

Grzegorz KLEKOT<sup>1</sup>

## SYSTEM ZAPEWNIENIA KOMFORTU W POMIESZCZENIACH IZOLOWANYCH AKUSTYCZNIE

**Streszczenie.** Obecne ogromne możliwości sprzętu do rejestracji i przetwarzania dźwięków wygenerowały zapotrzebowanie na izolowane akustycznie pomieszczenia, w których możliwa jest poufna wymiana informacji. Potrzeba eliminacji propagacji sygnałów wibroakustycznych drogą powietrzną i przez strukturę stawia postulat pełnej izolacji takiego pomieszczenia, co z kolei stwarza konieczność zapewnienia właściwego składu chemicznego powietrza oraz stabilizacji temperatury. Artykuł zawiera rozważania dotyczące realizacji zadania zapewnienia komfortu termicznego oraz właściwej jakości powietrza w autonomicznym pomieszczeniu do prowadzenia rozmów poufnych. Przedstawiono prototypowe rozwiązania instalacji stabilizujących warunki przebywania ludzi w modułowej kabinie izolowanej akustycznie.

**Słowa kluczowe:** ergonomia, komfort akustyczny, komfort klimatyczny

## COMFORT PROVIDING SYSTEMS IN SPACES WITH ACOUSTIC INSULATION

**Summary.** High capacities of currently available devices for sound registering and processing have generated a need for sound insulated spaces dedicated to exchange of confidential information. In such spaces, preventing propagation of vibroacoustic signals both by the way of air and construction elements entails complete insulation of the room. In order to meet this requirement, proper chemical composition of air and stabilized temperature conditions have to be guaranteed. The paper discusses questions related to the process of solving the task of providing thermal comfort and satisfying air quality in a room for confidential discussions. It presents prototype solutions of installations dedicated to stabilize human-friendly conditions inside a modular chamber provided with acoustic insulation.

**Keywords:** ergonomics, acoustic comfort, climatic comfort

### 1. WPROWADZENIE

Struktury dźwiękoizolacyjne w budowie maszyn stosuje się głównie w celu ograniczania negatywnego oddziaływania hałasu na człowieka i środowisko. Proces projektowania izolacji akustycznych opiera się zazwyczaj na ustaleniu głównych źródeł oraz określeniu

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Warszawa, e-mail: gkl@simr.pw.edu.pl

podstawowych dróg propagacji energii wibroakustycznej [2] z uwzględnieniem rozchodzenia się w postaci drgań ośrodka sprężystego (powietrze) oraz drgań strukturalnych.

Podobne kwestie wymagają uwagi podczas projektowania pomieszczeń o szczególnych walorach akustycznych: studiów nagrań, sal koncertowych, kinowych, audytoryjnych, pokojów do badania słuchu i zrozumiałości mowy. Wnioski wynikające z analiz prowadzonych na potrzeby konstruowania maszyn cichobieżnych [1] znajdują bezpośrednie zastosowanie również w rozważaniach dotyczących zapewnienia bezpieczeństwa rozmów poufnych (przede wszystkim dla wyeliminowania ewentualnego podsłuchu). Zabezpieczenie akustyczne pomieszczeń przeznaczonych do rozmów o charakterze niejawnym jest tematem bardzo szerokim i nieopisanym wprost w literaturze naukowo-technicznej. Obejmuje on nie tylko zjawiska powiązane z izolacyjnością akustyczną pomieszczeń od dźwięków powietrznych i uderzeniowych (problematyka akustyki budowlanej), lecz także zagadnienie zrozumiałości mowy przenikającej na zewnątrz pomieszczenia oraz propagację dźwięku poprzez konstrukcję obiektu (w formie drgań strukturalnych). Tego rodzaju rozmowy winny być prowadzone w pomieszczeniach „akustycznie bezpiecznych” i komfortowych zarazem.

„Bezpieczeństwo akustyczne” oznacza pełną izolację od otoczenia, co z kolei wymusza działania gwarantujące utrzymanie warunków środowiskowych optymalnych dla przebywania ludzi wewnątrz pomieszczeń przeznaczonych do rozmów poufnych. Zapewnienie dobrego klimatu wymaga stabilizacji temperatury i składu chemicznego powietrza w pomieszczeniu, gdzie przebywają rozmówcy.

