

## УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ ЗІ СКАНУВАННЯМ ПРОМЕНЮ У ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДЕФЛЕКТОРІВ

### Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених частин проблеми. Актуальність і постановка задачі

В сучасних лазерних приладах часто використовується випромінювання у відкритому просторі [1, 2]: у вимірювачах дальності, лідачах, комунікаційних, шоу-системах, системах лазерної терапії, озброєння, воєнної техніки та інших. В залежності від загальної та питомої потужності це може створювати небезпеку поразки людей, тварин та інших об'єктів, які опинилися у зоні випромінювання. Для воєнної сфери у прямій постановці, осліплююча лазерна зброя заборонена додатком до Женевської конвенції від 10.10.1980 р. (протокол IV, прийнятий в Видне 13 жовтня 1995 року) [3]. Але існує низка пристроїв військово-технічного та цивільного призначення, які виконують сканування навколишнього простору лазерним випромінюванням та створюють небезпеку випадкової поразки людей. Тому питання управління безпекою лазерного випромінювання, що сканує у відкритому просторі, **є актуальним**.

Завдяки низькій вартості у практиці широко використовуються електромагнітні сканери (дефлектори) [4], недоліком яких є нерівномірність розподілу енергії по поверхні освітлювання, а саме, суттєве (у 10-15 і більш разів) перевищення дози на межі діапазону у порівнянні з серединою та усередненими показниками діапазону сканування у цілому [2]. Може скластись ситуація, коли на більшості діапазону сканування, випромінювання не створює небезпеки, але на дуже малих крайових ділянках така небезпека існує. Це робить **актуальним** питання лазерної безпеки скануючого випромінювання в різних ділянках зони сканування.

Існуючі підходи звичайно базуються на аналізі статичних характеристик лазерного випромінювання без урахування динаміки його руху [5-6]. В кращому випадку пропонується розраховувати енергетичну експозицію окремих ділянок опромінення на підставі аналізу динаміки руху променя, але далі цього рекомендації не йдуть.

**Метою роботи** є розробка та вдосконалення підходів до управління рівнем лазерної безпеки випромінювання, яке сканується у відкритому просторі за допомогою електромагнітних дефлекторів. Додатковою метою є дослідження техніко-економічних та **соціально-економічних** факторів лазерної безпеки.

© В.Л. Шевченко, А.М. Турейчук, О.А. Лаптев, 2005

**Викладення основного матеріалу**

Введемо позначення.  $D_x$  – рівень небезпеки розповсюдження та застосування лазерних пристроїв, в залежності від дії фактору  $x$  (окремо:  $D_M$  – від вартості;  $D_{Vm}$  – від масогабаритних показників пристрою;  $D_{Ju}$  – від рівня юридичного регулювання видів діяльності пов’язаних з лазерними технологіями;  $D_P$  – від потужності випромінювання);  $M$  – вартість;  $J_u$  – рівень юридичного регулювання видів діяльності пов’язаних з лазерними технологіями (в умовних експертних балах);  $P, P' = P/S$  – потужність та питома потужність лазерного випромінювання;  $S$  – площа освітлювання;  $m$  – маса;  $l_x, l_y, l_z$  – лінійні розміри за трьома висьями;  $V$  – обсяг;  $Vm = \sqrt{V^2 + m^2 + l_x^2 + l_y^2 + l_z^2}$  – узагальнена оцінка масогабаритних показників пристрою.

В [1], одними з основних факторів лазерної небезпеки визначені невелика ціна, яка обумовлює доступність придбання лазерів та невеликі масогабаритні показники, які спрощують несанкціоновані доставки та використання лазерів в місцях чутливих до впливу факторів екологічної небезпеки. Відповідні залежності можуть бути представлені за допомогою логістичних SL- функцій [7]  $D_M(M) = SL_M(-M)$ ,  $D_{Vm}(Vm) = SL_{Vm}(-Vm)$  (рис. 1а). Аналогічно можна представити залежність рівня лазерної небезпеки від рівня юридичного регулювання  $D_{Ju}(Ju) = SL_{Ju}(-Ju)$ . Залежність небезпеки від потужності випромінювання має експонентний характер  $D_P(P) = a_P \cdot e^{c_P P}$  (рис. 1б), де  $a_P, c_P$  – деякі коефіцієнти. Загальна залежність рівня лазерної небезпеки має вигляд

