

УДК 534.014.4

# МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ ШУМУ ТА ЕМП У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

**О. Мамонтов**, старший викладач кафедри охорони праці,  
**Ю. Колтун**, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-мережної інженерії,  
**О. Мамонтов**, студент факультету інфокомунікацій,  
 Харківський національний університет радіоелектроніки

**Ключові слова:** шум, електромагнітне поле, надвисока частота, оптимізація, шкідливий вплив, координата, випадкова величина, цільова функція.

**Keywords:** noise, electromagnetic field, microwave range, optimization, adverse factors, coordinate, random value, objective function.

Ідвигнені рівні акустичного шуму й електромагнітних полів (ЕМП) на робочих місцях — це небезпечні та шкідливі виробничі чинники, які характеризуються кумулятивною дією на людей [1—3]. Тривалий вплив цих чинників на людину в процесі трудової діяльності призводить до погіршення самопочуття, професійної патології та зниження працездатності.

Найявні принципи, методи і відповідні технічні засоби захисту [2, 3] не завжди ефективні з різних причин. Захист часом здійснюється шляхом скорочення тривалості робочої зміни. При цьому доза шкідливого впливу на людину не повинна перевищувати допустимої величини. Для здійснення виробничого процесу за таких умов потрібне збільшення чисельності працівників, що спричинить додаткові фінансові витрати підприємства.

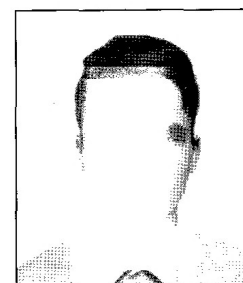
Екранування, застосування різних відбивальних і поглинальних покриттів стін, перекриттів й інших поверхонь приміщення часто ускладнено з технологічних причин, міркувань пожежної безпеки, естетики тощо.



О. Мамонтов



Ю. Колтун



О. Мамонтов

Застосування засобів індивідуального захисту (вкладок у вушні раковини, навушників, шоломів, захисних окулярів, костюмів тощо) часто ускладнює роботу людей, викликає дискомфорт, необхідність додаткових технологічних перерв та дотримання заходів гігієнічного характеру.

Архітектурно-планувальні рішення, спрямовані на зниження зазначених шкідливих факторів, зазвичай приймаються в процесі проектування, модернізації виробництв і також пов'язані зі значними фінансовими витратами, тривалими термінами будівництва.

Аналіз літератури та нормативно-технічних документів [4—8] засвідчив, що на сьогодні розміщення джерел шуму (ДШ) всередині виробничого приміщення, що реалізує принцип захисту відстанню, не розглядається як оптимізаційна задача. Наявний інженерний досвід засновано на директивних вказівках та рекомендаціях із розміщення технологічного встаткування і робочих місць під час проектування виробничих процесів. За такого підходу неможливо досягти максимального позитивного ефекту від реалізації цього принципу, внаслідок чого люди за виробничих умов піддаються додатковим і небезпечним шкідливим впливам. Цим і пояснюється актуальність завдання.

Очевидна доцільність розроблення методу оптимального розміщення та орієнтації джерел шуму (або ЕМП), що дозволяє мінімізувати шкідливий вплив на людей у процесі трудової діяльності.

*Мета статті* — доказ можливості мінімізації шкідливого впливу на людей від джерел шуму (або ЕМП). Мінімізація шкідливого впливу досягається шляхом розрахунку оптимальних координат джерел та їх розміщення всередині виробничого приміщення.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ШУМУ У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

Визначення оптимальних координат джерел із заданим кроком відліку відноситься до дискретної оптимізації і може вирішуватися різними методами, описаними в [9]. Як цільова функція в процесі визначення оптимальних координат ДШ пропонується розглядати середнє енергетичне навантаження на людину протягом робочої зміни:

$$F_{\text{ш}} = EN_{\text{срш}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^8 (I_{\text{Аji}} \cdot t_j) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $EN_{\text{срш}}$  — середнє енергетичне навантаження шуму на людину протягом робочої зміни, Вт×год/м<sup>2</sup>;  $I_{\text{Аji}}$  — ефективне значення інтенсивності звуку на  $j$ -му робочому місці в октавній смузі  $i$  з урахуван-

ням характеристики «А» вимірювачів шуму [10—12], Вт/м<sup>2</sup>;  $t_j$  — тривалість шумового впливу протягом робочої зміни, год;  $n$  — кількість робочих місць (осіб) всередині приміщення;  $j$  — номер робочого місця.