## 2. STABILIZACJA WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH

Potrzeba analizy niestandardowych rozwiązań służących stabilizacji temperatury, wilgotności względnej i składu chemicznego powietrza dotyczy wszelkiego rodzaju izolowanych (w szczególności hermetycznych) pomieszczeń o ograniczonej kubaturze przeznaczonych do przebywania ludzi. Człowiek podczas oddychania zużywa tlen i wytwarza dwutlenek węgla, wydychane powietrze jest ciepłe i wilgotne.

Ustalono, że przeciętny człowiek niewykonujący pracy fizycznej zużywa w ciągu godziny około 30 dm<sup>3</sup> tlenu i wytwarza około 24 dm<sup>3</sup> dwutlenku węgla; jest zarazem źródłem ciepła o mocy około 100 W [3]. Minimalna dla podtrzymania procesów życiowych zawartość tlenu w powietrzu wynosi 17%, a maksymalna dopuszczalna frakcja dwutlenku węgla to 1,5%. Wartości te przyjęto jako brzegowe podczas ustalania wymagań stawianych systemowi zapewnienia komfortu w projektowanej kabinie o gabarytowych wymiarach 2 x 2 x 3 metry (kubatura około 12 m<sup>3</sup>), poglądowo przedstawionej na rysunku 1.

Na potrzeby oszacowania założono brak wymiany powietrza i cztery osoby przebywające wewnątrz kabiny. Spadek poziomu tlenu do dopuszczalnego minimum oznacza zużycie 4% kubatury komory (480 dm<sup>3</sup>) – co by nastąpiło po około 4 godzinach. Znacznie szybciej nastąpi przekroczenie dopuszczalnej zawartości dwutlenku węgla: 1,5% oznacza 180 dm<sup>3</sup>, co odpowiada niepełnym 2 godzinom oddychania czterech osób.

Sprawdźmy jeszcze, po jakim czasie pobyt czterech osób wewnątrz izolowanej kabiny o założonej kubaturze podniesie temperaturę powietrza o około 5°C. Uproszczona zależność wiążąca wzrost temperatury z dostarczaną energią cieplną ma postać:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – dostarczone ciepło [J],

$m$  – masa [kg],

$c$  – ciepło właściwe [J/kg·°C] (dla powietrza wynosi 1000 [J/kg·°C],

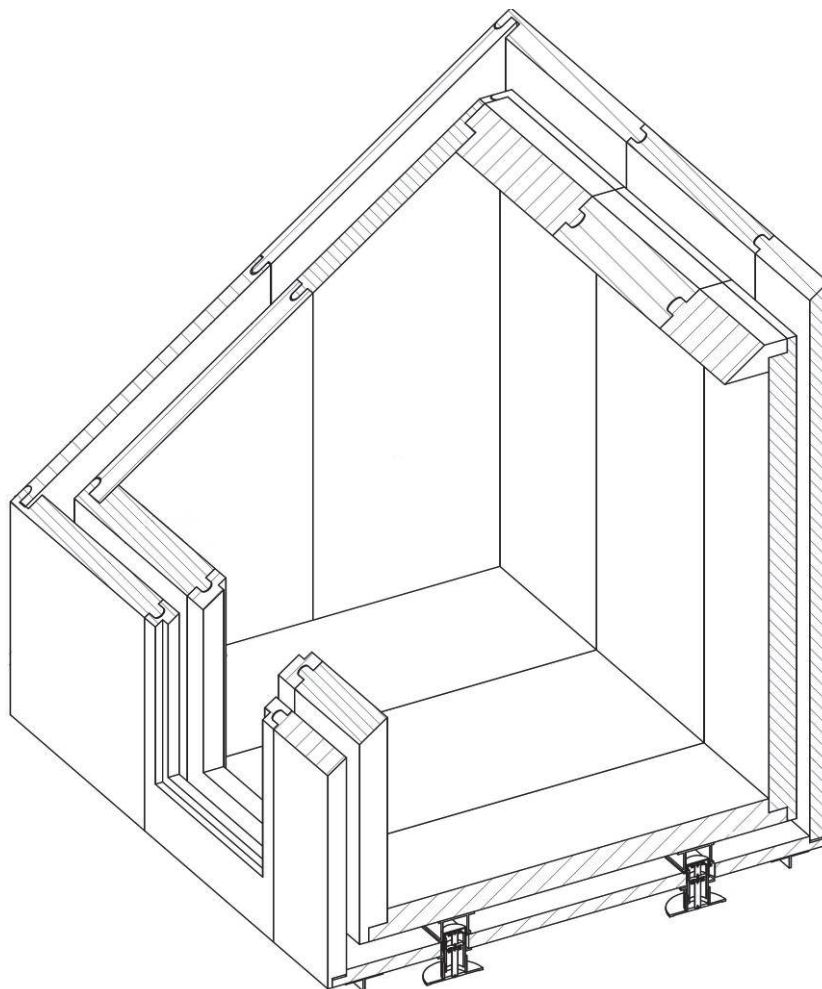
$\Delta T$  – przyrost temperatury [°C].

