

Paweł Ząbek

Student WSZOP studiów II stopnia na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

Zygmunt Dziechciowski

Politechnika Krakowska, Zakład Napędów Hydraulicznych i Transportu Bliskiego,
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Wykorzystanie symulacji komputerowych w procesie obniżenia poziomu hałasu w halach przemysłowych

The use of computer simulation of process of noise
reduction in the industrial hall

Streszczenie

Problem nadmiernego hałasu w halach przemysłowych jest zjawiskiem powszechnym. Prawo nakłada na właścicieli firm obowiązek podejmowania działań zmierzających w jego ograniczaniu. Głównym celem pracy jest przedstawienie możliwości ograniczenia hałasu w hali produkcyjnej, w której znajdują się urządzenia do produkcji drutu miedzianego. Wykonane symulacje przeprowadzono w programie Strefa 2002, który umożliwia określenie rozkładu hałasu w pomieszczeniu.

Słowa kluczowe: *hałas przemysłowy, symulacje komputerowe, redukcja hałasu*

Abstract

The problem of excessive noise in industrial halls is a common phenomenon. The law impose an obligation on the companies owners into taking activity to limited it. The main purpose of the work is taking the action in terms of limited the noise on the factory hall where there are the machines for the production of copper wire. The series of the simulations was carried out in the program Strefa 2002 which is used to predict the noise distribution in the room.

Keywords: *industrial noise, computer simulations, noise reduction*

1. Wstęp

Wraz z rozwojem przemysłu i komunikacji obserwuje się ustawiczne zwiększanie emisji i zasięgu hałasów komunikacyjnych i przemysłowych. Większość środków transportu i produkcji maszyn, urządzeń i instalacji emituje hałas o poziomach znacznie przekraczających dopuszczalne podane w przepisach. Obniżenie stopnia zagrożenia hałasem wiąże się z kształtowaniem odpowiedniego klimatu akustycznego w środowisku zewnętrznym i w środowisku pracy. Przez klimat akustyczny rozumie się zespół zjawisk akustycznych zachodzących w danym środowisku, wywołanych źródłami energii wibroakustycznej zachodzących w danym środowisku lub poza nim. Poprawa klimatu akustycznego, tak dla przypadku hałasu środowiskowego, jak i wewnętrznego, wymaga przeprowadzenia analiz, które pozwolą na zastosowanie najbardziej odpowiedniego rozwiązania, tak technicznego jak i organizacyjnego. W publikacjach [1] i [2] przedstawiono wyniki prac, których celem było opracowanie koncepcji poprawy klimatu akustycznego w hali przemysłowej, dla przypadku maszyn poligraficznych o dużej aktywności akustycznej. W niniejszej pracy zajęto się podobną problematyką w stosunku do poprawy klimatu akustycznego w hali maszyn do produkcji drutu. W analizowanej hali przeprowadzono pomiary akustyczne celem identyfikacji źródeł hałasu tam występujących, a następnie przeprowadzono wyniki szeregu symulacji, których celem było opracowanie koncepcji poprawy warunków pracy w aspekcie akustycznym.

2. Stan zagadnienia

Skala problemu, jakim są ponadnormatywne wartości poziomu natężenia dźwięku w miejscu pracy jest bardzo duża. Według Głównego Urzędu Statystycznego w 2012 roku spośród czynników związanych ze środowiskiem pracy największe zagrożenie stanowił hałas, którym zagrożonych było 199,5 tys. osób, co stanowiło prawie 40% ogólnej liczby pracowników zatrudnionych w warunkach zagrożenia czynnikami szkodliwymi środowiska pracy [3], natomiast obustronny trwały odbiorczy ubytek słuchu typu ślimakowego lub czuciowo-nerwowego stanowił 24% stwierdzonych chorób zawodowych w 2011 roku [4]. Pozasłuchowe skutki działania hałasu nie są jeszcze w pełni rozpoznane. Doświadczalnie wykazano, że wyraźne zaburzenia funkcji fizjologicznych organizmu mogą występować po przekroczeniu poziomu ciśnienia akustycznego wynoszącego 75 dB. Utrudnione porozumiewanie się ustne w hałasie i maskowanie sygnałów ostrzegawczych nie tylko zwiększa uciążliwość warunków pracy i zmniejsza jej wydajność, lecz może być również przyczyną wypadku przy pracy. Dyrektywa [5] dotycząca ochrony przed hałasem z dnia 6 lutego 2003 r. wprowadzona przez Parlament Europejski zobowiązuje pracodawców w pierwszej kolejności do stosowania odpowiednich środków technicznych (np. obudów czyekranów) i organizacyjnych (np. skrócenie czas pracy w strefach podwyższonego poziomu dźwięku),

