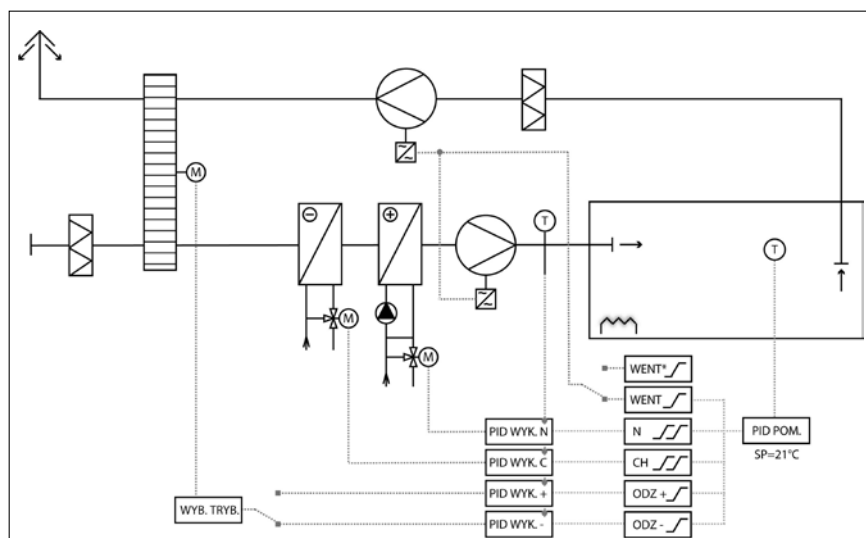
Na rys. 12 zamieszczono schemat blokowy algorytmu sterowania, częściowo uwzględniający optymalizację. Wyjście z regulatora PID pomieszczenia, tj. PID POM. jest jednocześnie podawane na blocki sekwencji. Każde urządzenie ma swoje własne sekwencje sterowania, a tym samym każde urządzenie z wyjątkiem wentylatora, musi być bezpośrednio sterowane przez swój własny regulator PID. Dzięki takiemu schematowi połączeń, istnieje możliwość praktycznie niezależnego załączania poszczególnych elementów układu. Na rys. 13 zamieszczono wszystkie sekwencje sterowania jednocześnie.

Wartości zadane temperatury powietrza nawiewanego są tak dobrane, aby wykluczać jednoczesne załączanie się „przeciwstawnych” urządzeń. Na przykład, gdy pracuje chłodnica schładzająca powietrze do temperatury 13°C, temperatura zadana w nagrzewnicy jest ustawiona na wartość poniżej T MIN, czyli poniżej 13°C. Ponieważ nastawy regulatora PID nagrzewnicy zostały tak dobrane, aby nagrzewnica zwiększała swoją wydajność, gdy temperatura jest za niska, to w takim wypadku nagrzewnica nie uruchomi się wcale.

Gdyby nie sekwencja sterowania wentylatorem zaznaczona na rys. 12 kolorem szarym, układ automatyki generowałby w stanie ustalonym dokładnie te same akcje sterowania, jak układ bez optymalizacji BO. Tymczasem wprowadzona do algorytmu dodatkowa sekwencja sterowania pracą wentylatora (rys. 13 - kolor szary) może być aktywna tylko, gdy układ wentylacji pracuje w polu nr 2 Tabeli Stero-

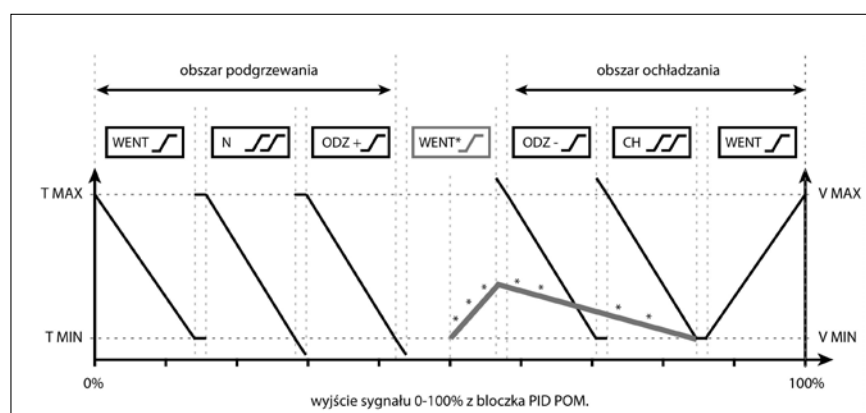


Rys. 11. Sekwencje kształtujące wydajności poszczególnych urządzeń wykonawczych
Fig. 11. Sequences shaping the performance of individual actuators



Rys. 12. Schemat blokowy uniwersalnego algorytmu sterowania, wraz z wbudowaną możliwością okresowej optymalizacji