$$D = SL_M(-M) \cdot SL_{Vm}(-Vm) \cdot SL_{Ju}(-Ju) \cdot a_P \cdot e^{c_P P}, \quad (1)$$

$$SL_x(x) = \frac{a}{1 + e^{-c \cdot (x - \Delta x)}}$$

де  $SL_M, SL_{Vm}, SL_{Ju}$  – SL- функції [7],  $a, c, \Delta x$  – коефіцієнти:  $a$  – верхня межа зростання;  $c = 2/T$  – позитивний коефіцієнт, що залежить від величини періоду  $T$ ;  $\Delta x$  - зсув точки симетрії графіка вздовж вісі абсцис.

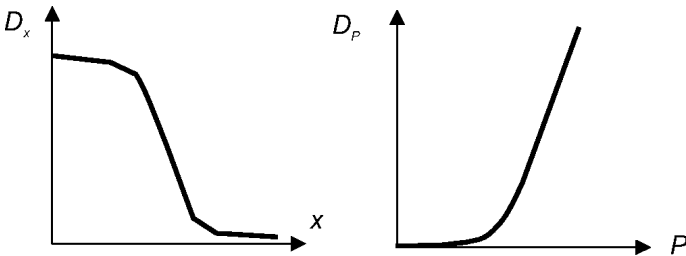


Рис. 1 – Рівні небезпеки розповсюдження та застосування лазерних пристроїв, в залежності від дії різних факторів.

При перспективному оцінюванні небезпеки лазерних технологій за допомогою (1), у першому наближенні, змінні  $M, Vm, Ju, P$  можуть бути

представлені деякими експонентними функціями часу. При аналізі рекомендується розглядати  $Ju$  як функцію часу незалежно від представлення інших змінних,  $Vm$  та  $P$  представляти функціями часу якщо вважається  $M = const$ ,  $M$  – представляти функцією часу, якщо  $Vm = const$  або  $P = const$ .

В [8] запропонований спосіб забезпечення заданого рівня ефекту лазерної терапії, який у модифікованому вигляді можна використати для управління рівнем лазерної безпеки скануючих лазерних систем сумісно з (1). Визначимо принципові відмінності постановки задачі даної роботи від [8]:

1. Небезпечним вважається навіть один окремих період сканування.

2. Мова йде про зворотну задачу, тобто недопущення перевищення деякого заданого рівня деструктивного ефекту замість забезпечення досягнення рівня корисного ефекту не менше завданого.

3. Оскільки випромінювання виконується у навколишньому просторі, то діаметр лазерної плями збільшується пропорційно відстані та відповідно зменшується питома потужність в зоні освітчування зворотно пропорційно квадрату відстані.

Позначимо:  $A$  – амплітуда вихідного сигналу,  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,  $f$  – лінійна частота,  $t$  – час,  $E$  – енергія випромінювання,  $r$  – радіус лазерної плями.

Звичайно, для управління електромагнітним дефлектором використовують синусоїдальний сигнал [2]. Завдяки динамічним властивостям дефлектору, навіть більшість несинусоїдальних вхідних сигналів перетворюється у наближений до синусоїдального вихідний сигнал. При фіксованій відстані до об'єкту випромінювання і малих кутах відхилення променю (4-10 град [2]) можна вважати лінійну амплітуду розгортки променю на поверхні освітлювання пропорційною куту відхилення. Тоді лінійне відхилення лазерної плями на поверхні освітлення  $x$  та його похідна дорівнюватимуть

$$x = A \sin \omega t, \quad \frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t = \omega \sqrt{A^2 - x^2}, \quad (2)$$