a po ich wyczerpaniu, gdy w dalszym ciągu stwierdza się przekroczenie dopuszczalnych wielkości hałasu, ma obowiązek zaopatrzenia pracowników w odpowiednio dobrane indywidualne ochronniki słuchu. Ta sama Dyrektywa wprowadza:

- dolną wartość ekspozycji; wszędzie tam, gdzie pracownicy narażeni są na hałas na poziomie 80 dB (A) lub wyższym, pracodawca ma obowiązek zapewnić im, na ich życzenie, dostęp do odpowiednich środków ochrony słuchu, lecz nie musi egzekwować ich stosowania,
- górną wartość ekspozycji; wszędzie tam, gdzie pracownicy narażeni są na hałas na poziomie 85 dB (A) lub wyższym, pracodawca ma obowiązek wyposażyć ich w odpowiednie środki ochrony słuchu oraz bezwzględnie egzekwować ich stosowanie,
- wartość graniczną ekspozycji; w nowej dyrektywie została ona ustalona na poziomie 87 dB (A); graniczna wartość ekspozycji określa poziom hałasu, jaki jest odczuwany przez pracownika podczas stosowania środków ochrony indywidualnej; jest to górna granica, która nie może być przekroczona.

Wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) hałasu ze względu na ochronę słuchu zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 29 listopada 2002 r. [6] w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku. Wartości te zamieszczono w tabeli 1.

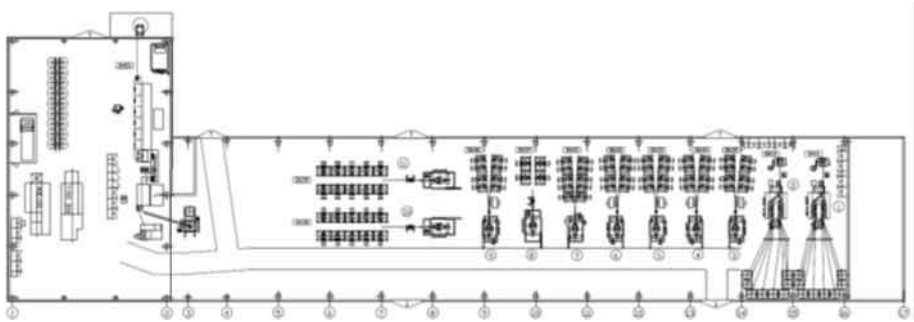
Tabela 1. Dopuszczalne wartości hałasu w miejscu pracy [6]

Table 1. Noise limit values in the workplace [6]

Wielkość charakteryzująca hałas	Wartość dopuszczalna
Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy w [dB]	85
Maksymalny poziom dźwięku A [dB]	115
Szczytowy poziom dźwięku C [dB]	135

3. Obiekt badań

Pomiary przeprowadzono w jednej z hal produkcyjnych zakładu specjalizującego się w produkcji kabli. Rzut budynku pokazano na rys. 1. Zaznaczono na nim rozkład poszczególnych maszyn. Analizowana hala została zaznaczona pogrubioną linią.



