

---

## ALGORYTMY GENETYCZNE DO MINIMALIZACJI RYZYKA ZAWODOWEGO ZWIĄZANEGO Z EKSPOZYCJĄ NA HAŁAS

### WPROWADZENIE

Minimalizacja ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na hałas poprzez ograniczanie ekspozycji pracowników na hałas jest obecnie jednym z najważniejszych zagadnień w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy. Wynika ono z powszechnego występowania hałasu w środowisku pracy i dużej liczby narażonych na ten czynnik, która według danych GUS [13] przekracza 200 tys. osób. Ograniczanie (minimalizacja) ekspozycji na hałas w środowisku pracy polega na zastosowaniu odpowiednich dla danego przypadku środków technicznych i metod organizacyjnych [8, 9] przy czym często możliwe jest osiągnięcie takiego samego, niskiego poziomu ryzyka zawodowego, poprzez zastosowanie różnych rozwiązań. Duże znaczenie w tych działaniach odgrywa również czynnik ekonomiczny, czyli koszty związane z praktycznym wdrożeniem proponowanych rozwiązań technicznych i organizacyjnych prowadzących do zmniejszenia zagrożenia hałasem. Nawet bardzo dobre rozwiązania techniczne i organizacyjne nie zostaną zastosowane w praktyce, jeżeli zakład pracy nie będzie posiadał odpowiednich środków na ich realizację. Z wymienionych powodów problem ograniczania ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas można go traktować jako zagadnienie wielowymiarowe (zależne od wielu zmiennych). W rozwiązywaniu tego rodzaju problemów pomocne może być zastosowanie algorytmów genetycznych, charakteryzujących się dużą efektywnością dla zagadnień wielowymiarowych i możliwością ich rozwiązywania nawet w przypadkach gdy inne znane metody okazują się nieskuteczne. Dzięki swoim zaletom algorytmy genetyczne zyskują na przestrzeni ostatnich lat coraz większe znaczenie w obszarze zwalczania zagrożeń wibroakustycznych. Mogą być stosowane np.: w systemach aktywnej redukcji hałasu [18], przy projektowaniu środków technicznych ograniczania hałasu [1, 3, 5, 26], do identyfikacji źródeł hałasu [17], optymalizacji wykorzystania istniejących środków technicznych do ograniczania hałasu [2, 7, 23, 24] lub optymalizacji działań organizacyjnych [2, 20], w tym z uwzględnieniem kosztów poszczególnych rozwiązań.

Algorytmy genetyczne w powiązaniu z właściwie dobranymi modelami akustycznego środowiska pracy mogą być zastosowane do minimalizacji ryzyka zawodowego związanego z

---

ekspozycją na hałas z zastosowaniem metod technicznych i/lub organizacyjnych. Poniżej przedstawiono przykłady opracowanych w CIOP-PIB algorytmów genetycznych i wykorzystujących je narzędzi komputerowych (programów) do wspomagania działań w zakresie ograniczania zawodowej ekspozycji na hałas. Programy te umożliwiają:

- optymalizację położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy w pomieszczeniach pracy (metoda techniczna),
- optymalizację położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy w pomieszczeniach pracy z uwzględnieniem kosztów instalacji maszyn,
- optymalizację rotacji pracowników na hałaśliwych stanowiskach pracy (metoda organizacyjna)
- optymalizację rotacji pracowników na hałaśliwych stanowiskach pracy z uwzględnieniem kosztów rotacji.

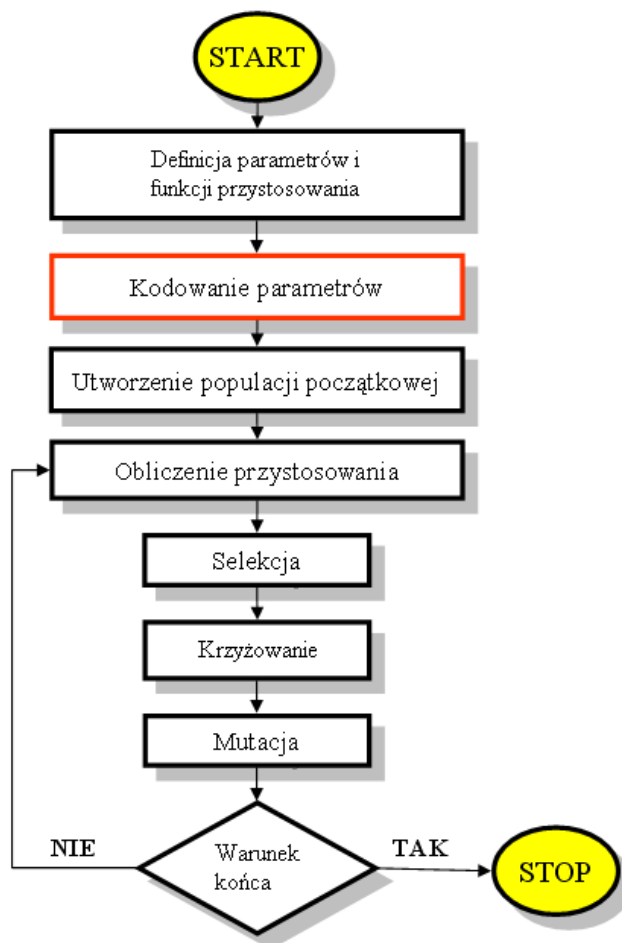
## **ALGORYTMY GENETYCZNE**

Algorytmy genetyczne [11, 14, 16, 19] są algorytmami optymalizacji wykorzystującymi wzorowane na systemach biologicznych mechanizmy doboru naturalnego i dziedziczenia. Operują one na zbiorach zakodowanych parametrów (zmiennych) zadania optymalizacji (czyli osobnikach lub chromosomach) wykonując cykliczne operacje selekcji, krzyżowania i mutacji. W odróżnieniu od innych metod optymalizacji, w algorytmach genetycznych przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań rozpoczyna się nie z jednego lecz z wielu punktów jednocześnie, a do ukierunkowania poszukiwań niezbędna jest jedynie funkcja celu (przystosowania) pozwalająca określić w jakim stopniu dane rozwiązania problemu różni się (jest lepsze lub gorsze) od pozostałych rozwiązań.

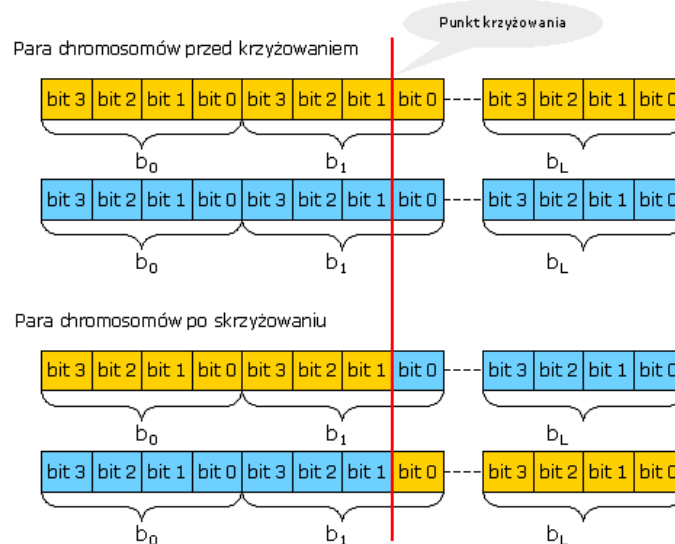
Na Rys. 1 przedstawiono schemat działania algorytmu genetycznego. W pierwszym kroku należy zdefiniować parametry zadania optymalizacji (czyli problemu, którego rozwiązanie chcemy znaleźć) oraz funkcję przystosowania. Parametry należy zakodować w postaci chromosomu, który stanowi odpowiednik wektora rozwiązań problemu. Na chromosomach, nazywanych również osobnikami, wykonywane są operacje genetyczne. W kolejnym kroku konieczne jest utworzenie populacji początkowej czyli pewnego zbioru losowo wybranych rozwiązań problemu. Osobniki (chromosomy) z tego zbioru są poddawane ocenie z wykorzystaniem funkcji przystosowania. Na podstawie tej oceny w następnym kroku dokonywana jest selekcja, czyli wybór osobników do procesu krzyżowania. Im większe przystosowanie ma dany osobnik, tym większe jest prawdopodobieństwo, że weźmie on

---

udział w procesie krzyżowania. Proces krzyżowania pozwala utworzyć z istniejących (rodzicielskich) osobników, osobniki nowe (potomków). Jego przebieg zobrazowano na Rys. 2. Punkt krzyżowania wybierany jest drogą losowania.



Rys. 1. Schemat działania algorytmu genetycznego.



Rys. 2. Przebieg procesu krzyżowania.

Otrzymane w wyniku krzyżowania osobniki poddawane są działaniu mutacji. Polega ona na zmianie jednego z bitów w wylosowanym osobniku, przy czym prawdopodobieństwo mutacji jest bardzo małe. Mutacja pozwala zwiększyć różnorodność genową rozwiązań i zapobiega sytuacji, w której algorytm zbiega do minimum lokalnego. Otrzymane w wyniku tych operacji nowe pokolenie chromosomów czyli zakodowanych rozwiązań problemu poddawane jest ponownie całemu cyklowi operacji genetycznych. Proces ten jest powtarzany aż do momentu spełnienia „warunku końca”, którym najczęściej jest określona liczba generacji pokoleń (liczba iteracji).

Dla algorytmów genetycznych zastosowanych w narzędziach komputerowych prezentowanych w dalszej części materiałów przyjęto ponadto następujące założenia:

1. Populacja początkowa generowana jest w oparciu o wartość zmiennej losowej o rozkładzie równomiernym. Wielkość populacji początkowej ustalana jest arbitralnie w trakcie badań i może być zmieniana w razie potrzeby.
2. Selekcja osobników do krzyżowania odbywa się według zasad selekcji proporcjonalnej nazywaną również Regułą Ruletki. Prawdopodobieństwo wyboru osobnika (chromosomu) do populacji rodzicielskiej jest proporcjonalne do wielkości jego przystosowania wyznaczonej z użyciem funkcji przystosowania.
3. Krzyżowanie wielopunktowe – liczba punktów krzyżowania jest równa liczbie zmiennych (współrzędnych przestrzennych) zakodowanych w chromosomie, procedura krzyżowania zapewnia, że w ramach jednego parametru występuje zero lub jeden punkt krzyżowania).

---

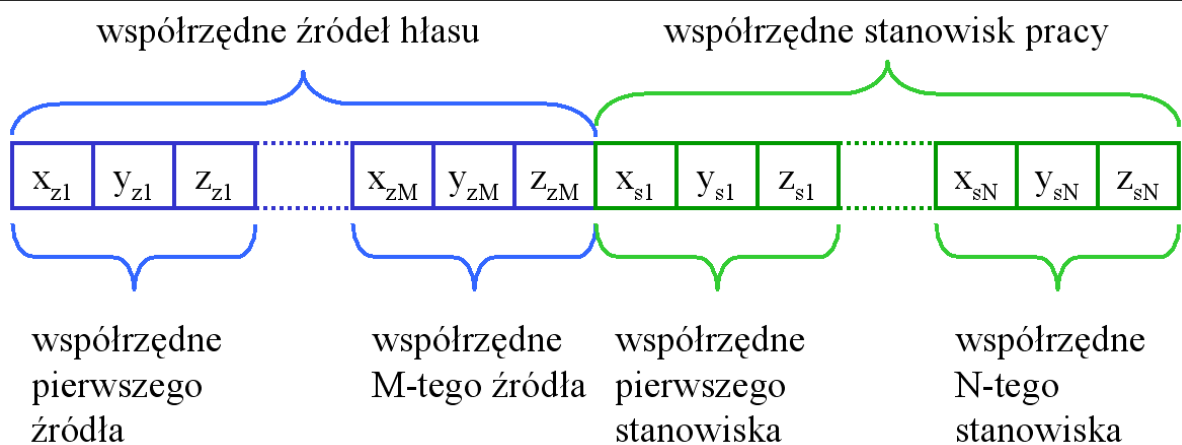
Punkt krzyżowania w obrębie genu wybierany jest losowo (z jednakowym prawdopodobieństwem). Krzyżowanie zachodzi z określonym prawdopodobieństwem.

4. Równomierne prawdopodobieństwo mutacji w obrębie w obrębie ciągu kodowego reprezentującego pojedynczą zmienną/parametr zadania optymalizacji
5. Wykorzystanie strategii elitarnej przy wyborze i generowaniu nowego pokolenia, polegającą na wyborze do nowego pokolenia  $m$  najlepszych rozwiązań z pokolenia rodzicielskiego.
6. Zakończenie procesu optymalizacji po wygenerowaniu określonej liczby pokoleń (tzn. po określonej liczbie iteracji algorytmu) wybieranej arbitralnie w trakcie obliczeń optymalizacyjnych.

#### ***ALGORYTMY DO OPTYMALIZACJI POŁOŻENIA ŹRÓDEŁ HAŁASU I STANOWISK PRACY POD KĄTEM OGRANICZENIA EKSPOZYCJI NA HAŁAS.***

Właściwe rozmieszczenie maszyn i urządzeń (źródeł hałasu) oraz stanowisk pracy w pomieszczeniach zakładu pracy jest jedną z podstawowych metod ograniczania zawodowej ekspozycji na hałas. Zadaniem algorytmu jest znalezienie takiej konfiguracji rozmieszczenia źródeł hałasu i/lub stanowisk pracy w pomieszczeniu aby, dla zadanych warunków początkowych, zminimalizować ryzyko zawodowe związane z ekspozycją na hałas pracowników.

Parametrami zadania optymalizacji, które należy zakodować w postaci chromosomu,  $W$ , na których operuje algorytm genetyczny, są współrzędne przestrzenne źródeł hałasu i stanowisk pracy, których położenie podlega optymalizacji. W sensie matematycznym chromosom  $W$  stanowi wektor wartości zmiennych będących rozwiązaniem problemu. Strukturę chromosomu przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Struktura chromosomu z zakodowanymi współrzędnymi położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy.

Przyjmując, że zagadnienie optymalizacji dotyczy  $M$  źródeł hałasu i  $N$  stanowisk pracy chromosom składa się z  $3 \times (N + M)$  zmiennych reprezentujących współrzędne przestrzenne. Każda ze współrzędnych tworzących strukturę chromosomu (dla kierunków  $x$ ,  $y$  i  $z$ ) jest ciągiem binarnym o określonej długości, w którym zakodowano wartość współrzędnej będącą liczbą rzeczywistą.

Dla działania algorytmu genetycznego istotne znaczenie ma ilościowa ocena jakości rozwiązań zakodowanych w postaci chromosomów, pozwalająca określić o ile dane rozwiązanie jest lepsze lub gorsze od pozostałych rozwiązań. Ocena ta jest wykorzystywana w algorytmie genetycznym do selekcji rozwiązań rodzicielskich, z których tworzone jest nowe pokolenie rozwiązań. Ocena rozwiązań dokonywana jest z wykorzystaniem funkcji przystosowania, nazywanej również funkcją celu. Funkcję przystosowania w wersji podstawowej zdefiniowano w sposób następujący [21]:

$$f(W) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{10^{\frac{85}{10}}}{\frac{L_{pAi}^W}{10^{\frac{85}{10}}}} \right] \quad (1)$$

gdzie  $W$  jest jednym z rozwiązań (chromosomem) z danej populacji,  $N$  – liczbą stanowisk pracy, a  $L_{pAi}^W$  wypadkowym poziomem dźwięku  $A$  na stanowisku pracy o indeksie  $i$ .

Tak zdefiniowana funkcja przystosowania jest tym większa im mniejsze jest narażenie pracowników na hałas. Funkcja ta jednak nie pozwala na uwzględnienie w algorytmie ograniczeń występujących w rzeczywistym środowisku pracy związanych z położeniem źródeł hałasu i stanowisk pracy. Aby uwzględnić te ograniczenia w procesie optymalizacji należy je wprowadzić w odpowiedni sposób do funkcji przystosowania, co osiągnięto poprzez

---

zastosowanie tzw. funkcji kary  $g(W)$ . Po uwzględnieniu funkcji kary, zmodyfikowana funkcja przystosowania  $f_m(W)$  będzie miała postać:

$$f_m(W) = f(W) \cdot g^1(W) \cdot g^2(W) \cdot \dots \cdot g^S(W) \quad (2)$$

gdzie  $f(W)$  jest podstawową funkcją przystosowania opisaną zależnością (1), natomiast  $g^1(W), g^2(W), \dots, g^S(W)$  są funkcjami kary określonymi dla  $S$  kolejnych ograniczeń.