Обмеженнями у цій задачі є:

- максимально допустимі рівні звукового тиску на середньгеометричних частотах октавних смуг (граничний спектр);
- габарити приміщення, які накладаються на координати ДШ (ДШ не можуть перебувати за межами приміщення);
- умови розбіжності координат ДШ (різні ДШ не можуть перебувати одночасно в одному місці).

Обмеження на координати ДШ, зумовлені розмірами приміщення, записуються у такий спосіб:

$$\begin{aligned} X_1 < A; X_2 < A; \dots; X_m < A; \\ Y_1 < B; Y_2 < B; \dots; Y_m < B; \\ Z_1 < H; Z_2 < H; \dots; Z_m < H, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $X_p; Y_p; Z_p$  — координати ДШ, м;  $m$  — кількість джерел;  $A, B, H$  — розміри приміщення, м.

Умови розбіжності координат ДШ записуються як  $X_1 \neq X_2 \neq \dots \neq X_i; Y_1 \neq Y_2 \neq \dots \neq Y_i; Z_1 \neq Z_2 \neq \dots \neq Z_i$ . (3)

Вихідні (початкові) дані:

- \* кількість робочих місць (працівників) усередині приміщення  $n$ ;
- \* кількість ДШ усередині приміщення  $m$ ;
- \* координати робочих місць  $X_j; Y_j; Z_j$ , м ( $j$  — номер робочого місця);
- \* розміри приміщення  $A; B; H$ , м;
- \* кількість циклів обчислювань  $K$ ;
- \* номер поточного циклу  $k$ ;
- \* середній коефіцієнт звукопоглинання у приміщенні  $\alpha_{\text{срi}}$ ;
- \* потужність ЕМП  $W_{\text{pi}}$ , яке випромінюється ДШ в октавній смузі  $i$  ( $p$  — номер ДШ);
- \* максимально допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах  $L_{\text{допi}}$ , дБ;
- \* крок відліку прямокутних координат ДШ  $\Delta h$ , м;
- \* крок відліку кутових координат ДШ  $\Delta \beta$ , °;
- \* тривалості шумового впливу на працівників протягом робочої зміни  $t_1; \dots; t_n$ , год.

Результатом розв'язання задачі є значення координат ДШ ( $X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_m, Z_1, \dots, Z_m, \beta_1, \dots, \beta_m$ ), за яких цільова функція досягає мінімуму і виконуються задані обмеження.

### ОПИСАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ТА АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ

Запропонований метод розрахунку оптимальних координат ДШ засновано на випадковому пошуку

(методі Монте-Карло) [9, 13]. Алгоритм представлено на рис. 1. Розрахунок передбачає сталість шуму і відсутність когерентності звукових хвиль джерел. У ньому не враховуються загасання звуку в повітрі, а також характеристики спрямованості відбивальних поверхонь стін і кутів, пропорції приміщення, наявність звукопоглинальних поверхонь технологічного встаткування, меблів і людей. За необхідності ці фактори можуть бути включені в розрахункові формули, що не позначається на суті постановки і розв'язання оптимізаційної задачі.

Величина  $I_{Aji}$  у формулі (1) розраховується за формулою:

$$I_{Aji} = I_{ji} \cdot 10^{0,1A_i} \quad (4)$$

де  $I_{ji}$  — інтенсивність звуку на робочому місці  $j$  в октавній смузі  $i$  без корекції, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_i$  — величина корекції звукового тиску на середньгеометричній частоті октавної смуги  $i$  згідно з характеристикою «А» [10].