Rys. 1. Schemat budynku
Fig. 1. Building scheme

Analizowana hala ma wymiary $30 \times 18,5 \times 7,5$ m. Ściany boczne oraz dach hali zbudowane są z płyt wielowarstwowych, których zewnętrzną częścią jest blacha stalowa, przytwierdzona do stalowej konstrukcji. Podłogi wyłożone są płytami stalowymi oraz płytami z żelbetonu. Oszklona część ścian zajmuje powierzchnię 170 m^2 . Wszystkie te elementy mogą mieć negatywny wpływ na akustykę hali, ponieważ blacha stalowa, płyty betonowe oraz szkło w wysokim stopniu odbijają fale dźwiękowe, tym samym wpływając na podwyższenie poziomu hałasu w hali. Należy zauważyć, że budynek powstał w czasach, kiedy nie przykładano dużej wagi do takich aspektów jak chłonność akustyczna pomieszczenia czy poziom mocy akustycznej maszyn. W hali znajdują się drzwi o wymiarach $3,6 \times 4$ m, oraz dwie suwnice.

W hali znajdują się trzy maszyny przeznaczone do ciągnięcia drutów miedzianych:

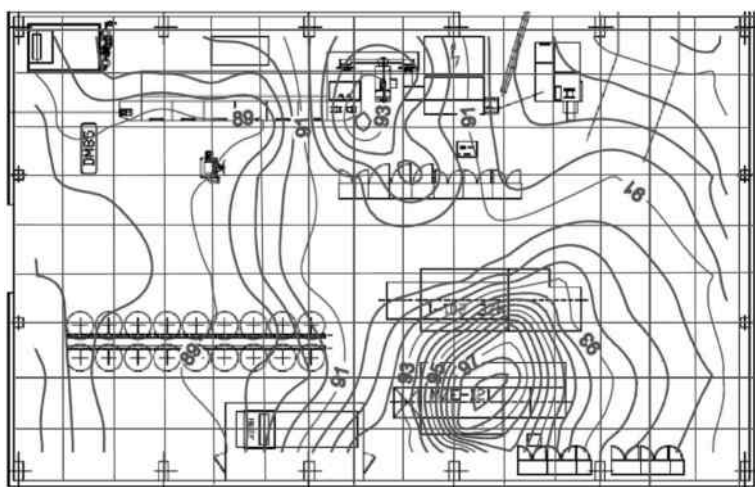
- wielociąg drutu MZE – 121,
- wielociąg MZE – 201-1,
- grubociąg drutu DM-85.

Wielociąg drutu zlokalizowane na hali są największym źródłem hałasu w pomieszczeniu. Najbardziej hałasującym elementem wielociągów są dysze powietrzne, które zdmuchują sprężonym powietrzem wilgoć i opiłki miedzi z pasemek miedzianych (kilka cienkich drutów miedzianych).

4. Pomiary hałasu

Pomiary wykonywano w dniu 4.01.2013 r. Do badań posłużono się całkującym miernikiem poziomu dźwięku klasy pierwszej SON-50 firmy Sonopan. Kalibrację miernika wykonywano kalibratorem akustycznym firmy Sonopan KA-50. W trakcie wykonywania pomiarów temperatura powietrza w hali wynosiła około 14°C , ciśnienie miało wartość około 1000 hPa , a wilgotność względna powietrza wynosiła 65% . Ze względu na przerwy w produkcji nie było możliwości włączenia wszystkich maszyn, jakie znajdowały się na hali.