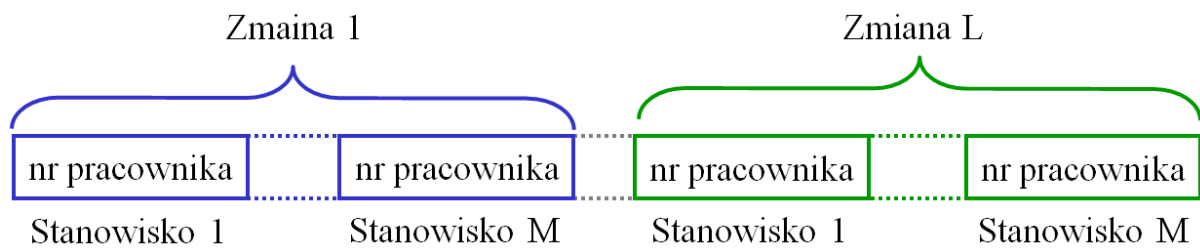
Optymalizacja z zastosowaniem odpowiednio opracowanego algorytmu genetycznego umożliwi również uwzględnienie kosztów ekonomicznych proponowanych rozwiązań technicznych, np. kosztów instalacji maszyn. Zadaniem takiego algorytmu jest znalezienie konfiguracji rozmieszczenia źródeł hałasu i/lub stanowisk pracy w pomieszczeniu, która dla zadanych warunków początkowych, pozwala zminimalizować ryzyko zawodowe związane z ekspozycją na hałas pracowników, przy uwzględnieniu kosztów (ekonomicznych) proponowanych rozwiązań. Algorytm ten jest rozwinięciem algorytmu opisanego powyżej, w którym uwzględniono czynnik ekonomiczny poprzez wprowadzenie dodatkowej funkcji kary. Przyjęto, że zmiana lokalizacji maszyn w pomieszczeniu wiąże się z kosztami ich instalacji. Im dalej od ścian pomieszczenia znajduje się maszyna tym większe są koszty związane z jej podłączeniem do instalacji prowadzonej na/w ścianach pomieszczenia. Uwzględnienie kosztów zainstalowania maszyny w procesie optymalizacji jej położenia w celu minimalizacji ekspozycji na hałas wiąże się z zastosowaniem funkcji kary zmniejszającej przystosowanie osobnika w miarę, gdy reprezentowane w jego chromosomie maszyny oddalają się od ścian pomieszczenia.

#### **ALGORYTMY DO OPTYMALIZACJI POŁOŻENIA ŹRÓDEŁ HAŁASU I STANOWISK PRACY POD KĄTEM OGRANICZENIA EKSPOZYCJI NA HAŁAS.**

Rotacja pracowników na stanowiskach pracy jest jedną z najważniejszych metod organizacyjnych ograniczania zawodowej ekspozycji na hałas. Zadaniem algorytmu jest znalezienie takiego schematu rotacji a tym samym harmonogramu zmian pracowników na istniejących stanowiskach pracy aby, dla przyjętej liczby i czasu trwania zmian, zminimalizować ekspozycję zawodową pracowników na hałas i związane z nią ryzyko zawodowe. Pod pojęciem „rotacji” należy rozumieć moment, w którym pracownicy są przypisywani/kierowani do określonego stanowiska pracy, a pod pojęciem „zmiany” okres

czasu pomiędzy kolejnymi rotacjami pracowników na stanowiskach pracy, tzn. pierwszą zmianą jest okres czasu pracy od rozpoczęcia pracy (rotacja „zerowa”) do pierwszej rotacji pracowników na stanowiskach, drugą zmianą jest okres czasu pracy od pierwszej do drugiej rotacji pracowników na stanowiskach pracy itd. Liczba i czas zmian ustalana jest z góry i nie podlega optymalizacji przy zastosowaniu algorytmu genetycznego.

Parametrami zadania optymalizacji, które należy zakodować w postaci chromosomu,  $K$ , na których operuje algorytm genetyczny, są numery porządkowe pracowników zajmujących dane stanowiska pracy w trakcie trwania kolejnych zmian. Przyjęto, że rotacji poddawanych jest  $N$  pracowników na  $M$  stanowiskach pracy, a czas pracy dzielony jest na  $L$  zmian. Liczba pracowników nie musi odpowiadać liczbie stanowisk pracy. Strukturę chromosomu przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Struktura chromosomu z zakodowanym schematem zmian pracowników na stanowiskach pracy.

Każdy chromosom stanowiący harmonogram zmian pracowników na stanowiskach pracy składa się z  $M \cdot L$  parametrów zawierających zakodowany numer pracownika  $k$  z zakresu od 1 do  $N$ .

Podobnie jak w przypadku algorytmu stosowanego do optymalizacji działań technicznych bardzo ważne jest odpowiednie zdefiniowanie funkcji przystosowania pozwalającej na ilościową rozwiązań zakodowanych w postaci chromosomów. Funkcja ta powinna przede wszystkim powinna być powiązana z ekspozycją pracowników na hałas i wynikającym z niej ryzykiem zawodowym, w taki sposób, aby przystosowanie danego chromosomu było największe, gdy ekspozycja pracowników na hałas dla zakodowanego w nim rozwiązania problemu jest najmniejsza. Z tego powodu funkcję przystosowania  $f^o$  dla algorytmu stosowanego w działaniach organizacyjnych zdefiniowano w sposób zbliżony do funkcji przystosowania dla algorytmu stosowanego w metodach technicznych. Podstawowa zależność dla funkcji przystosowania ma postać:



$$f^o \llbracket K \rrbracket = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{10^{\frac{85}{10}}}{10^{\frac{L_{EX,8h,i}^{(K)}}{10}}} \right] \quad (3)$$

gdzie  $K$  jest jednym z rozwiązań z danej populacji (chromosomem),  $N$  – liczbą pracowników uczestniczących w procesie rotacji, a  $L_{EX,8h,i}^{(K)}$  poziomem ekspozycji na hałas pracownika o indeksie  $i$ .

Zgodnie z zależnością pracownicy, dla których poziom ekspozycji przekracza wartość dopuszczalną pogarszają przystosowanie w większym stopniu niż polepszają je pracownicy, dla których poziom ekspozycji leży poniżej wartości dopuszczalnej. Ta nierównowaga traktowania wkładu do wartości przystosowania może być regulowana za pomocą parametru  $\eta$ . W ten sposób w kolejnych generacjach algorytmu genetycznego eliminowani są osobnicy zawierający w chromosomach rozwiązania, w których zakodowani są pracownicy o wyraźnie większym narażeniu na hałas niż pozostali pracownicy wprowadzeni do modelu środowiska pracy.

Funkcja przystosowania określona zależnością (3) nie pozwala na uwzględnienie w algorytmie genetycznym pewnych ograniczeń rzeczywistego środowiska pracy. Wynikiem działania algorytmu genetycznego może być rozwiązanie problemu optymalizacji (chromosom), w którym dany pracownik w trakcie danej zmiany zostanie przypisany do więcej niż jednego stanowiska pracy. Takie rozwiązanie nie jest fizycznie realizowalne i powinno być wyeliminowane z puli rozwiązań w wyniku działania algorytmu genetycznego. Z tego powodu do funkcji przystosowania określonej zależnością (3) należy wprowadzić element pogarszający przystosowanie chromosomów nierealizowalnych fizycznie. W tym celu zdefiniowano funkcję kary modyfikującą funkcję przystosowania. Po uwzględnieniu funkcji kary, funkcja przystosowania będzie miała postać:

$$f_m^o \llbracket K \rrbracket = f^o \llbracket K \rrbracket : g^o \llbracket K \rrbracket \quad (4)$$

gdzie:  $f_m^o \llbracket K \rrbracket$  jest zmodyfikowaną funkcją przystosowania,  $f^o \llbracket K \rrbracket$  jest funkcja przystosowania opisaną wzorem (3) a  $g^o \llbracket K \rrbracket$  jest funkcją kary.

Optymalizacja z zastosowaniem odpowiednio opracowanego algorytmu genetycznego umożliwi również uwzględnienie kosztów ekonomicznych wynikających z rotacji

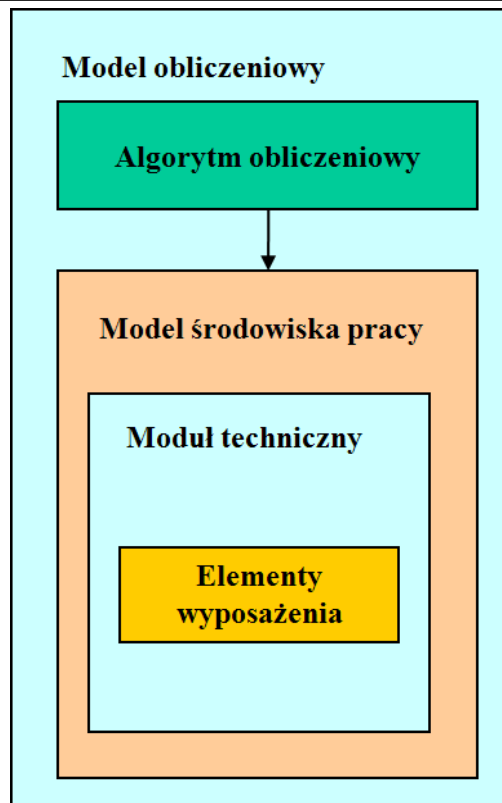
---

pracowników na stanowiskach pracy. Zadaniem algorytmu jest znalezienie takiego schematu rotacji a tym samym harmonogramu zmian pracowników na posiadanych stanowiskach pracy aby, dla przyjętej liczby i czasu trwania zmian, zminimalizować ekspozycję zawodową pracowników na hałas i związane z nią ryzyko zawodowe przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów związanych z rotacją pracowników. Algorytm ten jest rozwinięciem algorytmu opisanego powyżej, w którym uwzględniono czynnik ekonomiczny poprzez wprowadzenie dodatkowej funkcji kary. Przyjęto, że każda zmiana stanowiska pracy przez pracownika (rotacja) generuje koszty związane z przyuczeniem pracownika do pracy na nowym stanowisku oraz z zatrzymaniem cyklu pracy na czas konieczny do dokonania rotacji. Uwzględnienie kosztów rotacji pracowników w procesie optymalizacji harmonogramu zmian wiąże się z zastosowaniem funkcji kary zmniejszającej przystosowanie osobnika wraz ze wzrostem liczby rotacji.

## **NARZĘDZIA KOMPUTEROWE**

### **PROGRAM DO OPTYMALIZACJI POŁOŻENIA ŹRÓDEŁ HAŁASU I/LUB STANOWISK PRACY POD KĄTEM OGRANICZENIA EKSPOZYCJI NA HAŁAS.**

Program do optymalizacji położenia źródeł hałasu i/lub stanowisk pracy pod kątem ograniczenia ekspozycji na hałas może posłużyć do wspomagania działań związanych z ograniczaniem ekspozycji zawodowej na hałas metodą techniczną, polegającą na właściwym rozmieszczeniu źródeł hałasu i stanowisk pracy. Przy realizacji programu zastosowano programowanie obiektowe. Zastosowano w nim nadrzędną klasę obejmującą zarówno algorytm umożliwiający obliczenia symulacyjne i optymalizacyjne, jak i wszystkie niezbędne informacje umożliwiające wykonywanie obliczeń. Klasa ta została nazwana modelem obliczeniowym. W skład modelu obliczeniowego (Rys. 5) wchodzi więc sam algorytm genetyczny jak i model środowiska pracy.



Rys. 5. Struktura modelu obliczeniowego.

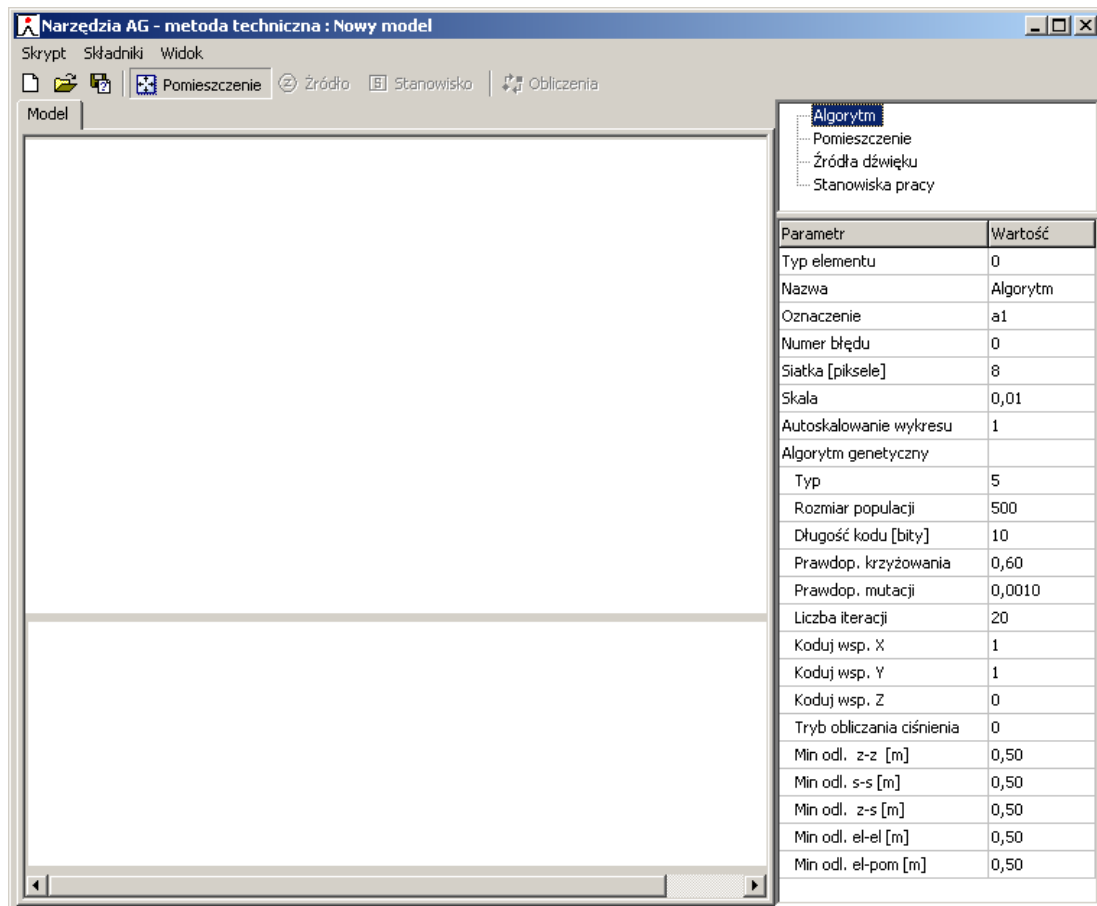
Model środowiska pracy zawiera w przypadku omawianego narzędzia moduł techniczny, zawierający dane i metody umożliwiające wyznaczanie parametrów geometrycznych i akustycznych środowiska pracy, które wykorzystywane są w trakcie optymalizacji położenia elementów środowiska pracy.

Moduł techniczny zawiera następujące elementy:

- pomieszczenie pracy,
- źródła hałasu (maszyny),
- stanowiska pracy (punkty obserwacji).

Widok okna startowego programu do optymalizacji położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy z zastosowaniem algorytmu genetycznego przedstawiony jest na Rys. 6. W prawym górnym fragmencie okna znajduje się rozwijana lista w formie tzw. drzewa, którego struktura odzwierciedla wymienione na początku podrozdziału elementy składowe modułu technicznego. Elementem drzewa jest też algorytm obliczeniowy wchodzący w skład struktury modelu symulacyjnego (Rys. 6). Zawiera on w sobie parametry algorytmu genetycznego stosowanego do obliczeń optymalizacyjnych oraz parametry pomocnicze niezbędne do prowadzenia obliczeń symulacyjnych. Bezpośrednio pod okienkiem z drzewem obrazującym strukturę modułu technicznego znajduje się tabela, w której wyświetlane są aktualne

parametry powiązane ze wskazanym elementem drzewa. Wartości tych parametrów mogą być zmieniane poprzez wpisanie nowej wartości w odpowiednim polu i jej zatwierdzenie klawiszem Enter. Na Rys. 6 widoczna jest tabela z parametrami algorytmu wykorzystywanego w module technicznym. Parametry u góry tabeli są parametrami pomocniczymi do prowadzonych obliczeń i ich wizualizacji. W drugiej części tabeli znajdują się parametry zastosowanego algorytmu genetycznego.



Rys. 6. Okno startowe programu do optymalizacji położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy.