12 [m<sup>3</sup>] powietrza w warunkach normalnych (gęstość 1,23 [kg/m<sup>3</sup>]) ma masę 14,76 [kg]. Ponieważ dostarczona energia cieplna  $Q$  [J] jest iloczynem mocy  $P$  [W] i czasu  $t$  [s]:

$$Q = P \times t, \quad (2)$$

wzrost temperatury o  $\Delta T$  [°C] nastąpi po czasie  $t$  [s] zgodnie z zależnością (3):

$$t = \frac{m \times c \times \Delta T}{P} \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat kabiny izolowanej akustycznie

Fig. 1. The scheme of the cabin with acoustic insulation

Dla przyjętych założeń w analizowanym pomieszczeniu wzrost temperatury powietrza o 5 [°C] w wyniku przebywania czterech osób można przewidywać po 3 minutach (dokładnie po 184,5 sekundach) od zaprzestania odprowadzania ciepła.

Zaprezentowane oszacowania uzasadniają dobitnie konieczność zastosowania urządzeń stabilizujących temperaturę i skład chemiczny powietrza w izolowanych akustycznie autonomicznych pomieszczeniach przeznaczonych do prowadzenia rozmów poufnych. Odbiegające od optymalnych warunki środowiskowe wewnątrz w praktyce zdyskwalifikują wykorzystanie pomieszczenia zgodnie z przeznaczeniem – czyli spowodują nieprzydatność kabiny do zamierzonego zastosowania.

### 3. ELEMENTY SYSTEMU ZAPEWNIENIA KOMFORTU

System zapewnienia komfortu winien z zapasem zapewnić zachowanie pełnych walorów użytkowych pomieszczenia. W tym celu we wstępnej fazie projektowania ustalono rygorystyczne warunki brzegowe: założono całkowity brak wymiany powietrza z otoczeniem zewnętrznym, pełną izolację termiczną i maksymalnie sześć osób wewnątrz pomieszczenia. Nieskomplikowane oszacowania prowadzą do określenia wydajności instalacji: uzupełnianie do 180 dm<sup>3</sup> tlenu na godzinę, absorpcja około 144 dm<sup>3</sup> dwutlenku na godzinę; stabilizacja temperatury wewnątrz wymaga odprowadzania ciepła instalacją o mocy rzędu 1 [kW].

#### 3.1. Zasilanie tlenem

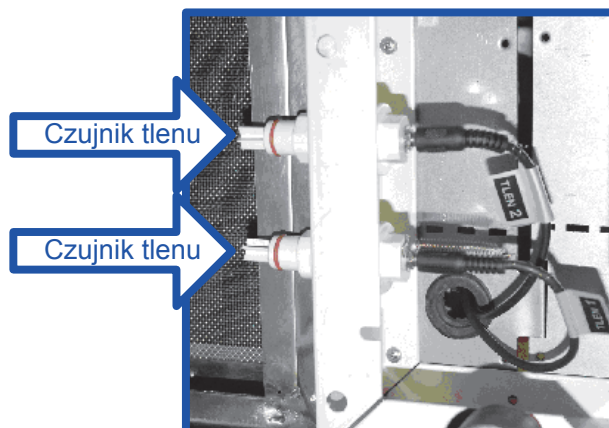
Powietrze, którym oddychamy, zawiera 20,9% tlenu, a akceptowalna przez człowieka frakcja to przedział 17-24%; nadmiar tlenu jest nie mniej ryzykowny niż jego niedobór.