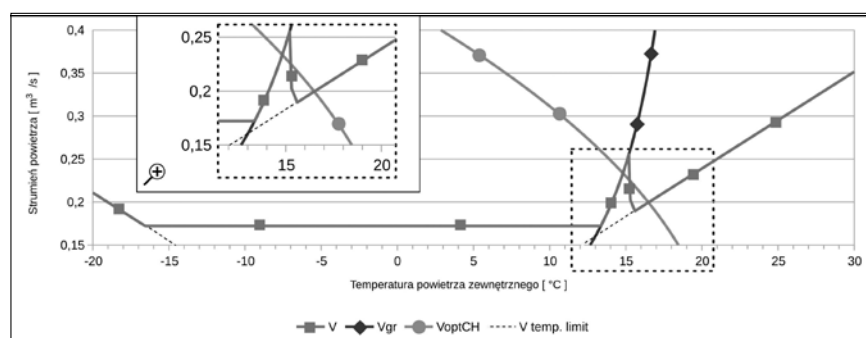
Fig. 12. Block diagram of a universal control algorithm, with built-in periodic optimization



Rys. 13.

Sekwencje kształtujące wartości zadane temperatury powietrza nawiewanego oraz strumienia powietrza wentylującego dla wszystkich urządzeń niezależnie

Fig. 13. Sequences shaping the supply air temperature setpoints and the ventilating airflow for all devices independently



Rys. 14. Wykres strumieni powietrza wentylującego w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego przy sterowaniu z okresową optymalizacją

Fig. 14. Diagram of the ventilation air flows as a function of the outside air temperature during control with periodic optimization

wania. Dlatego bloček sekwencji pracy wentylatorów został zapisany na schemacie w formie dwóch bločków. Standardowa sekwencja wentylatorów WENT jest oznaczona kolorem czarnym i powinna być zawsze aktywna. Dodatkowa sekwencja WENT* jest oznaczona kolorem szarym.

Jeżeli układ pracuje w innym polu tabeli sterowania, np w polu nr 6, ta dodatkowa sekwencja nie powinna być aktywna. W takim wypadku wentylatory będą pracowały przy V_{min} zamiast przy strumieniu zwiększonym przez dodatkową sekwencję. Gdy dodatkowa sekwencja WENT*

narasta, układ będzie próbował ochładzać powietrze wyłącznie powietrzem zewnętrznym. Zwiększany będzie strumień powietrza wentylującego, natomiast chłodnica będzie wyłączona. Strumień powietrza będzie zwiększany do ustalonej z góry wartości, którą można oznaczyć jako V_{Smax} . Po przejściu przez punkt V_{Smax} , wraz ze wzrostem obciążenia cieplnego strumień powietrza będzie obniżany, aby ostatecznie osiągnąć wartość V_{min} . W tym czasie chłodnica będzie schładzała powietrze do temperatury 13°C. Dalszy wzrost obciążenia cieplnego spowoduje, że strumień powietrza wentylującego znów będzie zwiększany, ze względu na ograniczenie minimalnego poziomu temperatury powietrza nawiewanego.

Dodatkowa sekwencja sterowania wentylatorem WENT* ma jasno zdefiniowane punkty zaczepienia przy V_{min} . Jest to 50% sygnału z bločka PID POM. i punkt, w którym chłodnica ma pracować z nastawą T_{MIN} temperatury powietrza nawiewanego (rys. 13). Pozostaje pytanie, jak wyznaczyć punkt maksymalny V_{Smax} , przy którym nie będzie jeszcze uruchomiona chłodnica. Autor proponuje, aby dobór punktu V_{Smax} był przeprowadzany w sposób dynamiczny, w trakcie długookresowej pracy układu wentylacyjnego.

W momencie pierwszego uruchomienia instalacji wartość V_{Smax} w dodatkowej sekwencji sterowania, byłaby dobierana wstępnie przez operatora. Operator mógłby posłużyć się wyliczeniami zamieszczonymi w artykule, ale mógłby również samodzielnie oszacować wartość V_{Smax} na podstawie własnej wiedzy i doświadczenia. W artykule założono, że operator oszacował V_{Smax} jako 30m³/hos. Ustawienie $V_{Smax} = 30\text{m}^3/\text{hos}$ odpowiada sumarycznemu strumieniowi powietrza wentylującego na poziomie około 0,25 m³/s. Oznacza to, że układ wentylacji, jeżeli zajdzie potrzeba ochładzania powietrza przy V_{min} , w pierwszym rzędzie będzie zwiększał strumień powietrza wentylującego aż do momentu, gdy $V < 0,25$ m³/s. W tym czasie chłodnica będzie pozostawała wyłączona. Innymi słowy, układ wentylacyjny będzie w rzeczywistości pracował na krzywej V_{gr} , aż na tej krzywej nie osiągnie wartości 0,25 m³/s. Omawiany efekt można zaobserwować na rys. 14.