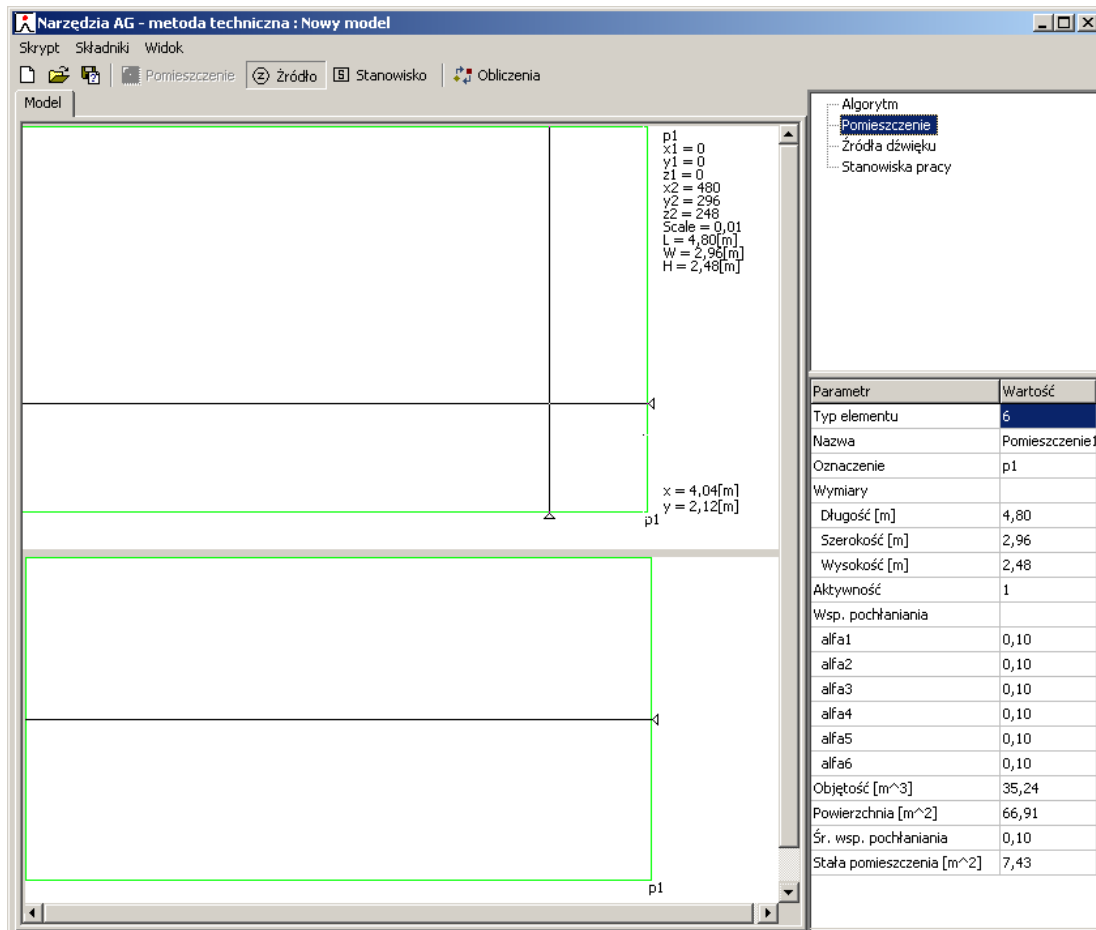
W tabeli z parametrami obok podstawowych parametrów odnoszących się algorytmu genetycznego takich jak rozmiar populacji, długość ciągu kodującego parametry (współrzedne) w chromosomie, prawdopodobieństwo krzyżowania, prawdopodobieństwo mutacji oraz liczba iteracji algorytmu genetycznego po których następuje jego zatrzymanie, znajdują się inne parametry wymagające omówienia. Znaczenie tych parametrów jest następujące:

---

„Typ”	– parametr określający, które elementy środowiska pracy są uwzględniane w procesie optymalizacji (5 – stanowiska pracy, 6 – źródła hałasu, 7 – źródła hałasu i stanowiska pracy),
„Koduj wsp. X”, „Koduj wsp. Y”, „Koduj wsp. Z”	– parametr określający czy dana współrzędna (x, y lub z) położenia jest kodowana w chromosomie (1 – kodowana, 0 – niekodowana). Jeżeli dana współrzędna nie jest kodowana, to położenie wyznaczane przez tą współrzędną nie podlega optymalizacji.
„Tryb obliczania ciśnienia”	– parametr określający metodę wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego, z której korzysta algorytm genetyczny (0 – fala bezpośrednia, 1 – fala bezpośrednia i pierwsze odbicie, 2 – metoda statystyczna)
„Min odl. z-z”	– minimalna odległość pomiędzy źródłami
„Min odl. s-s”	– minimalna odległość pomiędzy stanowiskami pracy
„Min odl. z-s”	– minimalna odległość pomiędzy źródłami a stanowiskami pracy
„Min odl. el-el”	– minimalna odległość pomiędzy elementami środowiska pracy
„Min odl. el-pom”	– minimalna odległość pomiędzy elementami środowiska pracy a powierzchniami ograniczającymi obszar pomieszczenia w procesie kodowania parametrów zgodnie z zależnością

Istotnym parametrem algorytmu obliczeniowego z punktu widzenia późniejszej wizualizacji obliczeń symulacyjnych rozkładów poziomów dźwięku A w pomieszczeniu jest parametr „Autoskalowanie wykresu”. Parametr ten decyduje o sposobie doboru skali barw wykorzystywanej na wykresach rozkładów poziomu dźwięku A w powiązaniu wartościami uzyskanymi z obliczeń. Gdy „Autoskalowanie wykresu” jest wyłączone (ma wartość równą 0) schemat kolorów wykorzystywany na wykresach jest z góry ustalony i niezmienny, niezależnie od aktualnych wyników obliczeń symulacyjnych (np. poziomowi 82 dB na każdym wykresie będzie odpowiadał kolor zielony w tym samym odcieniu). Gdy parametr „Autoskalowanie wykresu” ma wartość 1, przestrzeń barw jest skalowana do aktualnego zakresu poziomów dźwięku A prezentowanych na wykresie. Autoskalowanie jest przydatne w sytuacjach, gdy prezentowane na wykresie poziomu dźwięku A zmieniają się w niewielkim zakresie i ustalony schemat barwny nie jest w stanie dobrze zobrazować zmian tych poziomów w przekroju pomieszczenia. Z kolei ustalony schemat kolorów pozwala na bezpośrednie i intuicyjne porównywanie wykresów dla różnych obliczeń symulacyjnych.

W momencie uruchomienia (Rys. 6) program znajduje się w trybie projektowania nowego pomieszczenia pracy. Obszar pomieszczenia wrysowujemy w polu znajdującym się w lewej, górnej części okna programu za pomocą urządzenia wskazującego (myszy). W polu tym widoczny jest przekrój poziomy pomieszczenia. Przekrój pionowy rysowany jest automatycznie w lewym dolnym polu okna programu.

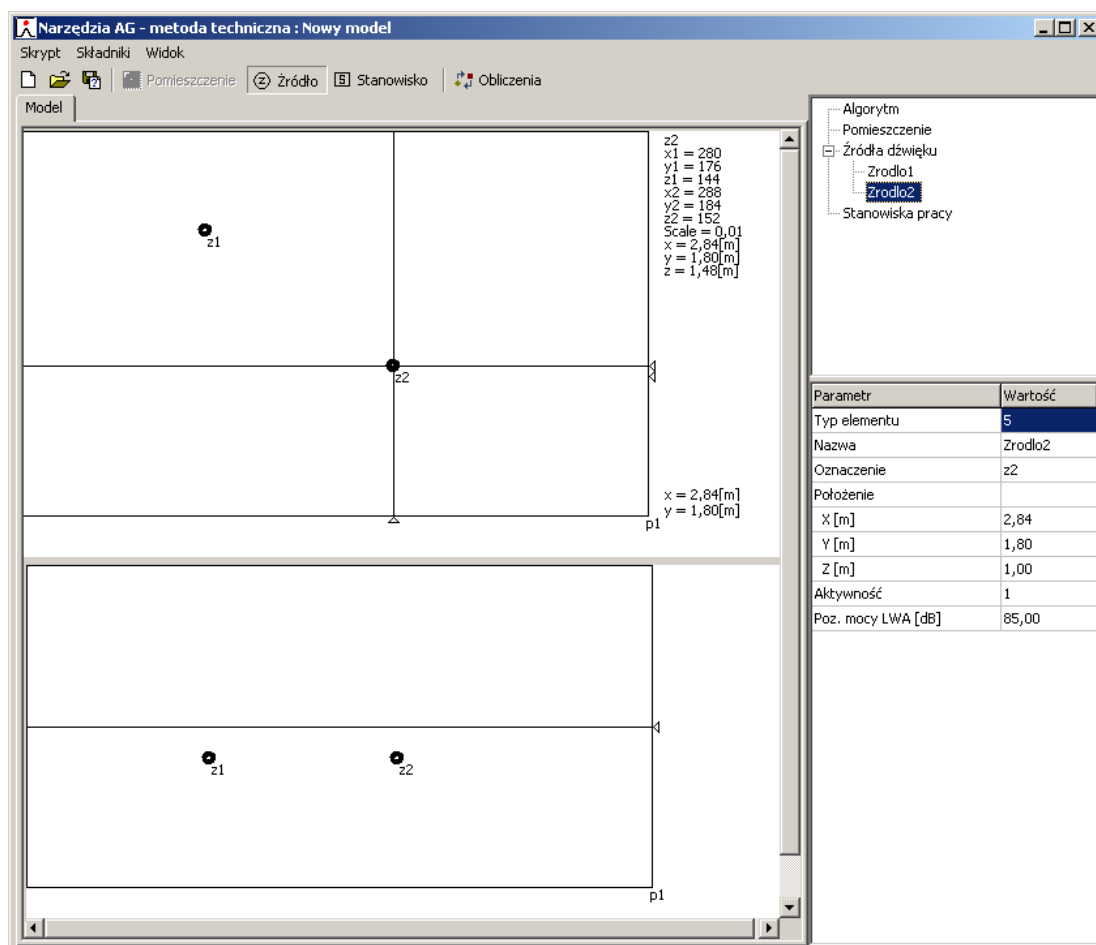


Rys. 7. Okno programu z zamodelowanym pomieszczeniem i jego parametrami.

Po narysowaniu pomieszczenia (Rys. 7), w drzewie parametrów uaktywnia się tabela z parametrami dotyczącymi pomieszczenia pracy oraz przyciski paska narzędzi umożliwiające wprowadzenie do modelu źródeł hałasu („Źródło”) i stanowisk pracy („Stanowisko”), oraz umożliwiające przejście do trybu obliczeń („Obliczenia”). Parametrami pomieszczenia, które możemy modyfikować w programie są wymiary pomieszczenia („Długość”, „Szerokość” i „Wysokość”) oraz współczynniki pochłaniania określone dla każdej ze ścian oraz sufitu i podłogi pomieszczenia (alfa1 – alfa6). Pozostałe parametry pomieszczenia, tzn. objętość, powierzchnia ścian, średni współczynnik pochłaniania i stała pomieszczenia wyznaczane są automatycznie. W polu przedstawiającym rzut poziomy pomieszczenia ruchome prowadnice wyznaczają aktualnie wskazany za pomocą myszy punkt pomieszczenia z podaniem jego

współrzędnych w prawym dolnym rogu pola. Prowadnica znajdująca się na przekroju pionowym pomieszczenia wskazuje położenie płaszczyzny, dla której wyznaczany jest rozkład poziomów dźwięku A w trybie obliczeń symulacyjnych. Położenie prowadnicy zmienia się przy użyciu klawiszy PageUp i PageDown.

Wprowadzanie do modelu środowiska pracy źródeł hałasu i stanowisk pracy jest realizowane przy użyciu myszki komputerowej na przekroju poziomym pomieszczenia. Dodawanie źródeł hałasu odbywa się przy aktywnym przycisku „Źródła” znajdującym się na pasku narzędzi w górnej części okna programu (Rys. 8). Po dodaniu źródeł hałasu w drzewie parametrów uaktywniają się tabele z parametrami dotyczącymi każdego ze źródeł hałasu.

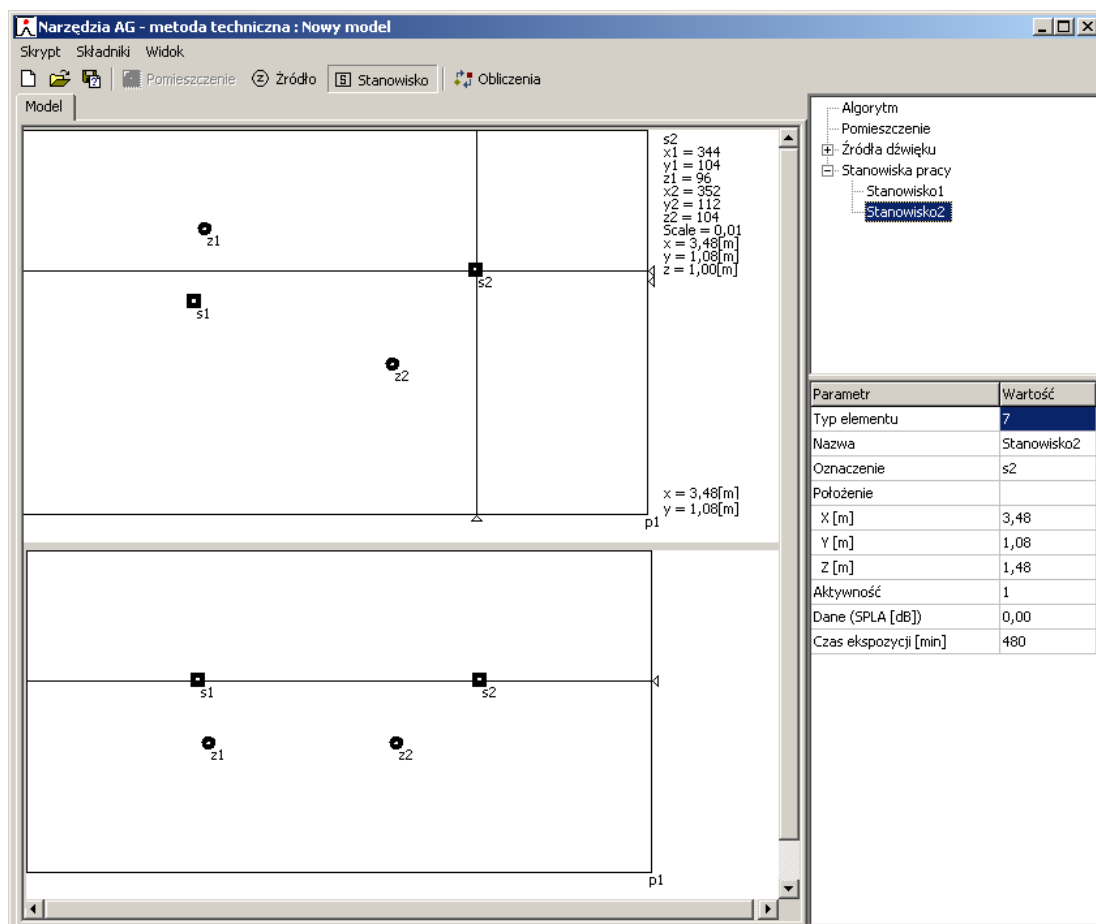


Rys. 8. Okno programu – dodawanie źródeł hałasu.

Źródła hałasu wykorzystywane w programie są źródłami punktowymi, wszechkierunkowymi. Symbol źródła stosowany na rzutach i na wykresach ma postać czarnego kółka i litery "z" z kolejnym numerem źródła. Parametrami źródła hałasu są współrzędne jego położenia w obszarze pomieszczenia pracy („X”, „Y” i „Z”) oraz poziom mocy akustycznej skorygowany charakterystyką częstotliwościową A („Poz. mocy LWA”).

Parametrem dodatkowym źródła jest „Aktywność” definiująca sposób uwzględniania źródła w obliczeniach symulacyjnych i w procesie optymalizacji. Parametr ten może przyjmować trzy wartości: 0 – źródło nie jest uwzględniane przy wyznaczaniu poziomów dźwięku A i jego położenie nie podlega optymalizacji, 1 – źródło jest uwzględniane w wyznaczaniu poziomów dźwięku A i jego położenie podlega optymalizacji, 2 – źródło jest uwzględniane w wyznaczaniu poziomów dźwięku A lecz jego położenie nie podlega optymalizacji. Trzecia z opcji pozwala na modelowanie pomieszczeń, w których należy umieścić nowe źródło hałasu lub stanowisko pracy przy pewnym zastanym i niezmiennym układzie istniejących źródeł i stanowisk pracy.