Pierwszym krokiem wykonywania pomiarów było określenie siatki, w jakiej mają być wykonywane pomiary. Pomiary hałasu wykonywano w siatce pomiarowej 4×4 metry. Dodatkowe pomiary dokonywano w pobliżu źródeł hałasu. Siatkę punktów pomiarowych zagęszczano do wymiaru 2×2 metry. Przy ścianach pomiary zostały wykonywane metr od niej (konieczność pominięcia wpływu dźwięków odbitych). W trakcie pomiarów mierzono równoważny poziom dźwięku korygowany charakterystyką A. Czas jednego pomiaru wynosił 15 sekund, i w niektórych punktach był wydłużany do czasu ustabilizowania się wartości poziomu dźwięku. Sonometr znajdował się na wysokości 1,5 metra od podłogi. Stała uśredniania sonometru ustawiona była na FAST. Filtry korekcyjne ustawiono na charakterystykę A. Zakres pomiarowy został dopasowany do wartości mierzonego w danym miejscu poziomu dźwięku. Dodatkowo przed rozpoczęciem pomiarów, w trakcie ich wykonywania, co kilkanaście pomiarów oraz po ich zakończeniu dokonywano kalibracji sonometru. Wyniki pomiarów wpisywano na wydrukowany w dużej skali schemat hali z naniesioną na nim siatką pomiarową. Mapę hałasu wykonaną na podstawie pomiarów wygenerowano w programie Surfer. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów w postaci mapy hałasu, siatka co 2 metry.



Rys. 2. Mapa rozkładu hałasu równoważnego poziomu dźwięku w analizowanej hali
Fig. 2. Equivalent noise level distribution in the analyzing hall

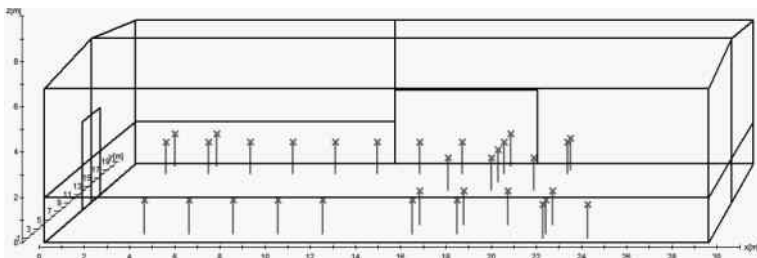
Otrzymane wyniki pomiarów wykazały, że pracownicy w rozpatrywanej hali narażeni są na nadmierny hałas. Wyraźnie widać, że najgłośniejszą strefą w badanej hali jest obszar wielociągu drutu MZE – 121, gdzie wartość poziomu dźwięku A wynosi około 98 dB. Miejscami o najmniejszym poziomie dźwięku A jest lewy dolny oraz prawy górny róg hali. Najmniejszy poziom dźwięku w tych miejscach jest spowodowany dużą odległością od źródeł hałasu.

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na określenie mocy akustycznych głównych źródeł hałasu. Wykorzystano przy tym techniczną metodę określania tego parametru opisaną m.in. w [7].

5. Symulacje rozchodzenia się hałasu w rozpatrywanej hali

Mapa hałasu otrzymana na podstawie pomiarów była pozycją wyjściową do parametryzacji modelu służącego do symulacji rozchodzenia się dźwięku w hali. W dalszej części symulacje posłużyły do szacowania skuteczności proponowanych technicznych metod ochrony przed hałasem. Obliczenia numeryczne wykonywano w programie Strefa 2002, który powstał w Zakładzie Zagrożeń Akustycznych i Elektromagnetycznych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy.