Do uzupełniania tlenu wewnątrz pomieszczenia wykorzystano butle o pojemności 5 dm<sup>3</sup> ze sprężonym tlenem medycznym wyposażone w zawór redukcyjny. Właściwy skład mieszanki powietrznej w pomieszczeniu zapewnia programowalny modułowy kontroler (rys. 2), do którego przewodem ciśnieniowym doprowadzono tlen z butli. Sterowanie elektrozaworem blokującym wypływ gazu opiera się na bieżących wynikach pomiarów stężenia tlenu w powietrzu – służą do tego dwa niezależne czujniki elektrochemiczne zlokalizowane przy wlocie do modułu chłodzącego powietrze (rys. 3). Otwarcie elektrozaworu kontrolera następuje po spadku stężenia tlenu poniżej zadanej wartości (na przykład poniżej 20%) na określony (zaprogramowany) czas. Procedura dostarczania tlenu jest powtarzana, jeśli po zamknięciu zaworu stężenie pozostaje nadal niższe od ustalonego.

Modułowy kontroler stężenia tlenu sygnalizuje również przekroczenia zadanych wartości granicznych (dolnej i górnej, ustalanych dla obu czujników). Alarm dźwiękowy jest uruchamiany wskutek wykazania przekroczeń przez oba czujniki; zarejestrowanie przekroczenia tylko jednym czujnikiem skutkuje miganiem odpowiedniego wyświetlacza.



Rys. 2. Modułowy kontroler stężenia tlenu  
Fig. 2. The modular oxygen controller



Rys. 3. Elektrochemiczne czujniki tlenu  
Fig. 3. Electrochemical oxygen sensors

### 3.2. Stabilizacja temperatury

Utrzymanie optymalnej temperatury wewnątrz pomieszczenia zapewnia odprowadzanie ciepła układem złożonym z wewnętrznego wymiennika chłodzącego powietrze oraz zewnętrznej sprężarkowej jednostki chłodzącej. Oba zespoły (zewnętrzny i wewnętrzny) są sterowane niezależnie.

Zewnętrzna jednostka chłodząca odpowiada za ustaloną (zaprogramowaną) temperaturę glikolu dostarczanego do termokonwektora wewnętrznego. Glikol jako czynnik chłodzący wybrano, mając na uwadze między innymi możliwość odsunięcia mobilnego zewnętrznego modułu sprężarkowego od ściany pomieszczenia do rozmów niejawnych oraz łatwość montażu i demontażu elementów obwodu chłodzenia.

Termokonwektor wewnętrzny utrzymuje temperaturę powietrza i współpracuje z zespołem zapewniającym właściwy skład powietrza w pomieszczeniu. Wewnętrzny regulator temperatury (rys. 4) przełącza zawór sterujący przepływem schłodzonego glikolu przez wymiennik ciepła stosownie do temperatury wewnątrz pomieszczenia oraz reguluje wydatek wentylatora powietrza. Termoregulator umieszczono w bloku wewnętrznego wymiennika ciepła obok wylotu powietrza; takie umiejscowienie regulatora okazało się optymalne dla zapewnienia właściwej reakcji na zmiany termiczne.

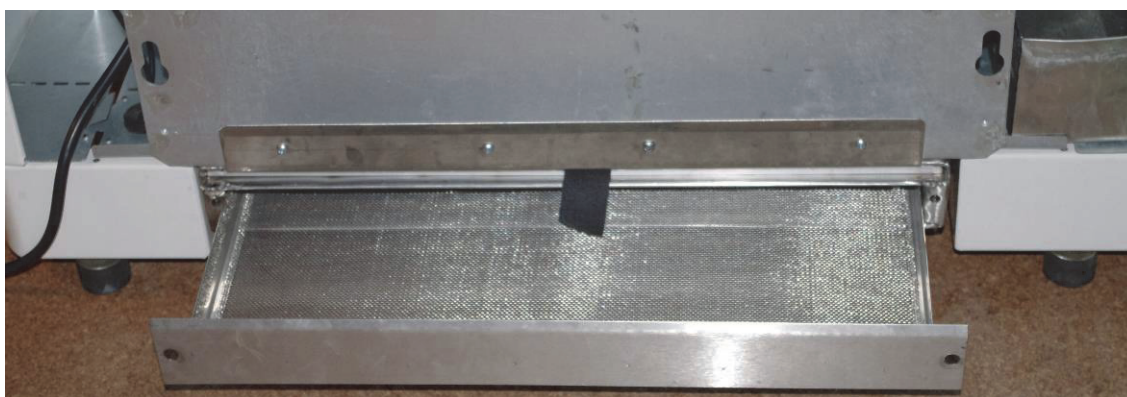


Rys. 4. Wewnętrzny regulator temperatury powietrza  
Fig. 4. The internal air temperature controller

### 3.3. Pochłanianie dwutlenku węgla

Problem usunięcia nadmiaru dwutlenku węgla z powietrza wewnątrz pomieszczenia rozwiązano przy użyciu pochłaniaczy stosowanych do prac podwodnych i w technice wojskowej [4]. Takie absorbery bazują na reakcji dwutlenku węgla z wodorotlenkiem wapnia, w wyniku której powstaje węglan wapnia i woda; katalizatorem tej reakcji jest wodorotlenek sodu.