Dodawanie do modelu środowiska pracy stanowisk pracy odbywa się przy aktywnym przycisku „Stanowiska” znajdującym się na pasku narzędzi w górnej części okna programu (Rys. 9). Po dodaniu stanowisk pracy w drzewie parametrów uaktywniają się tabele z parametrami dotyczącymi każdego ze stanowisk.



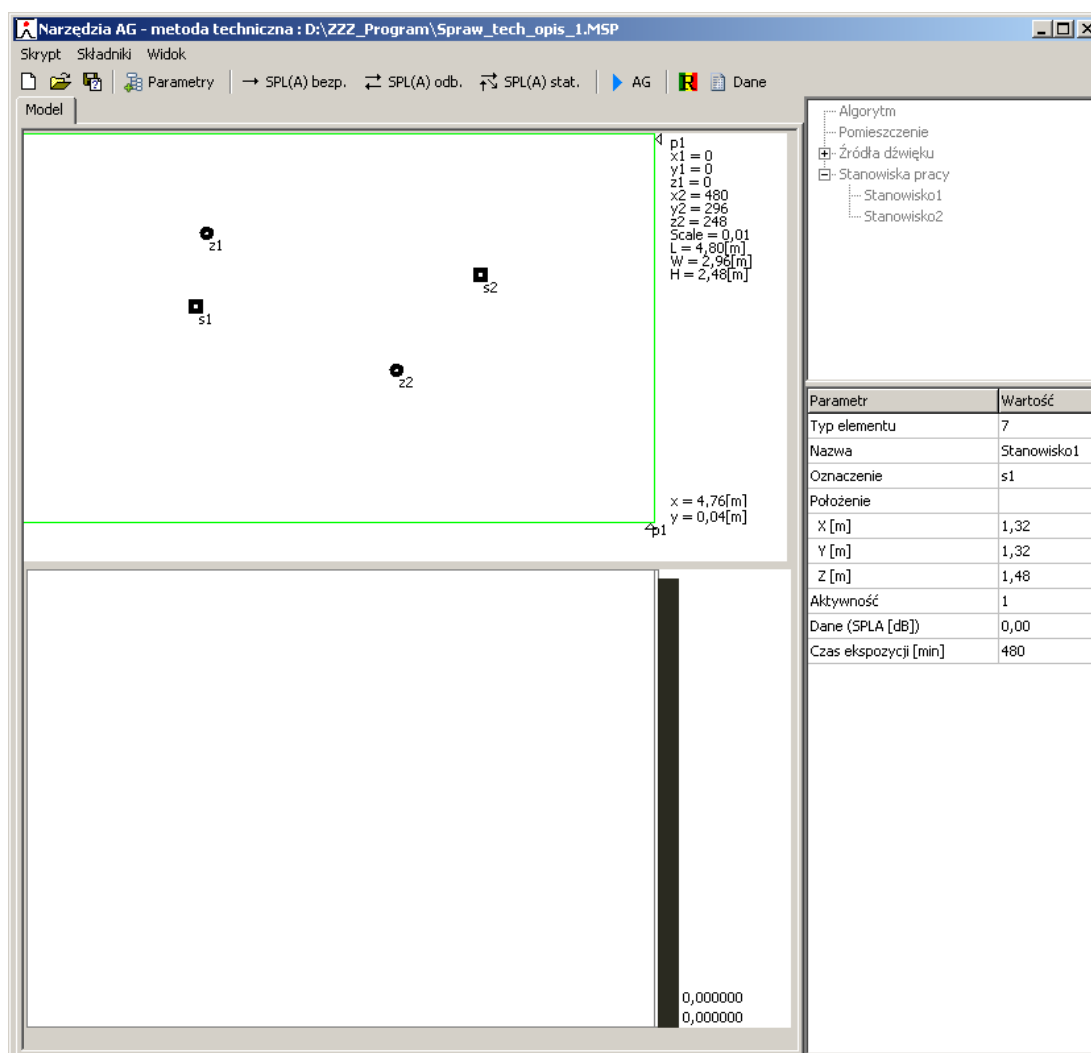
Rys. 9. Okno programu – dodawanie stanowisk pracy.

Symbol stanowiska pracy stosowany na rzutach i na wykresach ma postać czarnego kwadratu i litery "s" z kolejnym numerem stanowiska. Parametrami stanowiska pracy są



współrzędne jego położenia w obszarze pomieszczenia pracy („X”, „Y” i „Z”) oraz „Aktywność” definiująca sposób uwzględniania stanowiska pracy w procesie optymalizacji. Parametr ten może przyjmować dwie wartości: 1 – położenie stanowiska pracy podlega optymalizacji, 2 – położenie stanowiska pracy nie podlega optymalizacji. W programie przyjęto, że czas ekspozycji odpowiada standardowemu 8-godzinnemu dniowi pracy. Poziom dźwięku A („SPL(A)”) na stanowisku pracy wyznaczany jest w trakcie obliczeń symulacyjnych.

Po wprowadzeniu modelu akustycznego środowiska pracy należy przejść do trybu obliczeń wykorzystując przycisk „Obliczenia” znajdujący się na pasku narzędzi programu. Widok okna programu w trybie obliczeń przedstawiono na Rys. 10.



Rys. 10. Okno programu – tryb obliczeń.

Obsługa programu w trybie obliczeń odbywa się przy użyciu przycisków umieszczonych na pasku narzędzi w górnej części okna programu. Przycisk „Parametry” umożliwia powrót

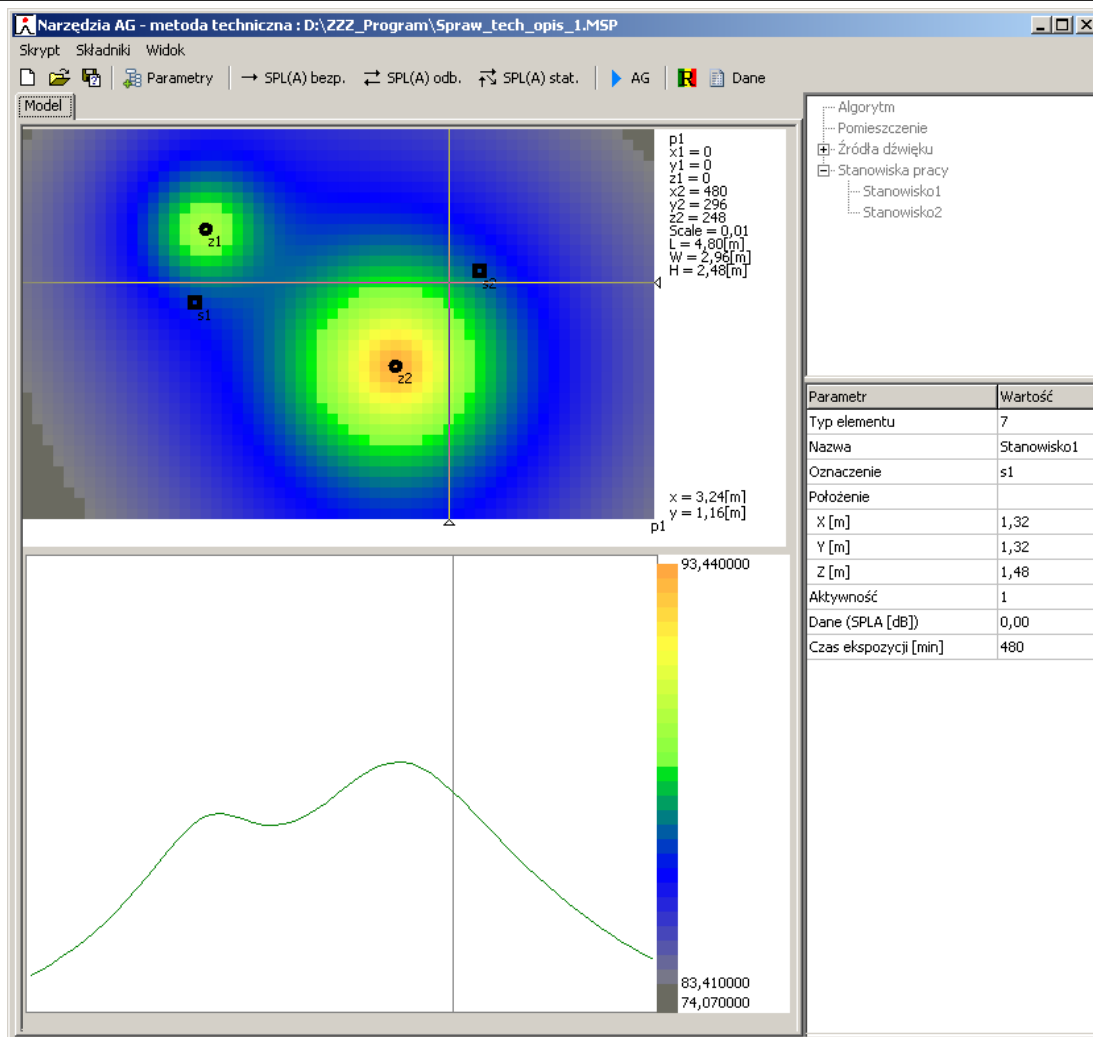
---

do trybu edycji parametrów modelu obliczeniowego. Grupa przycisków oznaczonych strzałkami i symbolem „SPL(A)” służy do prognozowania rozkładów poziomu ciśnienia akustycznego w przekroju pomieszczenia (na wysokości zdefiniowanej w trybie edycji parametrów) z zastosowaniem jednej z trzech metod prognozowania:

- metody, w ramach której udział w rozkładzie pola akustycznego mają fale docierające bezpośrednio od źródeł hałasu (SPL(A) bezp.),
- metody geometrycznej źródeł pozornych, w ramach której uwzględniana jest fala bezpośrednia i fale jednokrotnie odbite od powierzchni ograniczających pomieszczenie (rzeczywiste źródła hałasu i źródła pozorne pierwszego rzędu) (SPL(A) odb.),
- metody statystycznej, w ramach której uwzględniane są fale bezpośrednie, zaś energia związana z polem fal odbitych jest szacowana na podstawie parametrów geometrycznych pomieszczenia i jego chłonności akustycznej (SPL(A) stat.).

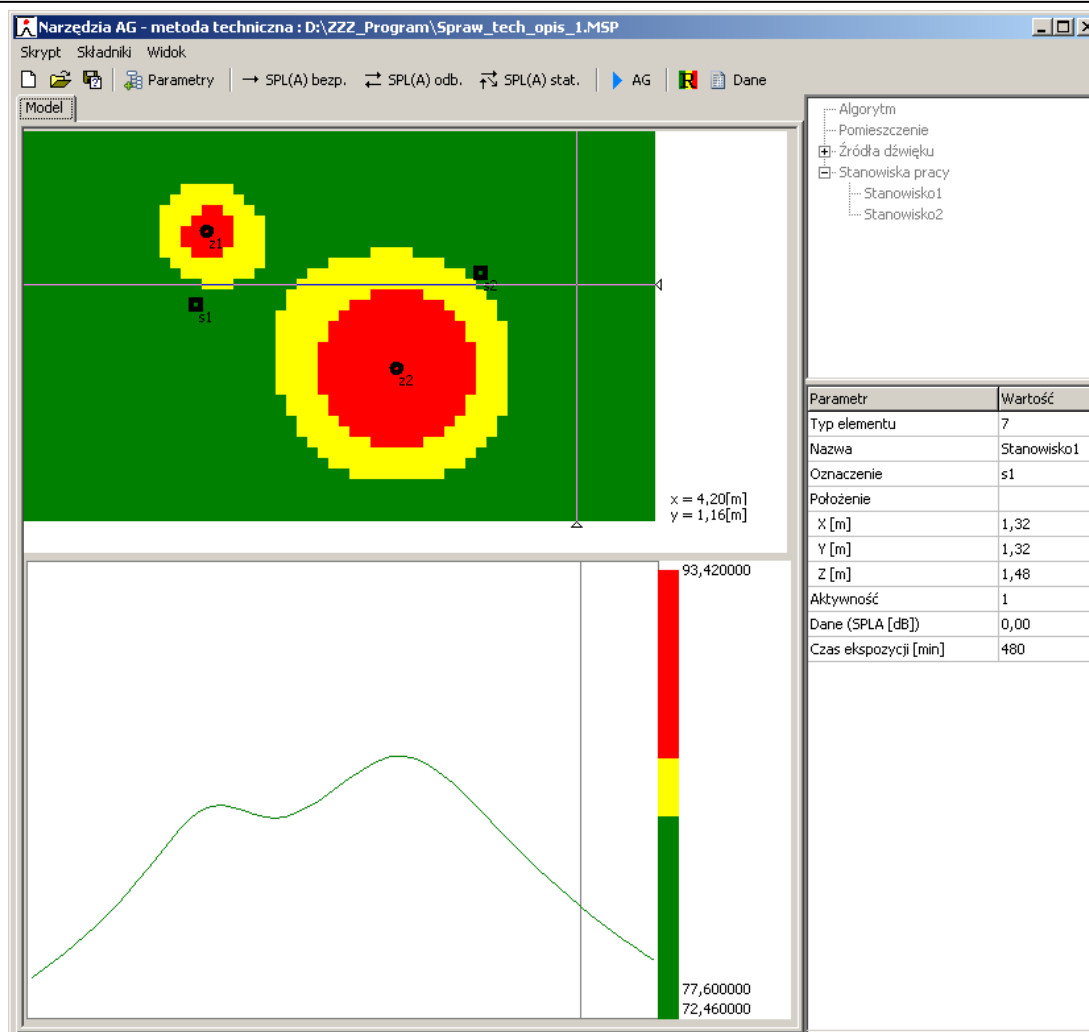
Na Rys. 11 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych rozkładu poziomu dźwięku A dla prezentowanego na poprzednich rysunkach układu źródeł i stanowisk prac. Do obliczeń wybrano opcję SPL(A) odb. czyli procedurę, w ramach której uwzględnia się energie fal bezpośrednich pochodzących od źródeł i energie związane z pierwszym odbiciem fal akustycznych od powierzchni ograniczającej pomieszczenie.

W polu w lewej części okna programu (Rys. 11) znajdują się dwa wykresy. Wykres górny przedstawia wyznaczony rozkład poziomów dźwięku A w przekroju poziomym pomieszczenia wykonanym na wysokości ustalonej w trybie edycji parametrów modelu obliczeniowego na rzucie pionowym pomieszczenia. Wykres dolny obrazuje zmiany poziomów dźwięku A wzdłuż poziomej prowadnicy na wykresie górnym. Z prawej strony dolnego wykresu umieszczono skalę barw wykorzystywaną na wykresie w powiązaniu z poziomami dźwięku A. W prawym dolnym rogu pola z wykresami wyświetlana jest wartość poziomu dźwięku A punktu znajdującego się na przecięciu prowadnic na wykresie.



Rys. 11. Okno programu w trybie obliczeń – symulacja rozkładu poziomu dźwięku A w pomieszczeniu.