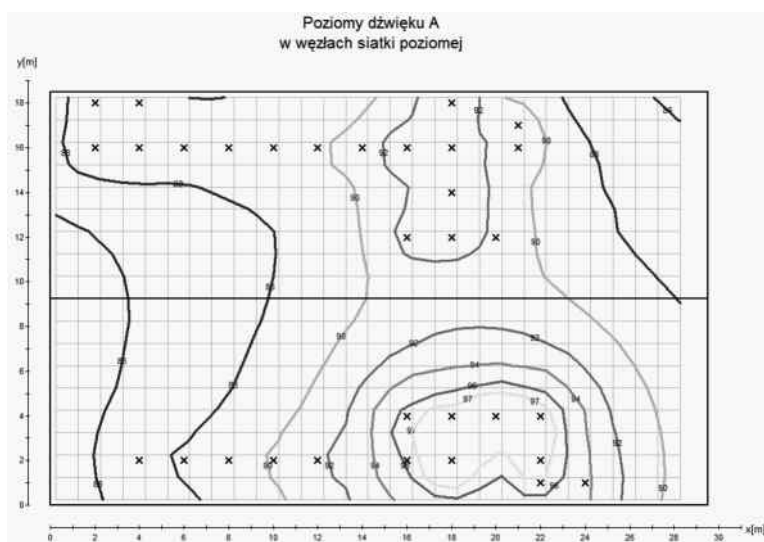
Pierwszym krokiem w wykonaniu symulacji było wykonanie w programie modelu hali. Model budynku tworzy się w układzie kartezjańskim, wprowadzając współrzędne krawędzi ścian (x, y, z). Program daje możliwość wprowadzenia różnych współczynników pochłaniania dźwięku dla różnych części ścian, ponieważ materiały, z których wykonane są ściany mogą mieć różne współczynniki pochłaniania dźwięku. Współczynniki pochłaniania dźwięku określono na podstawie danych literaturowych [7]. Kolejnym krokiem było wprowadzenie do programu położenia oraz wartości mocy akustycznych źródeł hałasu. Maszyny, ze względu na duże rozmiary oraz wiele elementów generujących hałas, zostały podzielone na 32 źródła hałasu o różnych mocach akustycznych. Na rysunku 3 pokazano model hali wraz z wprowadzonymi źródłami hałasu.



Rys. 3. Model hali wraz z rozmieszczeniem źródeł hałasu
Fig. 3. The model of hall with the noise sources distribution

Wprowadzone dane umożliwiły przeprowadzenie obliczeń numerycznych dla różnych wariantów: symulacje dla stanu bez zabezpieczeń (stan istniejący) oraz symulacje dla proponowanych zabezpieczeń akustycznych.

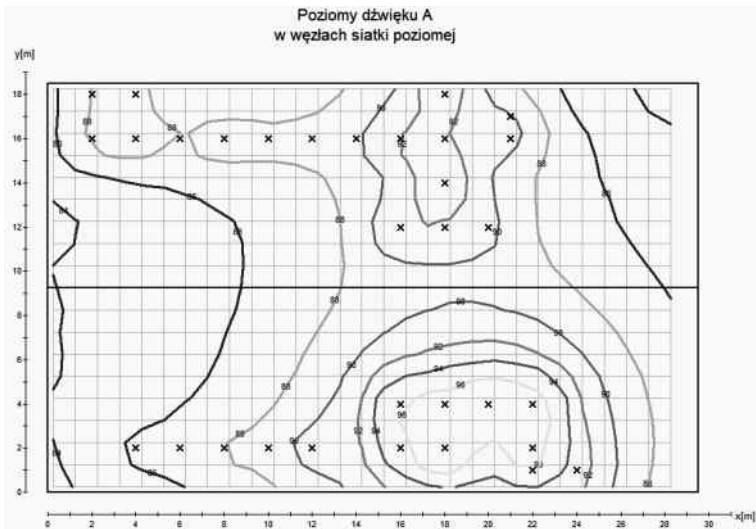
Na rysunku 4 przedstawiono wynik symulacji komputerowych dla stanu istniejącego. Różnice rozkładu wartości poziomu hałasu otrzymane w drodze pomiaru i obliczeń numerycznych wykazują zgodność na poziomie 1 – 2 dB.



Rys. 4. Mapa balasu dla stanu istniejącego – wynik symulacji numerycznych

Fig. 4. The map of noise level distribution for the existing state – result of numerical simulation