Przykładowy układ przeprowadza chłodzenie powietrza wyłącznie powietrzem zewnętrznym do $t_{zew} \approx 15,2^\circ\text{C}$.

Gdy $t_{zew} > 15,2^\circ\text{C}$, zapotrzebowanie na ochładzanie powietrza dalej rośnie, natomiast dodatkowa sekwencja sterowania pracą wentylatorów, de facto zmniejsza

sza prędkość obrotową wirników wentylatorów. Sekwencja po przekroczeniu V_{Smax} zaczyna maleć, co zostało już omówione (rys. 13). Zanim układ wentylacyjny osiągnie pracę w stanie ustalonym, chłodnica ciągle pozostaje wyłączona. Jest to wynik ustawienia wartości zadanej temperatury powietrza nawiewanego za chłodnicą powyżej T_{MAX} . Wraz z tym jak regulator pomieszczeniowy PID POM. generuje sygnał o wyższych wartościach, włączane są kolejne sekwencje. W końcu sekwencja chłodnicy zaczyna zmniejszać wartość zadanej temperatury powietrza dla chłodnicy. Jednocześnie strumień powietrza (alternatywnie prędkość obrotowa wirników wentylatorów) dalej jest zmniejszany. Dopiero w pewnym momencie, układ zaczyna pracować w stanie ustalonym. W analizowanym przypadku, układ automatyki ustawił strumień powietrza na poziomie $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, co jest wartością poniżej V_{Smax} , ale powyżej V_{min} . Natomiast chłodnica schładza powietrze do temperatury $13,6^\circ\text{C}$. Ustawienie strumienia powietrza wentylującego na poziomie $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ przy temperaturze powietrza nawiewanego $13,6^\circ\text{C}$ jest efektem nachodzenia na siebie sekwencji WENT* i CH na rys. 13. Zanim układ automatyki osiągnął punkt pracy $V_{Smax}=0,2\text{m}^3/\text{s}$ i $t = 13,6^\circ\text{C}$, poprzednio (przy nieco mniejszych zyskach ciepła i nieznacznie niższej temperaturze powietrza zewnętrznego t_{zew}) pracował na powietrzu zewnętrznym przy strumieniu $V_{Smax} = 0,25\text{m}^3/\text{s}$.

Zaproponowany w artykule układ sekwencji sterowania w rzeczywistości nie tylko opóźnia załączenie chłodnicy, ale jednocześnie uruchamia chłodnicę przy mniejszym strumieniu powietrza niż wynika to bezpośrednio z bilansu ciepła jawnego w pomieszczeniu. Dzięki temu tworzy się margines bezpieczeństwa, załączający chłodnicę w momencie, kiedy wymagane jest już większe chłodzenie, a nie tylko czysto teoretyczne, np. na poziomie $0,1^\circ\text{C}$ schłodzenia. Omawiany margines bezpieczeństwa jest również widoczny na rys. 14, jako praktycznie pionowa linia w dół przy $t = 15,3^\circ\text{C}$. Przy $t_{zew} 15,3^\circ\text{C} \div 15,6^\circ\text{C}$ krzywa maleje już pod mniej ostrym kątem. Jest to obszar pracy wynikający z nakładania się sekwencji WENT* i CH co jest efektem samej konstrukcji algorytmu sterowania. Taka realizacja sterowania, ma szansę przybliżać pracę układu wentylacyjnego po krzywej V_{optCH} .

Dopiero przy $t_{zew} > 15,6^\circ\text{C}$ chłodnica utrzymuje stałą temperaturę powietrza nawiewanego na poziomie T_{MIN} , a strumień jest zwiększany zgodnie ze standardową sekwencją WENT.

Wnioski

W artykule opisano badania pracy układu wentylacyjnego obsługującego jedno pomieszczenie. Skoncentrowano się na całościowej analizie pracy układu, we wszelkich możliwych sytuacjach. Zaproponowano zestaw ścisłych zaleceń dotyczących algorytmów sterowania, które zebrano w tabeli sterowania (tabela 1). Tabela ta jasno wskazuje, że jakakolwiek optymalizacja jest możliwa tylko w dwóch sytuacjach. W praktyce najczęściej występuje tylko jedna z nich, gdy zyski ciepła są większe od zera przy temperaturze powietrza zewnętrznego poniżej temperatury zadanej w pomieszczeniu. Wtedy układ wentylacji musi zdecydować, czy uruchomić chłodnicę, czy zwiększyć strumień powietrza zewnętrznego. Ewentualnie jak dobrać proporcje pracy, bo przecież układ może jednocześnie uruchomić chłodnicę i zwiększyć strumień powietrza.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że stworzenie optymalnego układu sterowania jest dość trudne. Wynika to z faktu doboru odpowiednich współczynników dla szerokiego zakresu warunków pracy urządzeń wentylacyjnych, grzewczych i chłodniczych.