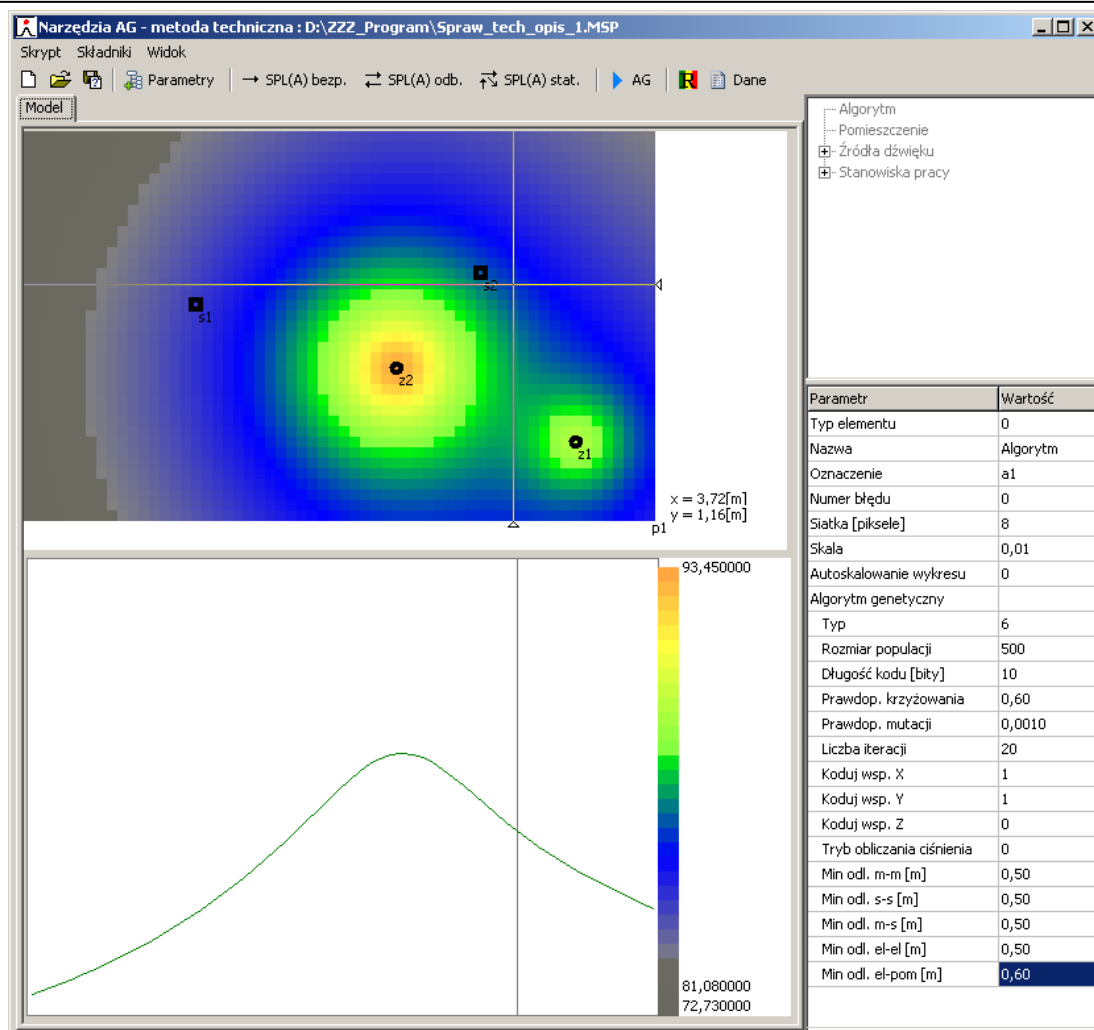
Przycisk paska narzędzi, przedstawiający literę R na trójbarwnym tle służy do tworzenia wykresów (Rys. 12) z naniesionymi obszarami o różnym stopniu ryzyka zawodowego [27] (nazywanymi dalej w skrócie wykresami rozkładu ryzyka zawodowego lub rozkładami ryzyka zawodowego). Obszary te obrazują ryzyko zawodowe jakie byłoby skutkiem 8-godzinnego narażenia na hałas pracownika przebywającego w tym obszarze. Ryzyko zawodowe oceniane jest zgodnie z wytycznymi normy PN-N-18002 w skali trójstopniowej. Kolorem zielonym zaznaczono obszary o ryzyku małym ( $L_{EX,8h} < 82\text{dB}$ ), kolorem żółtym – obszary o ryzyku średnim ( $85\text{dB} \geq L_{EX,8h} \geq 82\text{dB}$ ) a kolorem czerwonym – obszary o ryzyku dużym ( $L_{EX,8h} > 85\text{dB}$ ).



Rys. 12. Okno programu w trybie obliczeń – obszary ryzyka zawodowego.

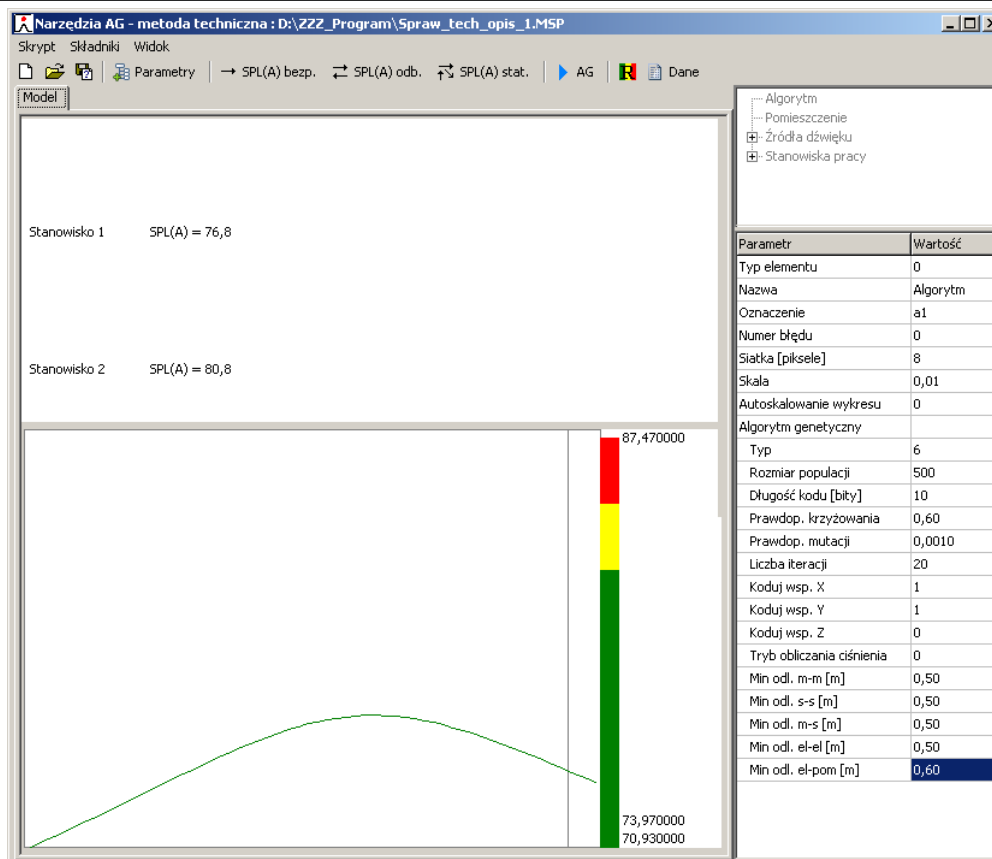
Wykres ryzyka zawodowego, podobnie jak wykresy rozkładu poziomego dźwięku A, wyznaczany jest dla ustalonego przekroju poziomego pomieszczenia.

Najważniejsza funkcja programu, czyli optymalizacja położenia źródeł hałasu i/lub stanowisk pracy, jest uruchamiana za pomocą przycisku paska narzędzi oznaczonego symbolem w postaci niebieskiego trójkąta i liter „AG”. Przykładowy wynik działania algorytmu przedstawiono na Rys. 13. Na wykresie w oknie programu przedstawiono rozkład poziomów dźwięku A w pomieszczeniu po wykonaniu optymalizacji położenia źródła „z1” za pomocą algorytmu genetycznego. Początkowy układ źródeł hałasu i stanowisk pracy był taki, jak prezentowany na Rys. 9 – Rys. 12.



Rys. 13. Okno programu w trybie obliczeń – symulacja rozkładu poziomu dźwięku A w pomieszczeniu po optymalizacji położenia źródła z1.

Ostatni z przycisków umieszczonych na pasku narzędzi, „Dane” służy do wyświetlania wyznaczonych przez program poziomów dźwięku A hałasu na stanowiskach pracy. Wygląd okna programu po uruchomieniu tej funkcji przedstawiono na Rys. 14. W lewym, górnym polu okna programu wyświetlono poziomy dźwięków A dla dwóch stanowisk pracy z modelu środowiska pracy przedstawionego na Rys. 13.



Rys. 14. Okno programu w trybie obliczeń – dane dotyczące poziomów dźwięku A na stanowiskach pracy.

Ważnym elementem opracowanego programu są skrypty z danymi do modelu obliczeniowego mające postać plików tekstowych z rozszerzeniem „msp”. W skryptach tych zapisane są najważniejsze parametry modelu obliczeniowego. Wprowadzony do programu model obliczeniowy może być zapamiętany w postaci pliku skryptowego na dysku komputera a następnie odczytany w dowolnym momencie. Zastosowanie plików skryptowych pozwala, przy każdorazowym uruchomieniu programu, zastąpić uciążliwe wprowadzanie do programu parametrów modelu obliczeniowego wczytywaniem tych parametrów z pliku.

### **PRZYKŁADOWE OBLICZENIA SYMULACYJNE I OPTIMALIZACYJNE**

Jako model akustycznego środowiska pracy przyjęto halę przemysłową o długości 61,6m, szerokości 36m i wysokości 6,4m i średnim współczynniku pochłaniania równym 0,55. W hali zostało umieszczonych osiem źródeł hałasu (oznaczonych z1 – z8) i osiem stanowisk pracy (oznaczonych s1 – s8).

---

Parametrami algorytmu genetycznego (chyba, że w podpisie rysunku podano inaczej): liczebność populacji – 20 osobników, prawdopodobieństwo krzyżowania – 0,6, prawdopodobieństwo mutacji – 0,001, minimalna odległość źródło – źródło – 0 m, minimalna odległość źródło – stanowisko – 0 m, minimalna odległość stanowisko – stanowisko – 0 m, minimalna odległość element – element – 0 m, a minimalna odległość elementu od ścian pomieszczenia – 0,5 m.

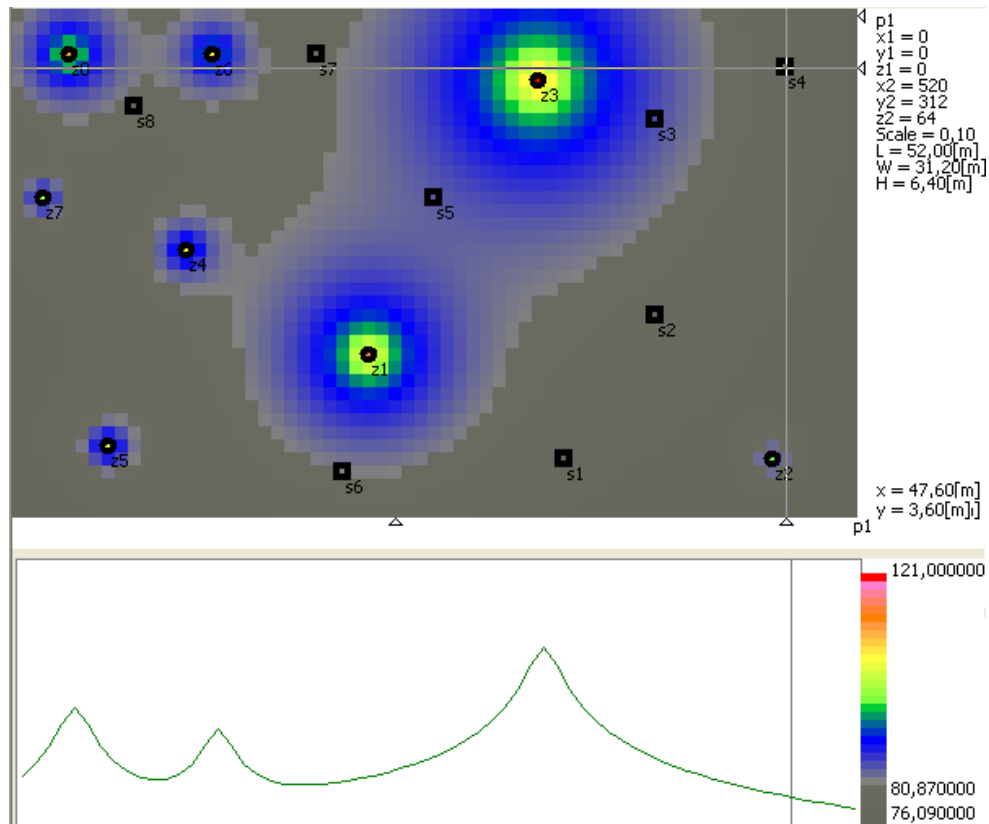
Na Rys. 15 przedstawiony jest przekrój poprzeczny pomieszczenia z wrysowanym rozkładem poziomu dźwięku A (w pokazanym przykładzie jest to pole fali bezpośredniej). Zestaw elementów środowiska pracy składa się z ośmiu maszyn (źródeł hałasu) oznaczonych symbolami od z1 do z8, oraz ośmiu stanowisk pracy oznaczonych symbolami od s1 do s8. Rozkład wartości poziomu dźwięku A obliczany jest w przekroju poziomym umieszczonym na wysokości stanowisk pracy. Przyjęto, że wszystkie punkty obserwacji służące do oceny narażenia na stanowisku pracy są umieszczone na jednej wysokości (1m nad podłogą).

Układ źródeł hałasu i stanowisk pracy przedstawiona na Rys. 15 jest lokalizacją początkową, czyli maszyny i stanowiska pracy służą jako układ odniesienia podczas wykonywania obliczeń za pomocą algorytmu genetycznego. Na Rys. 16 przedstawiono rozkład obszarów ryzyk zawodowego odpowiadający układowi źródeł z Rys. 15.

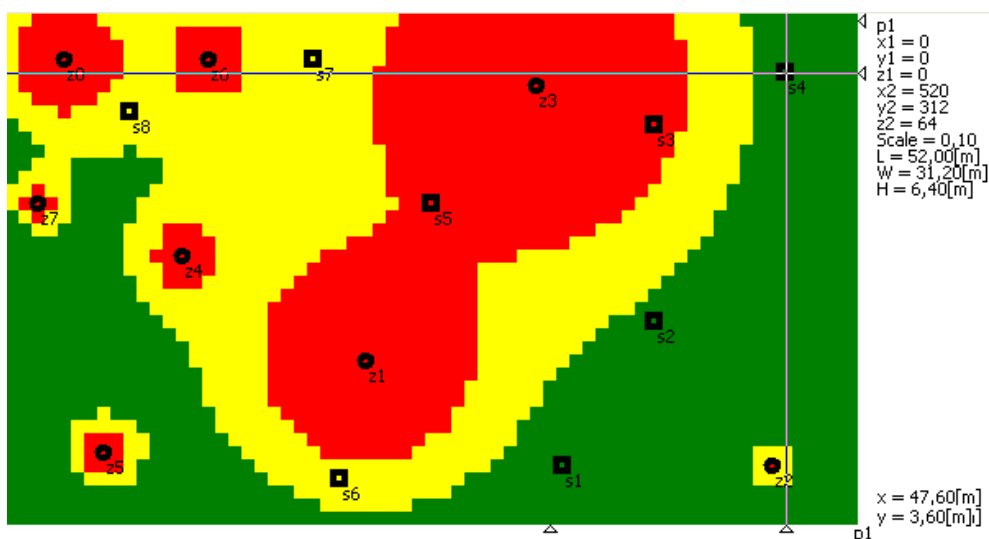
Na Rys. 17 i Rys. 18 pokazano przykładowe wyniki procesu optymalizacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego. W przykładach tych optymalizacji podlegało położenie źródeł hałasu, przy czym narzucano narzucone były ograniczenia co do minimalnej odległości pomiędzy źródłami hałasu. Dla przypadku, którego wyniki przedstawiono na Rys. 17 odległość minimalna wynosiła 1 m a dla przypadku, którego wyniki przedstawiono na Rys. 18 wynosiła 5 m. Z przedstawionych na rysunkach wykresów wynika, że algorytm umieścił źródła hałasu w taki sposób, że zachowana jest odległość minimalna między źródłami a jednocześnie narażenie na hałas pracowników na stanowiskach pracy jest poniżej wartości dopuszczalnych (ryzyko zawodowe jest małe)

Kolejne przykłady obliczeń optymalizacyjnych przedstawiono na Rys. 19 i Rys. 20. W przykładach tych optymalizacji podlegała zarówno położenie źródeł hałasu jak i stanowisk pracy. Przyjęto że odległości minimalne pomiędzy elementami nie powinny być mniejsze niż 5 m (Rys. 19) i 20 m (Rys. 20). Jak widać również w tym przypadku algorytm znalazł takie ustawienie elementów środowiska pracy, aby jak najlepiej spełnić wymagania dotyczące odległości minimalnej a jednocześnie ograniczyć ryzyko zawodowe związane z ekspozycją na hałas. Niemniej jednak w przypadku przedstawionym na Rys. 20 działanie funkcji kary

związanej z minimalną odległością pomiędzy elementami środowiska pracy spowodowało, że stanowisko s4 znalazło się w obszarze średniego ryzyka zawodowego.