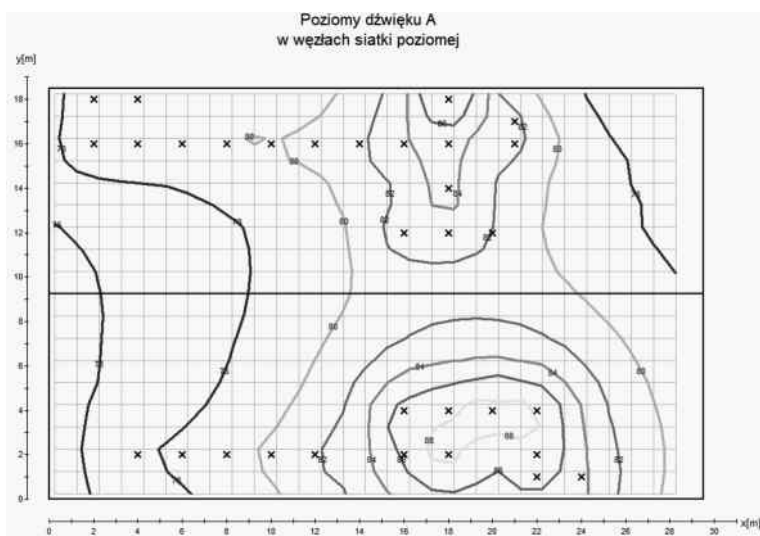
Pierwszym wariantem obliczeniowym było zwiększenie chłonności akustycznej hali, które polega na wyłożeniu powierzchni wewnętrznych halimateriałem o wysokim współczynniku pochłaniania dźwięku. Może to nastąpić poprzez zastosowanie wiszących pochłaniaczy dźwięku, pochłaniającego dźwięk sufitu podwieszanego, wyłożenie ścian materiałem pochłaniającym lub zastosowanie innych absorberów dźwięku. W przypadku rozpatrywanej hali, ze względu na obecność w niej suwnicy, nie ma możliwości zastosowania wiszących pochłaniaczy dźwięku. Istnieje możliwość wyłożenia ścian i sufitu materiałem pochłaniającym. Przykładem takiego materiału jest płyta wielowarstwowa składająca się z blachy, wełny mineralnej oraz blachy perforowanej, dla której średni współczynnik pochłaniania dźwięku wynosi około 0,6. Płyta mogą zostać wyłożone ściany oraz sufit, na powierzchni około 960 m². Program daje możliwość wprowadzenia dowolnych wartości współczynnika pochłaniania dźwięku dla różnych elementów budynku. Rysunek 5 przedstawia symulację, na której współczynnik pochłaniania dźwięku wybranych ścian wynosi 0,6.



Rys. 5. Mapa rozkładu poziomu hałasu po zastosowaniu paneli dźwiękochłonnych na ścianach i suficie
 Fig. 5. The map of noise level distribution for the case of application of acoustic panels on the walls and ceiling

Można stwierdzić, że wyłożenie ścian płytą wielowarstwową o współczynniku pochłaniania dźwięku rzędu 0,6 pozwoli na obniżenie poziomu dźwięku średnio o 1 dB, zaś zwiększenie współczynnika a do wartości 1 spowoduje zmniejszenie wartości poziomu dźwięku w hali o 2 dB względem stanu początkowego.