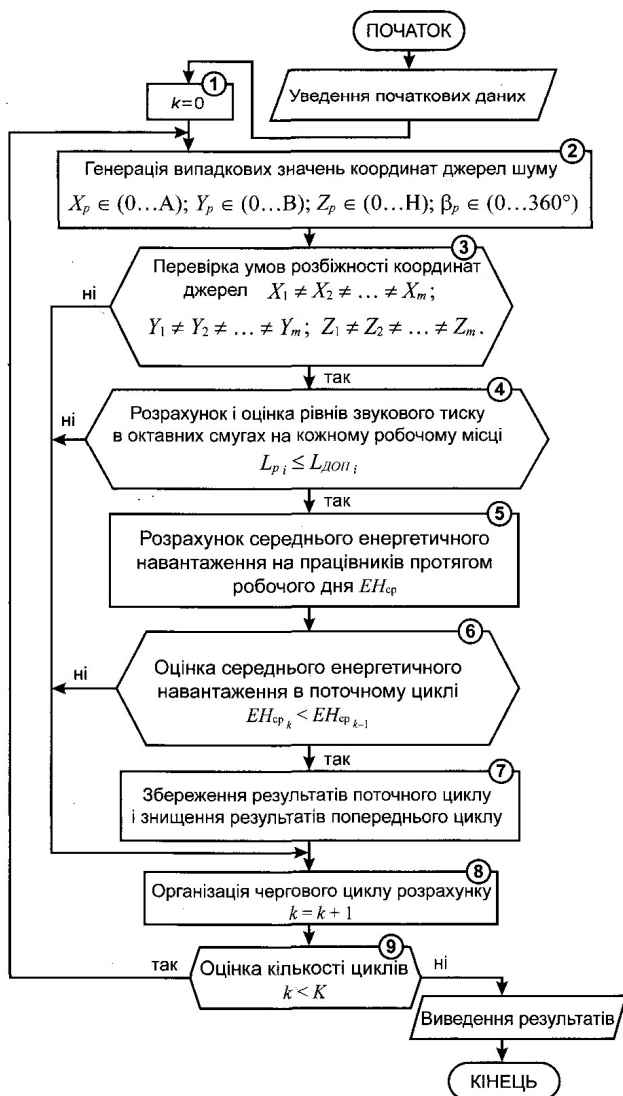


Рис. 1. Алгоритм розрахунку оптимальних координат ДШ

Fig. 1. The algorithm for calculating the optimal coordinates of noise sources

Інтенсивність звуку  $I_{ji}$  розраховується за правилом складання шумів [2,3,12] шляхом арифметичного складання інтенсивностей прямого та дифузного (багатократно відбитого) звуків:

$$I_{ji} = I_{прji} + I_{дифji}$$

Інтенсивність прямого звуку на робочому місці без урахування корекції «А» розраховується з урахуванням характеристик спрямованості ДШ за формулою:

$$I_{прji} = \frac{1}{4\pi} \sum_1^m \frac{W_{pi} \cdot \Phi_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)}{(X_j - X_p)^2 + (Y_j - Y_p)^2 + (Z_j - Z_p)^2} \quad (5)$$

де  $\Phi_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)$  — фактор спрямованості ДШ;  $\beta_p$  — кутова координата ДШ (кут між проекцією осі головного пелюстка на площину  $XOY$  і віссю  $OX$ , рис. 5а).

Інтенсивність дифузного звуку розраховується за формулою

$$I_{дифji} = 4(1 - \alpha_{срi}) \sum_{j=1}^m W_{ji} / \alpha_{срi} S, \quad (6)$$

де  $S$  — сумарна площа звукопоглинальних поверхонь, м<sup>2</sup>.

Відповідний рівень звукового тиску, створюваний на окремому робочому місці усіма ДШ, розраховується за формулою:

$$L_{ji} = 20 \lg \sqrt{\rho V (I_{прji} + I_{дифji})} / P_0. \quad (7)$$

За кожної реалізації випадкового стохастичного процесу координатам ДШ присвоюються випадкові дискретні значення, рівномірно розподілені у відповідних інтервалах із заданим кроком відліку. На основі цього розраховуються й оцінюються значення цільової функції за виконання заданих обмежень. У результаті виконання численних реалізацій зберігається той результат, який є найбільш вигідним з точки зору мінімізації цільової функції. Зі збільшенням числа реалізацій зростає ймовірність досягнення глобального оптимуму цільової функції.