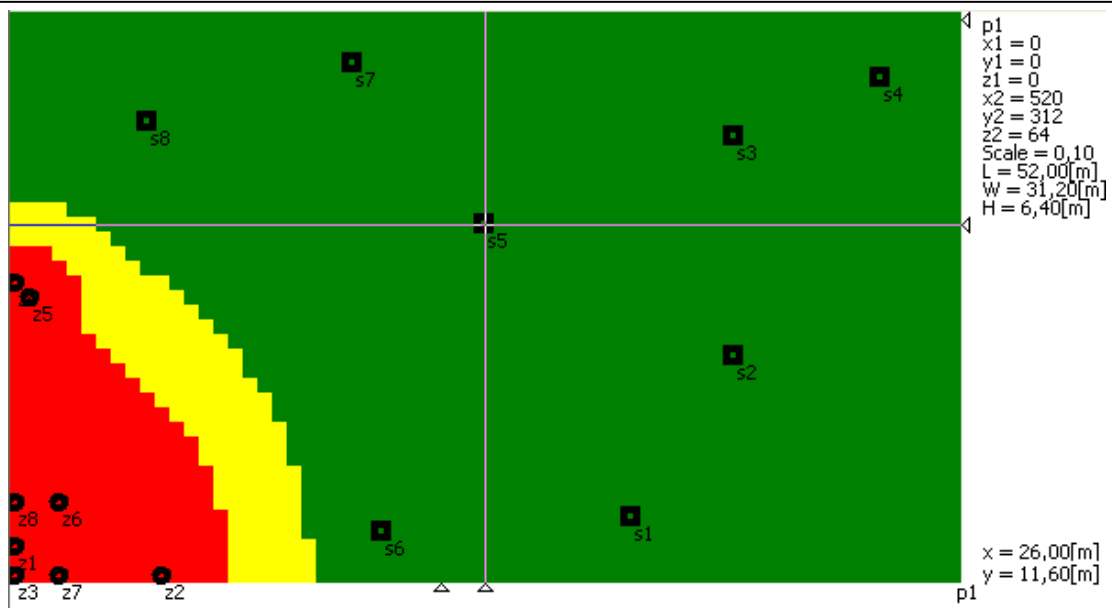


Rys. 15. Układ elementów środowiska pracy oraz rozkład poziomy dźwięku A w przekroju pomieszczenia na poziomie stanowisk pracy przed uruchomieniem algorytmu genetycznego (wykres odniesienia).

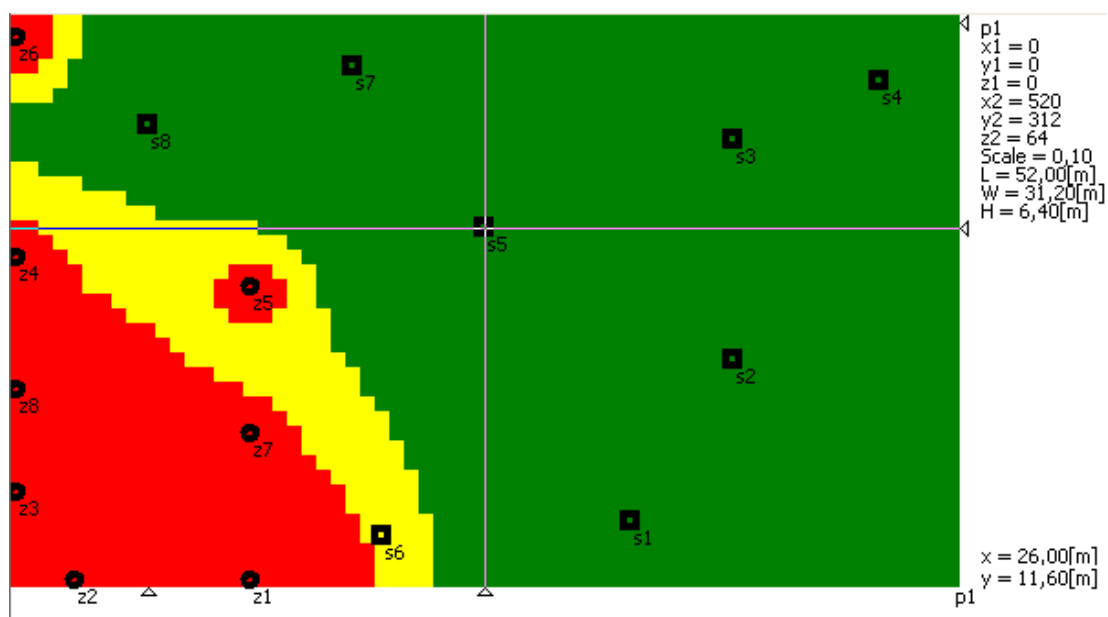


Rys. 16. Rozkład ryzyka zawodowego przed uruchomieniem algorytmu genetycznego (wykres odniesienia).

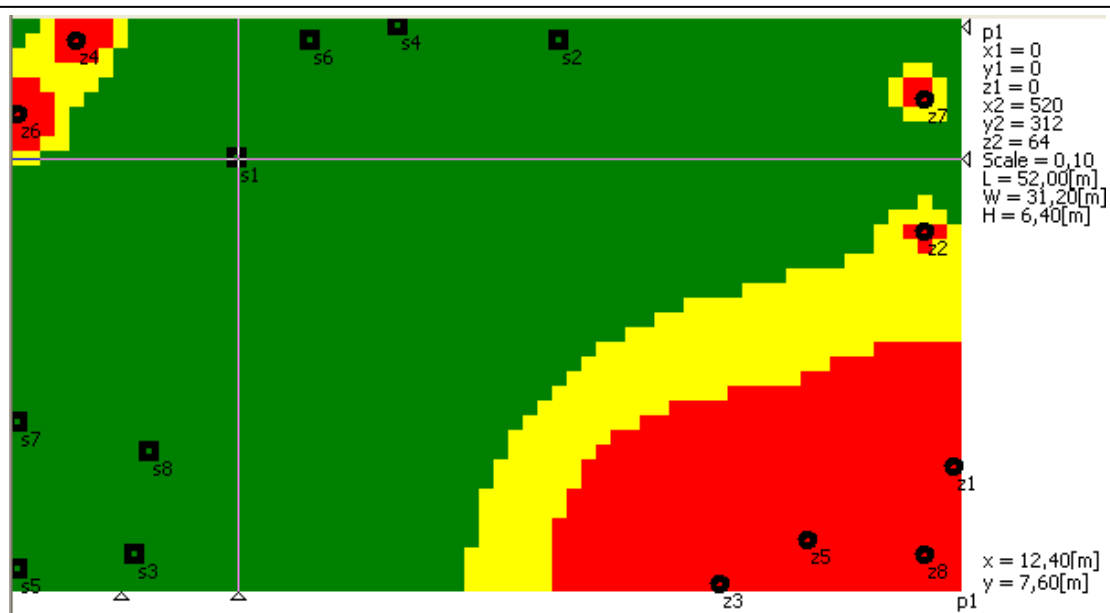




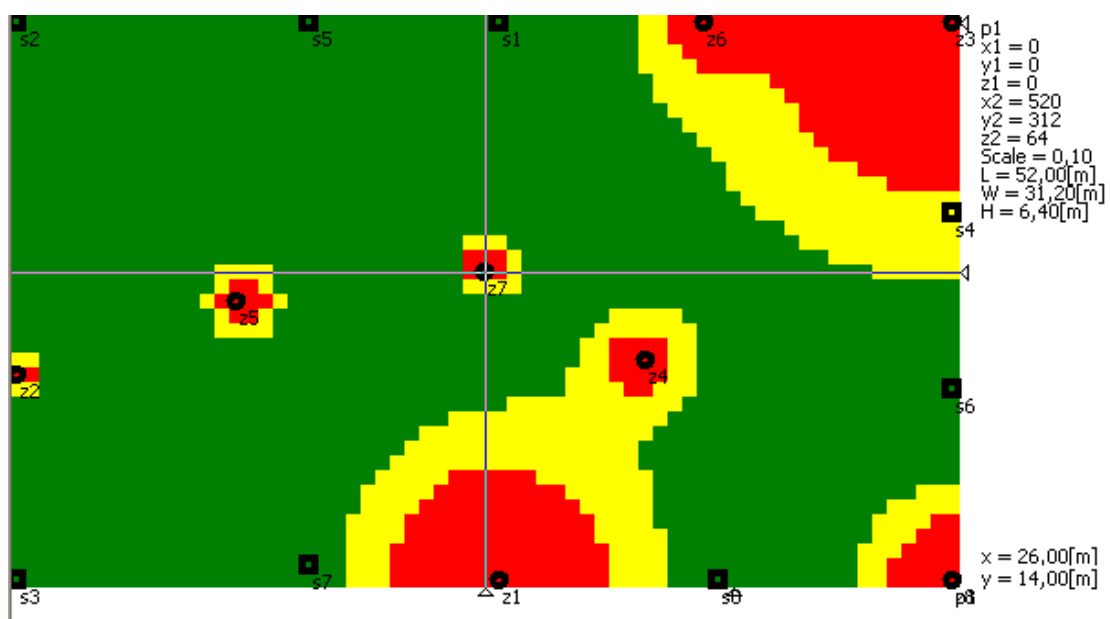
Rys. 17. Układ elementów środowiska pracy i rozkład ryzyka zawodowego uzyskany w wyniku działania algorytmu genetycznego (optymalizacja położenia źródeł hałasu, odległość minimalna maszyna – maszyna – 1 m).



Rys. 18. Układ elementów środowiska pracy i rozkład ryzyka zawodowego uzyskany w wyniku działania algorytmu genetycznego (optymalizacja położenia źródeł hałasu, odległość minimalna maszyna – maszyna – 5 m).



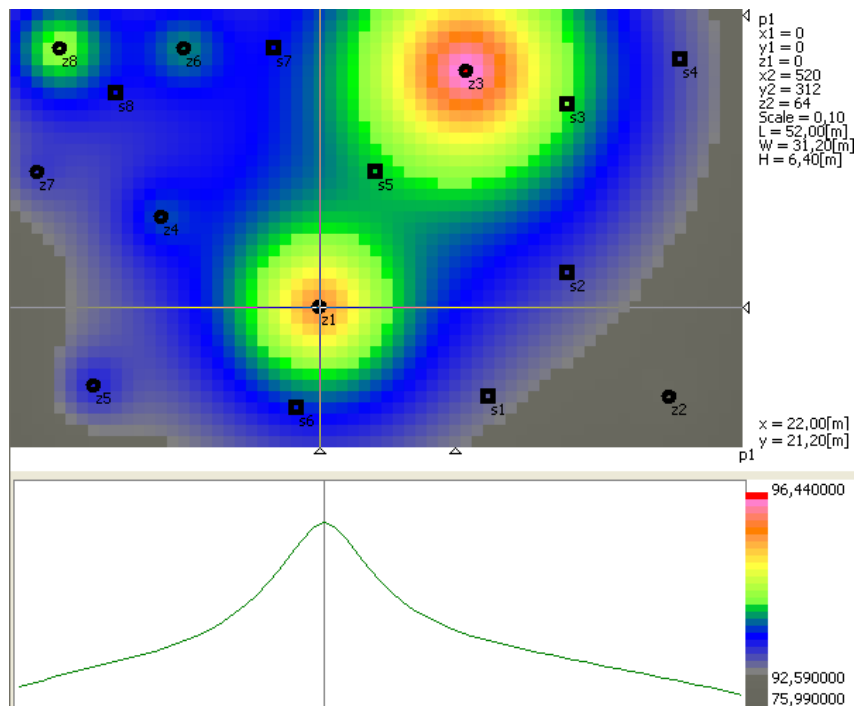
Rys. 19. Układ elementów środowiska pracy i rozkład ryzyka zawodowego uzyskany w wyniku działania algorytmu genetycznego (optymalizacja położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy, odległość minimalna element – element – 5 m).



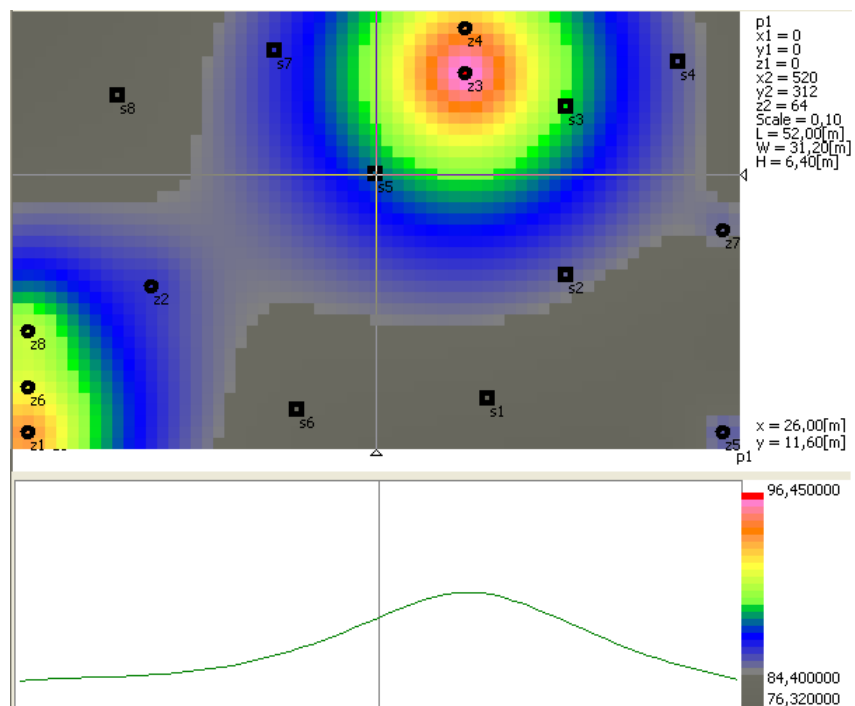
Rys. 20. Układ elementów środowiska pracy i rozkład ryzyka zawodowego uzyskany w wyniku działania algorytmu genetycznego (optymalizacja położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy, odległość minimalna element – element – 20 m).

Na Rys. 21 i Rys. 22 przedstawiono kolejne przykłady obliczeń optymalizacyjnych. Na Rys. 21 przedstawiono rozkład poziomy dźwięku A w przekroju pomieszczenia. Na Rys. 22 przedstawiono układ elementów środowiska pracy w pomieszczeniu oraz rozkład poziomy dźwięku A w przekroju pomieszczenia uzyskany w wyniku optymalizacji położenia źródeł hałasu z wyłączeniem z tego procesu źródła z3. Na obu wykresach zastosowano ustalony

schemat kolorów służących odwzorowaniu poziomów dźwięku A („Autoskalowanie” wyłączone).



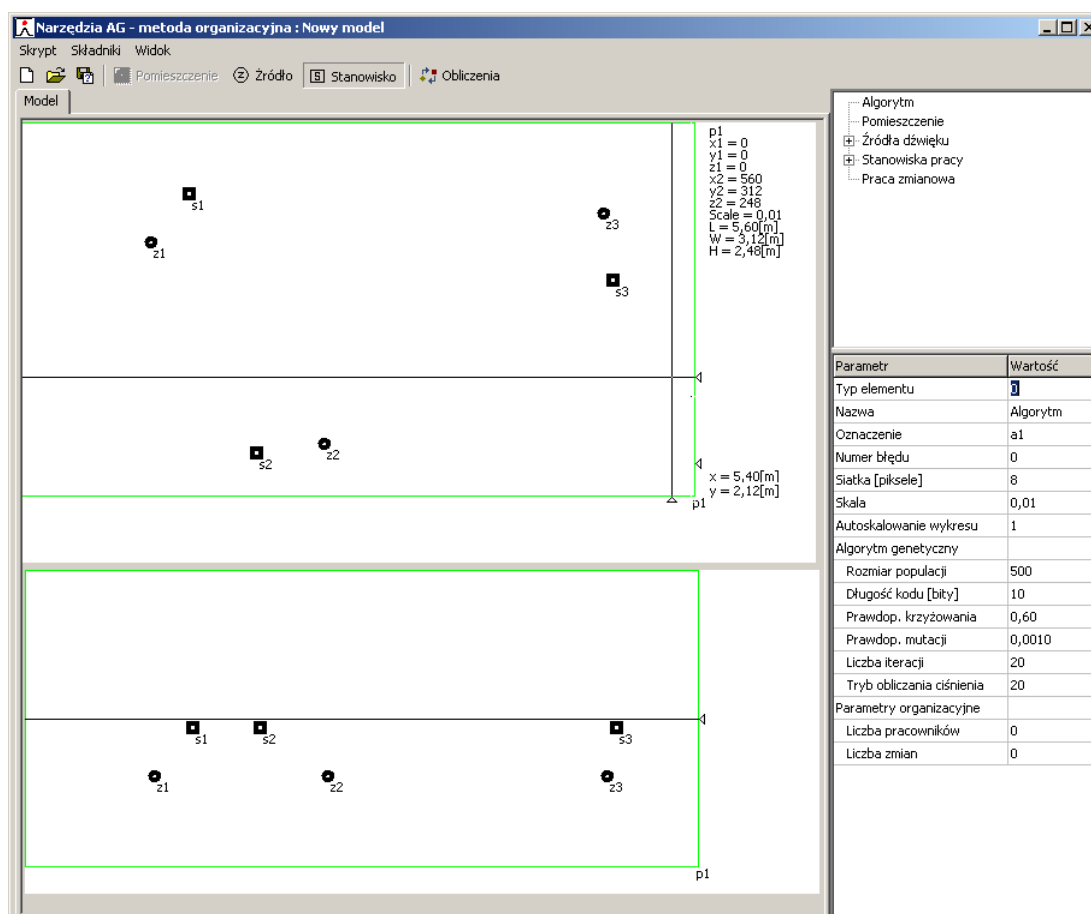
Rys. 21. Rozkład poziomy dźwięku A fali bezpośredniej w przekroju pomieszczenia na wysokości 3,2m.