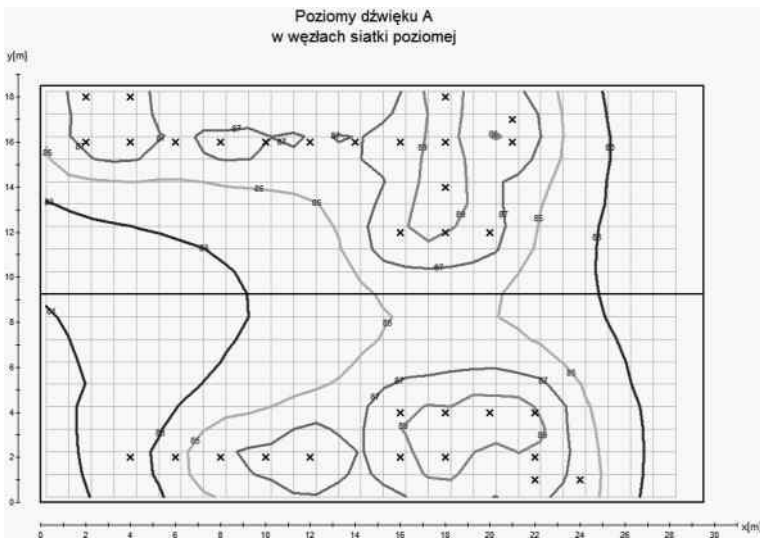
Kolejne symulacje wykonano dla przypadku ograniczenia emisji akustycznej urządzeń. Zastosowano tu kilka metod. Pierwsza z metod polega na zastosowaniu obudowy dźwiękochłonna - izolacyjnej dla maszyn MZE-121 oraz DM85. Typowe obudowy mają ścianki dźwiękochłonna – izolacyjne wykonane z blachy stalowej wyłożonej od wewnątrz masami tłumiącymi lub materiałami dźwiękochłonnymi. Druga metoda polega na wyłożeniu osłon maszyny materiałem zwiększającym ich sztywność osłon (np. masy bitumiczne) oraz materiałem o podwyższonym współczynniku pochłaniania dźwięku (np. wełna mineralna). Praktyka pokazuje, że w zależności od maszyny pozwala to na ograniczenie mocy akustycznej maszyny średnio o około 2 dB. Należy zaznaczyć, że każde urządzenie wymaga indywidualnego podejścia. Obudowa powinna pozwalać na swobodny dostęp obsługi do maszyny, jak i jej konserwacji. W tym celu obudowa powinna posiadać okienka inspekcyjne oraz drzwi. Prawidłowo wykonane obudowy mogą obniżyć poziom dźwięku o $10 \div 20$ dB, zaś wyłożenie osłon materiałem dźwiękoizolacyjnym pozwala na ograniczenie mocy akustycznej urządzenia o 2 dB.



Rys. 6. Mapa poziomu hałasu po zastosowaniu obudów maszyn o izolacyjności 10 dB

Fig. 6. The map of noise level distribution for the case of application of acoustic covers

Na rysunku 6 widać, że zabudowanie maszyn obudowami akustycznymi pozwala na obniżenie rozkładu poziomego dźwięku A średnio o 10 dB. Rysunek 7 przedstawia mapę rozkładu hałasu po zastosowaniu obudowy wokół wielociągu MZE – 121 oraz wyłożeniu obudów grubociągu DM – 85 materiałem dźwiękoizolacyjnym. Zastosowanie kombinacji metod pozwala na obniżenie poziomu dźwięku A w hali o 6 dB. Z zaprezentowanej mapy widać, że górna wartość ekspozycji na hałas przez pracownika jest nadal przekroczona w znacznej części pomieszczenia, co zobowiązuje pracowników do używania ochronników słuchu wszędzie tam, gdzie jest ona przekroczona.



Rys. 7. Mapa poziomu hałasu przy zastosowaniu kombinacji metod redukcji hałasu

Fig. 7. The map of noise level distribution for the case of combination of noise reduction methods

6. Wnioski

Wyniki pomiarów jednoznacznie wskazują, że pracownicy w rozpatrywanej hali są narażeni na nadmierny hałas. Najistotniejszym źródłem hałasu w analizowanej hali jest wielociąg drutu MZE 121. Praca grubociągu DM – 85 i wielociągu MZE – 121 również znacząco przyczynia się do zwiększenia poziomu dźwięku w badanym pomieszczeniu. Spośród wymienionych technicznych metod ograniczenia hałasu najskuteczniejszym jest ograniczenie mocy akustycznej maszyn poprzez zastosowanie obudowy dźwiękochłonna – izolacyjnej. Jest to najdroższe rozwiązanie, lecz w najbardziej skuteczny sposób zmniejszy poziom hałasu w hali. Zamontowanie na ścianach płyt dźwiękochłonnych, jak również wyłumienie maszyn przy pomocy materiałów zwiększających sztywność obudowy maszyny i chłonność wewnątrz obudowy, pozwoli na obniżenie poziomu dźwięku A w hali o około $1\div 2$ dB. Nie wyeliminuje to jednak wystarczająco problemu nadmiernego hałasu, gdyż takie rozwiązanie niedostatecznie zredukuje poziom hałasu w hali. Zastosowanie obudowy dźwiękochłonna – izolacyjnej wokół wielociągu MZE 121 oraz wyłożenie konstrukcji od wewnątrz grubociągu DM-85 materiałem pochłaniającym pozwoli na wystarczające obniżenie hałasu, przy znacznie niższych kosztach, w porównaniu do zastosowania pełnej obudowy dźwiękochłonna – izolacyjnej.