Для зниження кількості обчислень може бути організовано цілеспрямований пошук рішення, заснований на комбінації методів випадкового пошуку (методу Монте-Карло) і поетапної (покрокової) локальної оптимізації в околі рішення, отриманого на попередньому кроці [9]. На кожному етапі можна використовувати алгоритм, представлений на рис. 1, зі зазначеннями околів координат ДШ. Через обмеженість обсягу цієї статті комбінований алгоритм не наведено.

#### КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Комп'ютерна реалізація виконувалася у середовищі *Mathcad* [14]. Як приклад розглянуто виробниче

приміщення з розмірами (10x8x4) м. Середній коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha_{cp}$  в октавній смузі з середньою геометричною частотою 1000 Гц дорівнює 0,7. Для простоти розрахунків ураховано шуми лише в октавній смузі зі середньою геометричною частотою 1000 Гц. У приміщенні перебувало два джерела шуму зі звуковою потужністю  $W_{pi} = 10^{-6}$  Вт.

У ході розрахунку визначалися прямокутні координати двох ДШ уздовж горизонтальних осей  $OX$  і  $OY$ , а також кути  $\beta_1$  і  $\beta_2$ , що визначають напрямки джерел у горизонтальній площині. Координати ДШ уздовж осі  $OZ$  (висоти від підлоги) були задані і дорівнювали висоті 1 м. Розрахунок рівнів звуко-

вого тиску й енергетичних навантажень на людину виконувався для висоти 1,55 м від підлоги, що відповідає середньостатистичній висоті розташування вушної раковини людини у положенні стоячи.

Генерація випадкових значень координат ДШ здійснювалася за допомогою відповідних функцій середовища *Mathcad*:

$$\begin{cases} X1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(A-1))+1 \\ Y1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(B-1))+1. \\ \beta 1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(180)) \end{cases} \quad (8)$$

Значення випадкової величини  $X1$  рівномірно розподілені в межах  $(1 \dots A-1)$  м, значення величини  $Y1$  — в межах  $(1 \dots B-1)$ , а величин  $\beta 1$  і  $\beta 2$  — в межах  $(0 \dots 180^\circ)$ .

При цьому забезпечені мінімальні відстані, величиною 1 м від ДШ до стін, що дозволяє нехтувати спрямованістю стін і кутів.

Результати оптимізаційних розрахунків наведено на рис. 2—5. На рис. 2—4 представлено різні приклади оптимального розташування ізотропних (ненаправлених) ДШ відносно робочих місць і відповідне розподілення рівнів звукового тиску в приміщенні.

На рис. 5 а, б, в подано приклад оптимального розташування вузько спрямованих (анізотропних) ДШ відносно робочих місць і відповідне розподілення рівнів звукового тиску в приміщенні.

Відповідні характеристики спрямованості анізотропних ДШ у горизонтальній площині представлені на рис. 6, де

$$\Phi 1(\Theta) = (e^{-q \left[ \frac{2\pi(\Theta-\beta_1)}{360} \right]^2} + a/1+a) \cdot b, \quad (9)$$

$$\Phi 2(\Theta) = (e^{-q \left[ \frac{2\pi(\Theta-\beta_2)}{360} \right]^2} + a/1+a) \cdot b, \quad (10)$$

де  $\Phi 1$  і  $\Phi 2$  — фактори спрямованості відповідно першого та другого ДШ;  $\Phi 3$  — фактор спрямованості ізотропного джерела ( $\Phi 3 = 1$ , на рис. 5 а не показано);  $\Theta$  — кут відхилення від напрямку головного пелюстка ДШ у горизонтальній площині, градус;  $a, b, q$  — допоміжні величини ( $a = 0, 2; b = 4; q = 10$ ).