Rys. 22. Układ elementów środowiska pracy oraz rozkład poziomy dźwięku A (w przekroju pomieszczenia na wysokości 3,2m) uzyskany w wyniku działania algorytmu genetycznego (optymalizacja położenia źródeł hałasu) w przypadku, gdy z procesu optymalizacji wyłączono źródło z3.

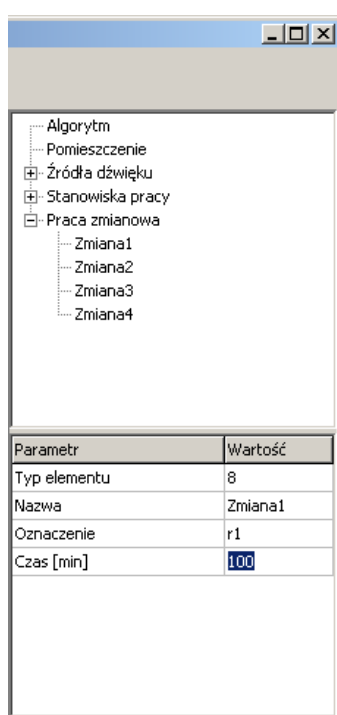
## PROGRAM DO OPTIMALIZACJI ROTACJI PRACOWNIKÓW NA STANOWISKACH PRACY POD KĄTEM OGRANICZENIA EKSPOZYCJI NA HAŁAS.

Widok okna programu do optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy przedstawiono na Rys. 23. Interfejs użytkownika i część funkcji programu są takie jak w programie do optymalizacji położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy. Nowymi elementami są elementy związane z parametryzacją i optymalizacją rotacji pracowników na stanowiskach pracy (zmianami), w szczególności forma wizualnego prezentowania wyników działania algorytmu genetycznego. W programie zachowano możliwość graficznego projektowania modelu akustycznego środowiska pracy (Rys. 23). Podobnie jak przy metodzie technicznej użytkownik ma możliwość zdefiniowania obszaru pomieszczenia pracy i naniesienia w tym obszarze elementów środowiska pracy (źródeł hałasu i stanowisk pracy). Parametry tych elementów mogą być następnie edytowane w odpowiednich tabelach drzewa parametrów.



Rys. 23. Okno programu do optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy w trybie edycji parametrów – tabela parametrów algorytmu obliczeniowego.

W drzewie parametrów programu oraz w jego tabelach zostały umieszczone parametry związane z rotacją pracowników na stanowiskach pracy i podziałem czasu pracy na zmiany. W tabeli z parametrami algorytmu obliczeniowego (Rys. 23 po prawej) znajdują się parametry metody organizacyjnej rozumianej jako rotacja pracowników. Parametrami tymi są liczba pracowników biorących udział w procesie rotacji („Liczba pracowników”) oraz liczba zmian na jaki podzielony jest czas pracy („Liczba zmian”). Domyślnie wartości parametrów są zerowe i należy je wprowadzić przed przystąpieniem obliczeń symulacyjnych. Po podaniu liczby zmian są one automatycznie dodawane do drzewa modelu (Rys. 24), które umożliwia wprowadzenie czasu trwania każdej zmiany.

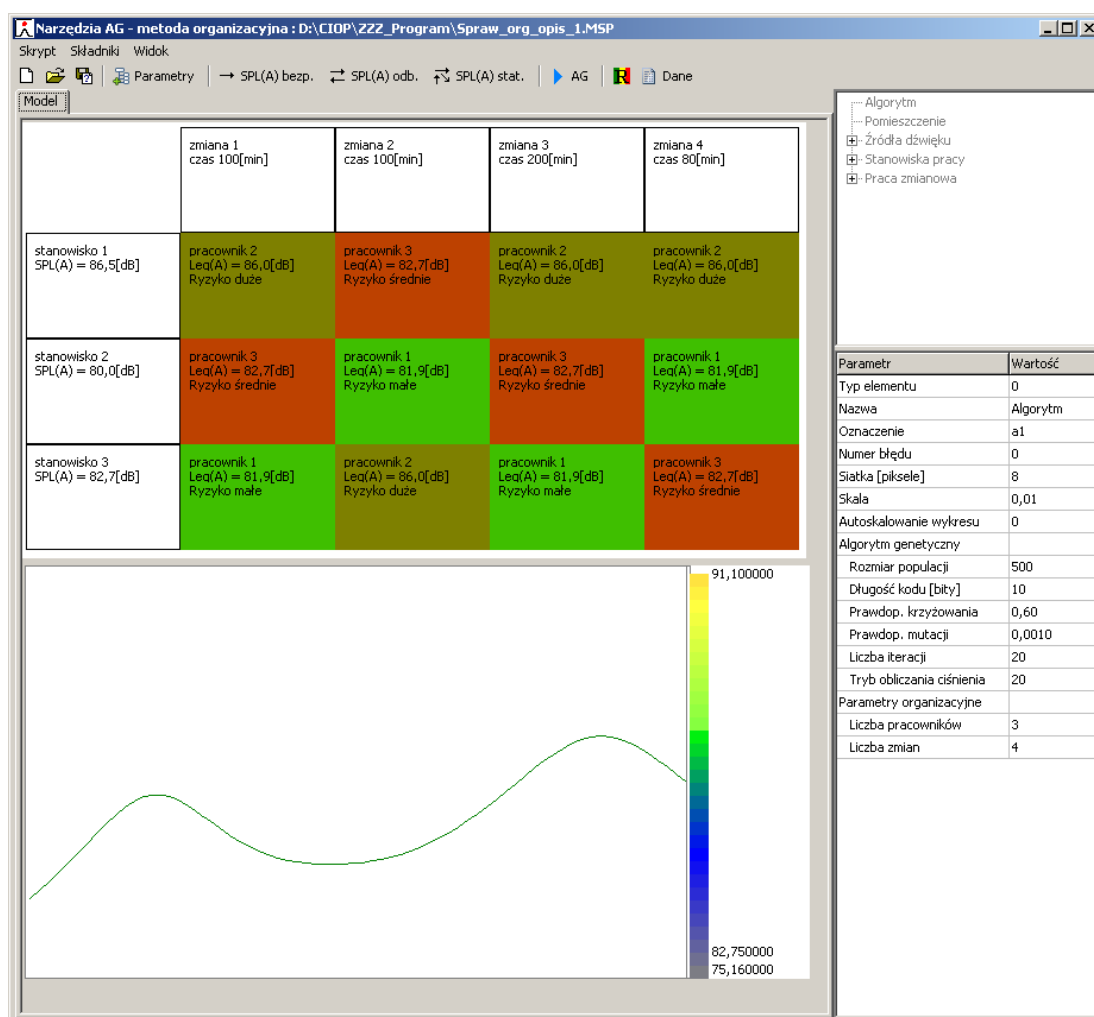


Rys. 24. Fragment okna programu do optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy w trybie edycji parametrów – tabela parametrów zmian.

W trybie obliczeń (Rys. 25) użytkownik programu ma do dyspozycji takie same funkcje jak w programie do optymalizacji położenia źródeł hałasu i stanowisk pracy, przy czym różny jest sposób realizacji części z nich. Bez zmian pozostawiono funkcje prognozowania (symulacji) rozkładów poziomego dźwięku A w wybranym przekroju pomieszczenia z zastosowaniem trzech różnych metod oraz funkcję wyświetlania danych na temat poziomów dźwięku A panujących na stanowiskach pracy. Inny jest sposób realizacji pozostałych dwóch funkcji.

Przycisk oznaczony symbolem „AG” uruchamia proces optymalizacji rotacji pracowników na stanowiskach pracy. Przycisk paska narzędzi, przedstawiający literę R na

trójbarwnym tle służy do graficznej prezentacji tabeli z harmonogramem zmian, będących wynikiem procesu optymalizacji. W tabeli tej (Rys. 25) wiersze odnoszą się do kolejnych stanowisk pracy, zaś kolumny do kolejnych zmian. W utworzonych w ten sposób polach tabeli wpisani są pracownicy, zajmujący w trakcie danej zmiany dane stanowisko pracy. Dla zwiększenia czytelności tabeli każdemu z pracowników przypisywany jest określony kolor. W polach tabeli dla każdego pracownika podano równoważny poziom dźwięku A za czas narażenia wynoszący 480 minut, czyli wartość równą poziomowi ekspozycji wyznaczonemu dla 8-godzinnego dnia pracy. W przypadku każdego z pracowników oceniono również w skali trójstopniowej ryzyko zawodowe zgodnie z wytycznymi normy PN-N-18002.

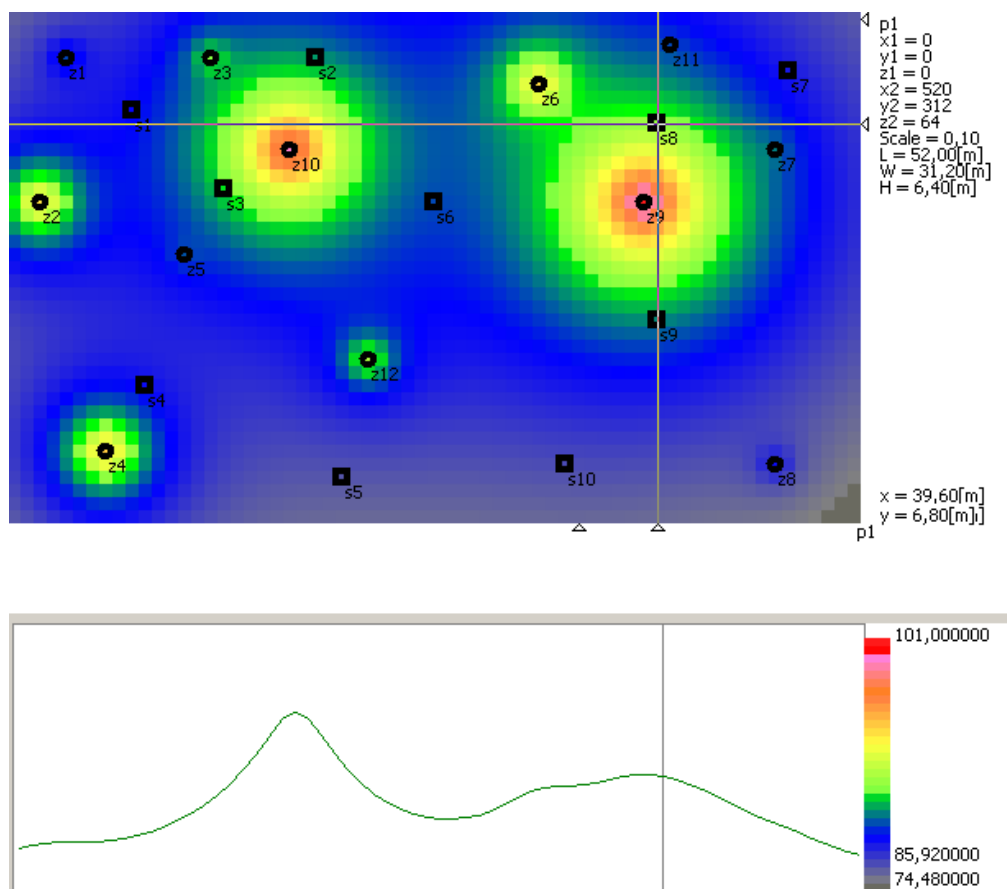


Rys. 25. Okno programu do optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy w trybie obliczeń – tabela harmonogramu zmian.

Program do optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy również obsługuje pliki skryptowe, w których zapamiętywane są parametry modelu obliczeniowego.

### PRZYKŁADOWE OBLICZENIA SYMULACYJNE I OPTIMALIZACYJNE

Poniżej przedstawiono wyniki optymalizacji procesu rotacji pracowników na stanowiskach pracy dla przykładowego modelu akustycznego środowiska pracy. Na Rys. 26 przedstawiono rozmieszczenie elementów środowiska pracy oraz rozkład poziomów dźwięku A w przekroju pomieszczenia. Poziom dźwięku A przekraczał wartość 85 dB tylko na stanowisku s8 (85,9dB), natomiast wartość 82 dB na stanowiskach s2, s3 i s9. Przyjęto następujące wartości parametrów algorytmu genetycznego: liczebność populacji – 100, prawdopodobieństwo krzyżowania 0,6, prawdopodobieństwo mutacji – 0,005, liczba iteracji – 300.



Rys. 26. Rozkład poziomego dźwięku A w przekroju pomieszczenia.

Harmonogram zmian zapisany w chromosomie najlepszego osobnika populacji początkowej przedstawiono w Tab. 1. Dla dwóch pracowników (2 i 4) wyznaczone ryzyko zawodowe jest duże, jednak należy zauważyć, że pracownicy ci powtarzają się na stanowiskach pracy w czasie trwania jednej zmiany. Harmonogram zmian uzyskany w wyniku optymalizacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego przedstawiono w Tab. 2. W przypadku tego harmonogramu ryzyko zawodowe dla czterech pracowników (4, 5, 6, i 7) jest średnie, a dla pozostałych małe. Dla wszystkich pracowników wyznaczone ryzyko zawodowe jest więc akceptowalne

Tab. 1. Tabela z harmonogramem zmian zapisana w chromosomie najlepszego osobnika populacji początkowej (Przykład 5A).

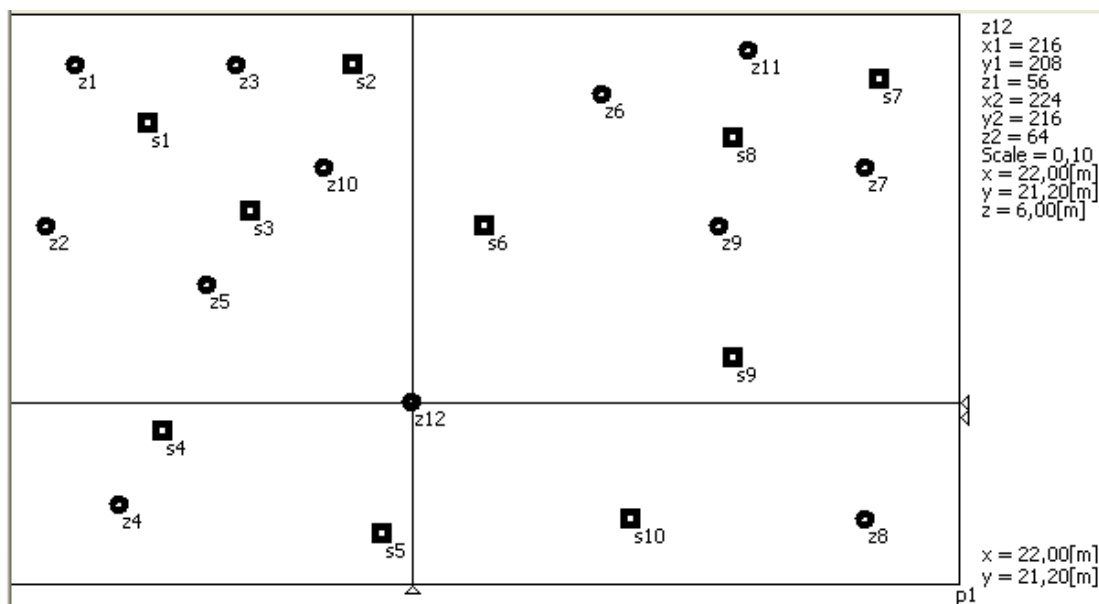
	zmiana 1 czas 100[min]	zmiana 2 czas 100[min]	zmiana 3 czas 80[min]	zmiana 4 czas 200[min]
Stanowisko1 SPL(A) = 79,9[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 76,0[dB] Ryzyko małe	pracownik 9 Leq(A) = 79,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 5 Leq(A) = 79,1[dB] Ryzyko małe
Stanowisko2 SPL(A) = 83,0[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 7 Leq(A) = 83,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże
Stanowisko3 SPL(A) = 84,5[dB]	pracownik 7 Leq(A) = 83,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 78,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże
Stanowisko4 SPL(A) = 79,6[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 10 Leq(A) = 82,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe
Stanowisko5 SPL(A) = 76,7[dB]	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 7 Leq(A) = 83,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 78,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 8 Leq(A) = 79,0[dB] Ryzyko małe
Stanowisko6 SPL(A) = 81,4[dB]	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 9 Leq(A) = 79,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 7 Leq(A) = 83,0[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko7 SPL(A) = 79,1[dB]	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 9 Leq(A) = 79,2[dB] Ryzyko małe
Stanowisko8 SPL(A) = 85,9[dB]	pracownik 4 Leq(A) = 85,4[dB] Ryzyko duże	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 10 Leq(A) = 82,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże
Stanowisko9 SPL(A) = 82,7[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 7 Leq(A) = 83,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 79,1[dB] Ryzyko małe	pracownik 10 Leq(A) = 82,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko10 SPL(A) = 77,1[dB]	pracownik 10 Leq(A) = 82,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 79,1[dB] Ryzyko małe	pracownik 1 Leq(A) = 69,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 10 Leq(A) = 82,9[dB] Ryzyko średnie