Dla analizowanego przypadku, układ poddawał się optymalizacji przy średnim obciążeniu chłodnicy na poziomie 10%. Tymczasem materiały branżowe najczęściej zawierają pełną informację o produkcie tylko przy nominalnych parametrach pracy. Ze względu na praktyczne trudności dotyczące sterowania optymalnego, zaproponowano algorytmy sterowania bez optymalizacji i z optymalizacją, które pracują „optymalnie” przynajmniej w pewnych określonych warunkach. Algorytm „bez optymalizacji BO” realizuje większość zaleceń zawartych w Tabeli Sterowania. Uwzględniła regulację strumienia powietrza w zależności od obciążeń cieplnych w pomieszczeniu. W najgorszym przypadku, algorytm BO wykazywał zapotrzebowanie na moc elektryczną o 26% większe od algorytmu sterującego w sposób optymalny. Algorytm „z okresową optymalizacją ZOO” poprawia działanie algorytmu BO, dając możliwość ochładzania pomieszczenia powietrzem zewnętrznym. W pewnym zakresie temperatury powietrza zewnętrznego jest to sterowanie optymalne. W najgorszym przypadku ZOO wykazywał zapotrzebowanie na moc elektryczną o 4% większe od algorytmu sterującego w sposób optymalny. Jednak algorytm ZOO wymaga właściwego doboru swojego kluczowego parametru czyli strumienia V_{Smax} (maksy-

malny strumień chłodzący pomieszczenie bez udziału chłodnicy). Błędne określenie tego strumienia spowoduje, że zużycie energii może być większe niż w przypadku algorytmu BO.

LITERATURA

- [1] Załącznik nr 3 do regulaminu – wzór wniosku w ramach przedsięwzięcia wentylacja dla szkół i domów - działanie 1: Wentylacja sal lekcyjnych. Dokumentacja konkursowa, nr postępowania 94/21/PU/P37, Czerwiec 2021.
- [2] Łukasz Donocik, Julita Grabowska, Edward Przydrożny. Chłodzenie naturalne w całorocznym przygotowaniu czynnika ziębniczego. Chłodnictwo & Klimatyzacja. 2007, R. 12, nr 10, s. 36-40.
- [3] Łukasz Donocik, Maria K. Kostka. Wykorzystanie powietrza zewnętrznego do odprowadzenia ciepła z pomieszczeń wentylowanych. Ogrzewanie i wentylacja w przemyśle i rolnictwie : praca zbiorowa. Vol. 2 / pod red. Kazimierza Żarskiego. Tuchola : Wydawnictwo Wyższej Szkoły Zarządzania Środowiskiem, 2008. s. 26-33.
- [4] Gang Wang and Li Song. Air handling unit supply air temperature optimal control during economizer cycles. Energy and Buildings, 49:310 – 316, 2012. ISSN 0378-7788. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.024>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812001016>.
- [5] YP Ke and SA Mumma. Optimized supply-air temperature (SAT) in variable-air-volume (VAV) systems. ENERGY, 22(6):601–614, JUN 1997. ISSN 0360-5442. doi:10.1016/S0360-5442(96)00154-5.
- [6] Fredrik Engdahl and Dennis Johansson. Optimal supply air temperature with respect to energy use in a variable air volume system. Energy and Buildings, 36(3):205 – 218, 2004. ISSN 0378-7788. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.007>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778803000963>.
- [7] Yu-Pei Ke and Stanley A. Mumma. Variable air volume ventilation control strategies analysed in six climate zones. International Journal of Energy Research, 23(5):371–387, 1999. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(199904)23:5<371::AID-ER484>3.0.CO;2-9. URL [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199904\)23:5<371::AID-ER484>3.0.CO;2-9](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199904)23:5<371::AID-ER484>3.0.CO;2-9).
- [8] Godwine Swere Okochi and Ye Yao. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (vav) air-conditioning systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59:784 – 817, 2016. ISSN 1364-0321. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.328>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115017116>.
- [9] John Murphy. High-performance vav systems. ASHARE Journal, October 2011:18 29, 2011.
- [10] Mingsheng Liu, David E. Claridge, and W. Dan Turner. Continuous commissioning guidebook for federal energy managers. Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy, October, 2002.
- [11] Energy Design Resources. The advanced variable air volume (vav) system design guide. Technical report, Pacific Gas and Electric Company, Grudzień 2009.
- [12] Dariusz Kwiecień. Moc chłodnicy a zapotrzebowanie energii do oziębiania powietrza w różnych rejonach Polski. Instal 2016, nr 10, s. 28-33.