Koszty zastosowania poszczególnych metod przedstawiono w tabeli 2. Są to wartości orientacyjne, do których należy doliczyć koszt montażu.

Tabela 2. Koszt poszczególnych metod ograniczenia hałasu

Table 2. The cost of the various noise reduction methods

Metoda adaptacji	Powierzchnia adaptacji	Cena orientacyjna 1 m ²	Zysk w dB	Orientacyjny koszt adaptacji
Zwiększenie chłonności akustycznej hali	960 m ²	150 zł	1	144.000 zł
Wygłuszenie maszyn	240 m ²	150 zł	2	36.000 zł
Obudowanie maszyn	265 m ²	350 zł	10	92.750 zł
Wygłuszenie grubociągu oraz obudowanie wielociągu	MZE-121 81 m ²	350 zł	6	49.950 zł
	DM-85 144 m ²	150 zł		

Dodatkową, nie analizowaną w niniejszej pracy, metodą ograniczenia hałasu oddziałującego na pracowników jest zastosowanie kabiny dźwiękoizolacyjnej dla operatorów, jednak w tym przypadku pracownik jest chroniony tylko wewnątrz kabiny. Odpowiednie ustalenie czasu przebywania w kabinie może okazać się wystarczające, aby wartość dopuszczalna hałasu podana w Rozporządzeniu [6] była zachowana. Należy tu jednak dokonać dokładnej analizy czasów przebywania operatora maszyny w poszczególnych strefach obsługowych.

Parametrem wpływającym na dokładność obliczeń numerycznych jest znajomość widma hałasu generowanego przez maszynę. Jest to ważne ze względu na zastosowane w adaptacji akustycznej materiały.

Czynnikiem, który wpływa na wynik obliczeń jest ilość odbić fali dźwiękowej od przeszkód (np. ścian, maszyn, itp.), które w programie są realizowane. Wykorzystany program daje możliwość zasymulowania tylko jednego odbicia fali dźwiękowej.

Wymienione wyżej czynniki mają istotny wpływ na poprawność i dokładność wyników, co nie zmienia faktu, że obliczenia numeryczne dają możliwość sprawdzenia na ile dana metoda technicznej ochrony przed hałasem ogranicza rozprzestrzenianie się fal dźwiękowych. Odpowiednio wykonana symulacja komputerowa może dawać przewidywany wynik w krótkim czasie oraz niskim kosztem w stosunku do badań doświadczalnych.

Artykuł został przygotowany w oparciu o badania wykonane w ramach pracy inżynierskiej pt.: „Ocena warunków pracy w aspekcie hałasu na hali dużego zakładu przemysłowego” wykonanej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej w 2013 roku.

LITERATURA

- [1] Borkowska-Czarnecka K., Czerwiński A., Dziechciowski Z.: *Analiza wpływu zainstalowania nowej maszyny drukującej na klimat akustyczny w hali produkcyjnej drukarni*, „Mechanika”, 2012, 2-M, ss. 55-62.
- [2] Czerwiński A., Dziechciowski Z.: *Weryfikacja parametrów akustycznych obudów maszyn drukujących o dużej wydajności*, „Mechanika”, 2012, 2-M, ss. 63-72.
- [3] http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/PW_warunki_pracy_w_2012_r.pdf.
- [4] Bryła R.: *Wypadki przy pracy i choroby zawodowe w 2012 roku*, „Promotor BHP”, 2013, nr 10, s. 47.
- [5] Dyrektywa 2003/10/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (hałasem), siedemnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG.
- [6] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz. U. 2002 nr 217 poz. 183.
- [7] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa 1993.