Tab. 2. Tabela z harmonogramem zmian zapisana w chromosomie najlepszego osobnika będącego wynikiem procesu optymalizacji (Przykład 5A).

	zmiana 1 czas 100[min]	zmiana 2 czas 100[min]	zmiana 3 czas 80[min]	zmiana 4 czas 200[min]
Stanowisko1 SPL(A) = 79,9[dB]	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 10 Leq(A) = 81,0[dB] Ryzyko małe	pracownik 9 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 8 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe
Stanowisko2 SPL(A) = 83,0[dB]	pracownik 5 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 80,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 6 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko3 SPL(A) = 84,5[dB]	pracownik 10 Leq(A) = 81,0[dB] Ryzyko małe	pracownik 8 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 4 Leq(A) = 82,2[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 83,4[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko4 SPL(A) = 79,6[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 81,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 7 Leq(A) = 83,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 10 Leq(A) = 81,0[dB] Ryzyko małe
Stanowisko5 SPL(A) = 76,7[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 9 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 10 Leq(A) = 81,0[dB] Ryzyko małe	pracownik 4 Leq(A) = 82,2[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko6 SPL(A) = 81,4[dB]	pracownik 6 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 81,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 9 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe
Stanowisko7 SPL(A) = 79,1[dB]	pracownik 7 Leq(A) = 83,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 4 Leq(A) = 82,2[dB] Ryzyko średnie	pracownik 8 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe
Stanowisko8 SPL(A) = 85,9[dB]	pracownik 4 Leq(A) = 82,2[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 83,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko9 SPL(A) = 82,7[dB]	pracownik 9 Leq(A) = 80,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 5 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 80,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 2 Leq(A) = 81,3[dB] Ryzyko małe
Stanowisko10 SPL(A) = 77,1[dB]	pracownik 1 Leq(A) = 80,2[dB] Ryzyko małe	pracownik 3 Leq(A) = 79,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 2 Leq(A) = 81,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 1 Leq(A) = 80,2[dB] Ryzyko małe



Poniżej przedstawiono kolejny przykład optymalizacji harmonogramu zmian. Rozmieszczenie źródeł hałasu i stanowisk pracy w modelu akustycznego środowiska pracy przedstawiono na Rys. 27.



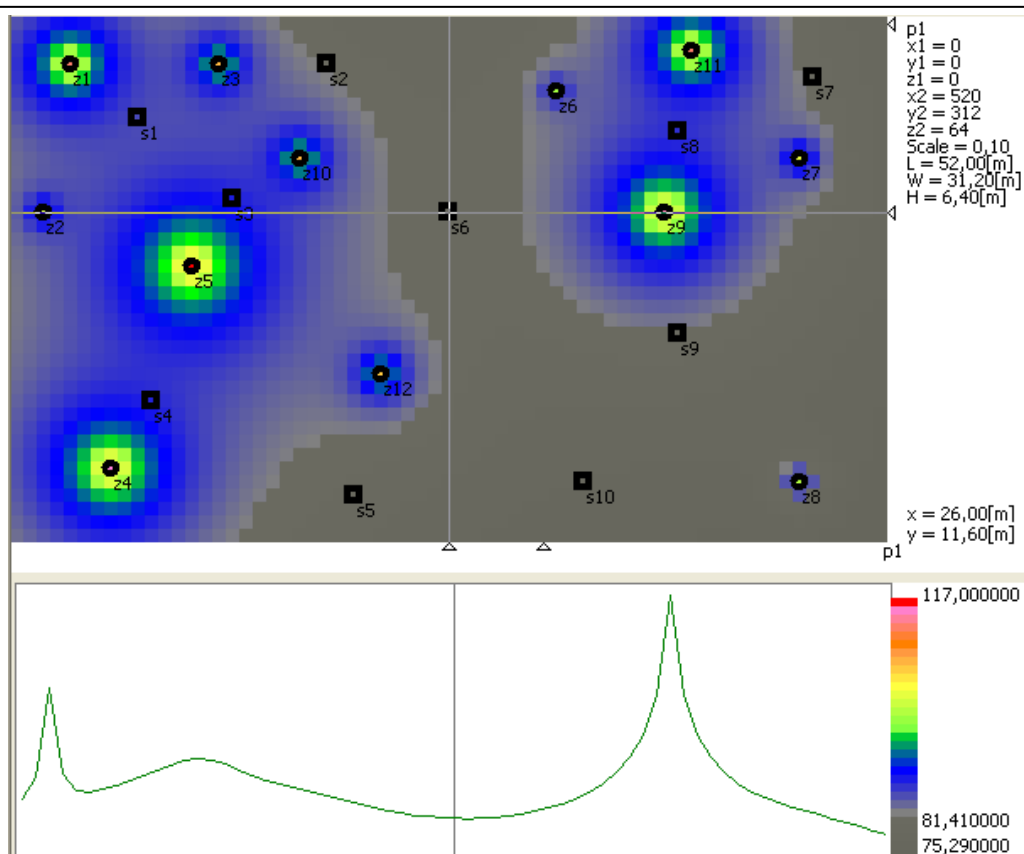
Rys. 27. Przekrój pomieszczenia z wprowadzonymi elementami środowiska pracy.

Parametry akustyczne modelu środowiska pracy przedstawione są w Tab. 3. Jak widać na czterech stanowiskach pracy poziom dźwięku A przekracza 85 dB co oznacza, że ekspozycja na hałas pracowników przebywających na tych stanowiskach przez 8 godzin dziennie przekraczałaby wartości dopuszczalne.

Tab. 3. Poziomy dźwięku A na stanowiskach pracy.

Stanowisko	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poziom dźwięku A [dB]	85,3	81,9	87,7	87,3	80,5	81,4	81,7	86,7	82,1	77,8

Na Rys. 28 przedstawiono rozkład poziomu dźwięku A fali bezpośredniej w przekroju poziomym pomieszczenia na wysokości stanowisk pracy.



Rys. 28. Rozkład poziomu dźwięku A fali bezpośredniej w przekroju pomieszczenia.

W Tab. 4 przedstawiono tabelę z harmonogramem zmian, który odpowiada zawartości chromosomu najlepszego osobnika populacji bazowej, czyli losowo zainicjowanej populacji, na podstawie której prowadzone są obliczenia optymalizacyjne za pomocą algorytmu genetycznego. Jak widać podobnie jak w poprzednim przypadku w momencie inicjacji w tabeli harmonogramu pojawiają się pracownicy, którzy są zatrudnieni w tym samym czasie na różnych stanowiskach. Dla kilku pracowników ryzyko zawodowe związane z narażeniem na hałas jest ocenione jako duże.

Tab. 4. Tabela z harmonogramem czasu pracy zapisana w chromosomie najlepszego osobnika populacji bazowej

	zmiana 1 czas 100[min]	zmiana 2 czas 100[min]	zmiana 3 czas 80[min]	zmiana 4 czas 200[min]
Stanowisko1 SPL(A) = 85,3[dB]	pracownik 5 Leq(A) = 80,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 1 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko2 SPL(A) = 81,9[dB]	pracownik 9 Leq(A) = 84,6[dB] Ryzyko średnie	pracownik 3 Leq(A) = 79,9[dB] Ryzyko małe	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże	pracownik 3 Leq(A) = 79,9[dB] Ryzyko małe
Stanowisko3 SPL(A) = 87,7[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże	pracownik 2 Leq(A) = 85,2[dB] Ryzyko duże	pracownik 4 Leq(A) = 85,7[dB] Ryzyko duże
Stanowisko4 SPL(A) = 87,3[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 85,2[dB] Ryzyko duże	pracownik 4 Leq(A) = 85,7[dB] Ryzyko duże	pracownik 9 Leq(A) = 84,6[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże
Stanowisko5 SPL(A) = 80,5[dB]	pracownik 6 Leq(A) = 78,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 6 Leq(A) = 78,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże
Stanowisko6 SPL(A) = 81,4[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże	pracownik 10 Leq(A) = 77,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 1 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko7 SPL(A) = 81,7[dB]	pracownik 10 Leq(A) = 77,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 1 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 78,5[dB] Ryzyko małe	pracownik 2 Leq(A) = 85,2[dB] Ryzyko duże
Stanowisko8 SPL(A) = 86,7[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 9 Leq(A) = 84,6[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże
Stanowisko9 SPL(A) = 82,1[dB]	pracownik 7 Leq(A) = 88,0[dB] Ryzyko duże	pracownik 2 Leq(A) = 85,2[dB] Ryzyko duże	pracownik 2 Leq(A) = 85,2[dB] Ryzyko duże	pracownik 9 Leq(A) = 84,6[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko10 SPL(A) = 77,8[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 86,6[dB] Ryzyko duże	pracownik 4 Leq(A) = 85,7[dB] Ryzyko duże	pracownik 5 Leq(A) = 80,3[dB] Ryzyko małe	pracownik 5 Leq(A) = 80,3[dB] Ryzyko małe

W Tab. 5 przedstawiono końcowy wynik obliczeń w postaci tabeli z harmonogramem pracy zmianowej uzyskanym po zdekodowaniu zawartości chromosomu najlepszego osobnika z ostatniej populacji wygenerowanej podczas działania algorytmu genetycznego. Dzięki zastosowaniu algorytmu genetycznego uzyskano poprawę warunków pracy. W wyniku rotacji dla żadnego pracownika nie występuje przekroczenie dopuszczalnej ekspozycji na hałas mimo przekroczeń dopuszczalnych poziomów ekspozycji na czterech stanowiskach pracy.

Tab. 5. Tabela z harmonogramem czasu pracy zapisana w chromosomie najlepszego osobnika po zakończeniu procesu optymalizacji (liczebność populacji 100)

	zmiana 1 czas 100[min]	zmiana 2 czas 100[min]	zmiana 3 czas 80[min]	zmiana 4 czas 200[min]
Stanowisko10 SPL(A) = 77,8[dB]	pracownik 3 Leq(A) = 84,7[dB] Ryzyko średnie	pracownik 9 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 83,1[dB] Ryzyko średnie	pracownik 10 Leq(A) = 83,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko9 SPL(A) = 82,1[dB]	pracownik 2 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 10 Leq(A) = 83,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 3 Leq(A) = 84,7[dB] Ryzyko średnie	pracownik 4 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko8 SPL(A) = 86,7[dB]	pracownik 10 Leq(A) = 83,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 83,1[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko7 SPL(A) = 81,7[dB]	pracownik 6 Leq(A) = 83,1[dB] Ryzyko średnie	pracownik 4 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 8 Leq(A) = 85,0[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko6 SPL(A) = 81,4[dB]	pracownik 9 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 8 Leq(A) = 85,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 9 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko5 SPL(A) = 80,5[dB]	pracownik 4 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko4 SPL(A) = 87,3[dB]	pracownik 7 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 10 Leq(A) = 83,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 3 Leq(A) = 84,7[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko3 SPL(A) = 87,7[dB]	pracownik 8 Leq(A) = 85,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 7 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie	pracownik 8 Leq(A) = 85,0[dB] Ryzyko średnie	pracownik 9 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko2 SPL(A) = 81,9[dB]	pracownik 5 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 3 Leq(A) = 84,7[dB] Ryzyko średnie	pracownik 5 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 6 Leq(A) = 83,1[dB] Ryzyko średnie
Stanowisko1 SPL(A) = 85,3[dB]	pracownik 1 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 1 Leq(A) = 84,4[dB] Ryzyko średnie	pracownik 4 Leq(A) = 82,5[dB] Ryzyko średnie	pracownik 2 Leq(A) = 84,9[dB] Ryzyko średnie

## Literatura

1. Airaksinen T., Heikkola E., *Multiobjective muffler shape optimization with hybrid acoustic modelling*, Reports of the Department of Mathematical Information Technology, Series B. Scientific Computing, No. B. 6/2010, University of Jyväskylä, Finland
2. Asawarungsangkul Krisada, Nanthavanij Suebsak, *Design of optimal noise hazard control strategy with budget constraint*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2006, Vol. 12, No 4, 355 – 367,
3. Baulac M., Defrance Jérôme, Jean Philippe, *Optimization with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface*, Applied Acoustics, Vol. 69, 2008, pp. 332 – 342.
4. Berger E. H. (ed.), *The Noise Manual*, AIHA Press, Fairfax, VA, USA, 2003
5. Chiu Min-Chie, *Shape optimization of multi-chamber mufflers with plug-inlet tube on a venting process by genetic algorithms*, Applied Acoustics, Vol. 71, 2010, pp. 495 – 505.
6. Crocker M. J., *Handbook of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1998.
7. Davis D., *Optimisation of noise control treatments for staged noise management programs using genetic algorithm*, Proc. of ACOUSTICS 2009, 23 – 25 November 2009, Adelaide, Australia.
8. Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiem i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001

- 
9. Engel Z., Koradecka D., Augustyńska D., Kowalski P., Morzyński L., Żera J., *Zagrożenia wibroakustyczne*, w Koradecka D. (red.) *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, CIOP-PIB, Warszawa, 2008.
  10. Engel Z., Piechowicz J., Pleban D., Strychniewicz L., *Hale przemysłowe, maszyny i urządzenia – wybrane problemy wibroakustyczne*, CIOP-PIB, Warszawa, 2009,
  11. Goldberg D., E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1998,
  12. Gounot Y. J. R., Musafir R. E., *Genetic algorithms: a global search tool to find optimal equivalent source set*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 322, 2009, pp. 282 – 298.
  13. GUS, Warunki pracy w 2009 r., GUS, 2010.
  14. Gwiazda Tomasz Dominik, *Algorytmy genetyczne kompendium – Tom I Operator krzyżowania dla problemów numerycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2007.
  15. Gwiazda Tomasz Dominik, *Algorytmy genetyczne kompendium – Tom II Operator mutacji dla problemów numerycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2007.
  16. Haupt R. L., Haupt S. E., *Practical genetic algorithms*, John Wiley and Sons Inc, 1998,
  17. Lan Tian-Syung, Chiu Min-Chie, *Identification of noise sources in factory's sound field by using genetic algorithm*, Applied Acoustics, Vol. 69, 2008, pp. 733 – 750.
  18. Makarewicz G., *Application of genetic algorithm in active noise control system*, Archives of Acoustics, Vol. 32, No. 4, 2007, pp. 839 – 849.
  19. Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1999.
  20. Morzyński L., *Możliwości zastosowania algorytmów genetycznych do ograniczania zawodowej ekspozycji na hałas*, Materiały 56 Otwartego Seminarium z Akustyki OSA 2009, 15-18 Września, Warszawa – Goniądz, str. 389 – 394.
  21. Morzyński L. *The use of genetic algorithms for limitation of occupational exposure to noise – simulation research*, Proc. of NOISE CONTROL'10, Zamek Książ, Wałbrzych, 6-9 June 2010.
  22. Rothlauf F., *Representations for genetic and evolutionary algorithms*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
  23. Sato S., Hayashi T., Takizawa A., Tani A., Kawamura H., *Acoustic design of theatres applying genetic algorithm*, Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, Vol. 4, No. 1, 2004, pp. 41 – 51.
  24. Sato, S., Otori, K., Takizawa, A., Sakai, H., Ando, Y., Kawamura, H., *Applying genetic algorithms to the optimum design of a concert hall*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 258, 2002, pp. 517 – 526.
  25. Sutton P., *Process plant noise, evaluation and control*, Applied Acoustics, Vol. 9, No. 1, 1976, pp. 17 – 33,
  26. Yeh Long-Jyi, Chang Ying-Chun, Chiu Min-Chie, *Application of genetic algorithm to the shape optimization of a constrained double-chamber muffler with extended tubes*, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 12, No. 3, 2004, pp. 189 – 199.
  27. Zawieska W. (redakcja), *Ryzyko zawodowe – metodyczne podstawy oceny*, CIOP-PIB, Warszawa, 2007.
-