Реальними спрямованими (анізотропними) джерелами шуму за виробничих умов є газові пальники,

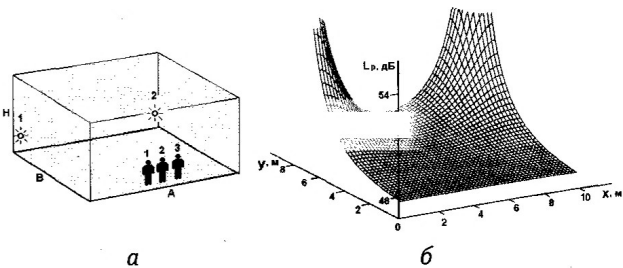


Рис. 2. Ізотропні джерела. Варіант 1  
Fig. 2. Isotropic sources. Option 1

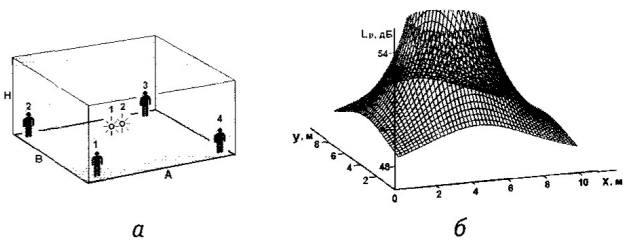


Рис. 3. Ізотропні джерела. Варіант 2  
Fig. 3. Isotropic sources. Option 2

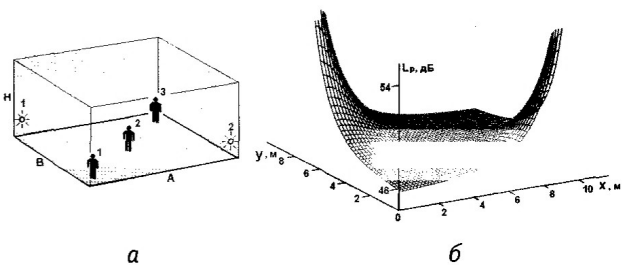


Рис. 4. Ізотропні джерела. Варіант 3  
Fig. 4. Isotropic sources. Option 3

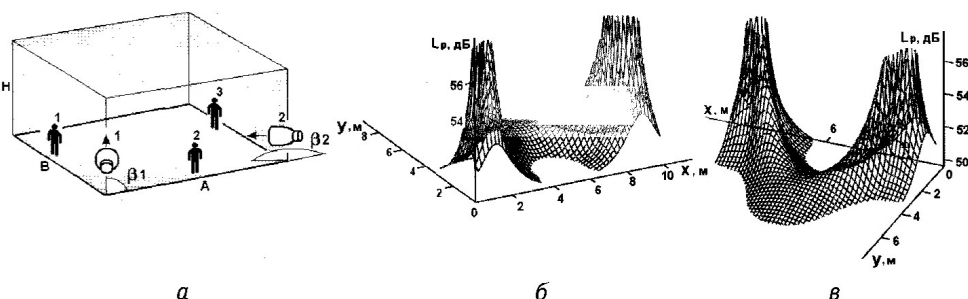


Рис. 5. Анізотропні джерела  
Fig. 5. Anisotropic sources

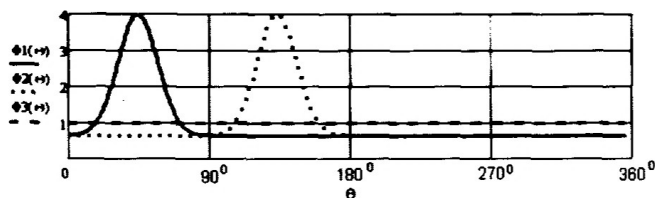


Рис. 6. Характеристики спрямованості джерел шуму в приміщенні

Fig. 6. The characteristics of the referral sources of noise in the room

металообробні й деревообробні верстати, що мають захисні огорожі, щити і кожухи, а також інше технологічне обладнання. Якщо геометричні розміри огорожувальних елементів близькі до довжини хвилі, то, внаслідок явища дифракції, за ними утворюються «тіньові» зони. Наприклад, захисне огороження розмірами (340—400) мм створює у верстаті помітну спрямованість звуку на частотах понад 1000 Гц (за довжини хвилі, меншої від 0,34 м).