Początkowo do badań nad prototypem kabiny wykorzystano autonomiczne przenośne pochłaniacze przeznaczone do szybkiego usuwania dwutlenku węgla z zamkniętych pomieszczeń, dostępne pod nazwą handlową CASPA. Finalnie opracowano rozwiązanie wykorzystujące wewnętrzny wymiennik ciepła: wymuszono przepływ powietrza chłodzonego w wymienniku przez pojemnik wypełniony granulami substancji wiążącej dwutlenek węgla. Pojemnik na granulki zabudowano pod wlotem powietrza w podstawie wymiennika (rys. 5), bezpośrednio nad elektrochemicznymi czujnikami tlenu.



Rys. 5. Pojemnik absorbera dwutlenku węgla  
Fig. 5. The container of carbon dioxide absorber

## 4. WSPÓLDZIAŁANIE MODUŁÓW

Przedstawione rozwiązanie opracowano podczas prac nad rozkładaną kabiną do prowadzenia rozmów niejawnych, która może być wykorzystana w warunkach plenerowych oraz wewnątrz budynków. Między innymi przewidziano możliwość zastosowania kabiny do zapewnienia rozmówcom pełnej poufności wewnątrz pomieszczeń zabytkowych, gdy niedopuszczalna jest jakakolwiek bezpośrednia ingerencja w konstrukcję budynku.

Przewidziane zastosowania sprawiają, iż całość zaprojektowano przy uwzględnieniu nieskomplikowanego montażu w miejscu zamierzonego użycia oraz z założeniem łatwego przemieszczania wszystkich elementów i zespołów. Istotnie ograniczono masy i gabaryty poszczególnych elementów konstrukcyjnych, zastosowano wiele łączników różnego rodzaju.

Ograniczenia dotyczą również modułów odpowiedzialnych za komfort klimatyczny wewnątrz kabiny. Największymi gabarytami charakteryzuje się sprężarkowy ochładzacz glikolu, który wyposażono w koła oraz uchwyty do przenoszenia. Łatwy montaż elastycznych przewodów hydraulicznych układu chłodzenia (łączyjących termokonwektor wewnętrzny z jednostką zewnętrzną przez stalowe łączniki zainstalowane w ścianach kabiny) zapewniono dzięki zastosowaniu szczelnych łączników gwintowych wielokrotnego użytku oraz zaworów kulowych. Z kolei szybkozłącza wykorzystano w obwodzie zasilania tlenem.

Na rysunku 6 pokazano połączone moduły działającego systemu zapewnienia komfortu.





Rys. 6. Główne moduły systemu zapewnienia komfortu  
Fig. 6. Main modules of the comfort providing system

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony system zapewnienia komfortu ma charakter prototypowy – podobnie jak większość pozostałych rozwiązań technicznych kabiny do rozmów poufnych. Powstał dzięki integracji praktycznych doświadczeń między innymi w zakresie budowy i eksploatacji maszyn, pomiarów, sterowania, chłodnictwa, prac podwodnych. Wnioski z zaprezentowanych rozważań, poparte syntetycznym opisem głównych zespołów, mogą stanowić istotną pomoc w rozwiązywaniu zadań inżynierskich podobnej klasy.

## Bibliografia

1. Dąbrowski Z., Radkowski S., Dziurdź J., Dybała J., Mączak J., Tomaszek S.: Kształtowanie właściwości wibroakustycznych elementów i zespołów maszyn (uwagi metodyczne). Warszawa 2000.
2. Klekot G.: Zastosowanie miar propagacji energii wibroakustycznej do monitorowania stanu obiektów oraz jako narzędzie w zarządzaniu hałasem. ITE PIB, Warszawa – Radom 2012.
3. Krause M.: Ergonomia – praktyczna wiedza o pracującym człowieku i jego środowisku. Śląska Organizacja Techniczna, Katowice 1992.
4. Witryna internetowa: [http:// www.molecularproducts.com/co2-absorption](http://www.molecularproducts.com/co2-absorption)