Аналізуючи звукові поля за оптимального розміщення і спрямованості ДШ, можна перекоонатися, що у всіх випадках джерела були віддалені від людей на максимальну відстань і спрямовані у вільний від них простір. Реальне зниження рівнів звукового тиску склало до 2 дБ порівняно з довільним (неоптимальним) розміщенням ДШ. За близького розташування робочих місць від ДШ ця величина досягає (3—4) дБ. Для віддалених робочих місць вона становить до 1 дБ. Однак і в цих випадках позитивний ефект очевидний унаслідок кумулятивної дії підвищеного рівня шуму на організм людини.

Для практичної реалізації запропонованого методу знадобиться попереднє зняття характеристик спрямованості джерел. Упровадження запропонованого методу дозволить додатково знижувати вплив шуму й ЕМП на людей у процесі трудової діяльності й тим самим сприяти поліпшенню стану їх здоров'я і підвищенню продуктивності праці.

### РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ЕМП НВЧ-ДІАПАЗОНУ

Розміщення зазначених джерел виконується аналогічно розміщенню джерел шуму. Через малу довжину хвилі всі робочі місця містяться в дальніх зонах кожного із джерел. Усі джерела також містяться в дальніх зонах відносно один до одного. Передбачаються сталість випромінюваної потужності й відсутність когерентності електромагнітних хвиль. Не враховується загасання ЕМП

у повітрі, а також його відбивання від поверхонь приміщення, технологічного обладнання, меблів та людей.

Для розв'язання цієї задачі також може бути використаний алгоритм (рис. 1) за винятком блока 4. Цільова функція розраховується за формулою:

$$F_{\text{ЕМП}} = EN_{\text{ср}} \text{ЕМП} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (I_j \cdot t_j) \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $EN_{\text{ср}} \text{ЕМП}$  — середнє енергетичне навантаження на людину протягом однієї робочої зміни, Вт×год/м<sup>2</sup>;  $I_j$  — значення інтенсивності ЕМП на  $j$  — му робочому місці, створюване одночасною роботою всіх джерел.

$$I_j = \frac{1}{4\pi} \sum_{p=1}^m \frac{W_p \cdot \text{КСД}_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)}{(X_j - X_p)^2 + (Y_j - Y_p)^2 + (Z_j - Z_p)^2}, \quad (12)$$

де  $W_p$  — потужність ЕМП, яке випромінюється джерелом у навколишнє середовище, Вт;  $\text{КСД}_p$  — коефіцієнт спрямованої дії джерела.

Результати розміщення джерел ЕМП НВЧ-діапазону якісно збігаються з результатами розміщення джерел шуму, і тому в цій статті не наводяться.

### ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

У результаті аналізу наявних принципів, методів і засобів захисту людей від підвищених рівнів шуму й ЕМП за виробничих умов стала очевидною необхідність подальших досліджень у цьому напрямку. Для цього авторами цієї статті виконано постановку оптимізаційної задачі розрахунку оптимальних координат джерел шуму (або ЕМП) у виробничому приміщенні та запропоновано метод її розв'язання. Для практичної реалізації запропонованого методу та доведення можливості досягти поставленої мети розроблено алгоритм і комп'ютерну програму розрахунку оптимальних координат. За їх допомогою розраховано оптимальні координати джерел і звукові поля, що відповідають різним варіантам розміщення робочих місць у приміщенні.

Наукова новизна полягає у постановці оптимізаційної задачі, що включає цільову функцію та обмеження, а також у запропонованому методі розв'язання, заснованому на методі випадкового пошуку (методі Монте-Карло).

Практична значимість цієї роботи полягає у підтвердженні мінімізації шкідливого впливу підвищених рівнів шуму й ЕМП на людей за допомогою запропонованого методу. Матеріали роботи можуть бути використані з метою охорони праці за організації нових і раціоналізації наявних виробничих процесів, за яких діють зазначені шкідливі виробничі фактори.