Звісно, що

$$P = \frac{dE}{dt}. \quad (3)$$

В межах одного сеансу опромінювання можна вважати потужність випромінювання постійною. Тоді з (2, 3) запишемо залежність розподілу питомої енергії вздовж лінії розгортки та після відповідних перетворень отримаємо залежність розподілу енергії по поверхні освітлювання вздовж траєкторії сканування променю для чверті періоду сканування  $E_{1/4}(x)$ .

$$E(x) = P \int_{x-r}^{x'} \frac{dx}{\omega \sqrt{A^2 - x^2}} = \frac{P}{\omega} \arcsin \left( \frac{x}{A} \right) \Big|_{x-r}^{x'} \quad (4)$$

$$x' = \begin{cases} x+r, & \text{если } x+r < A \\ A, & \text{если } x+r \geq A \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{1/4}(x) = \begin{cases} \frac{P}{\omega} \left( \arcsin \left( \frac{x+r}{A} \right) - \arcsin \left( \frac{x-r}{A} \right) \right), & \text{если } x+r < A, \\ \frac{P}{\omega} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{x-r}{A} \right) \right), & \text{если } x+r \geq A, \end{cases} \quad (6)$$

Чисельне моделювання свідчить, що чім менш відношення  $r/A$ , тим більше нерівномірність розподілу енергії по поверхні (Рис. 2). Однократне освітлювання об'єкту включає експозицію при русі до межі діапазону сканування та зворотний рух (повернення), тоді вираз для освітлювання певної точки об'єкту на протязі одного періоду сканування прийме вигляд

$$E(x) = 2 \cdot E_{1/4}(x). \quad (7)$$

В залежності від отриманої енергетичної дози [9] в організмі спочатку відбувається стимуляція обмінних процесів  $D_A - D_B$ , а при подальшому збільшенні – їх пригнічення  $D_B - D_F$  (закон Арндта-Шульца) (Рис. 3). Закон Арндта-Шульца також зберігає свої якісні властивості, якщо в якості дози обирати різні енергетичні характеристики [2]: питому потужність [10-12], питому енергію [12, 13] або повну енергію [12], що поглинута організмом. Звичайно обирають повну поглинуту енергію (енергетична доза), з якою інші величини пов'язують шляхом відповідних перерахунків. Але, для розглянутої постановки задачі більш доцільно обрати питому енергію (7).

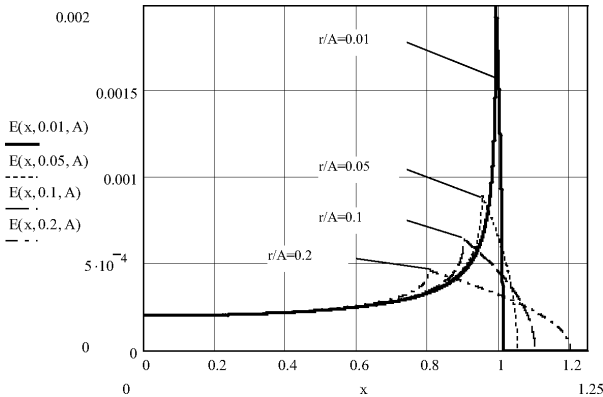


Рис. 2 – Розподіл енергії лазерного випромінювання по поверхні сканування.

Повний ефект дії лазерного опромінювання складно виразити єдиним показником. Пропонується використовувати лінійну згортку оцінок за окремими показниками

$$Eff_{\Sigma}(E) = \sum_{i=1, n} \beta_i \cdot Eff_i(E), \quad (8)$$

де  $\beta_i$  – ваговий коефіцієнт оцінки ефекту  $Eff_i(E)$  по  $i$ -му параметру стану об’єкта. В подальшому розглядаємо лише результуючу залежність  $Eff_{\Sigma}(E)$ , яку будемо позначати  $Eff(E)$ , хоча всі міркування можуть бути узагальнені і на залежності окремих ефектів  $Eff_i(E)$ .

$$Eff(E) = \int_{x_0}^{x_1} Eff_x(E) dx, \quad (9)$$

де  $Eff_x(E)$  – питома енергетична доза в точці  $x$ ;  $x_0, x_1$  – координати меж діапазону для якого визначається сумарний ефект.

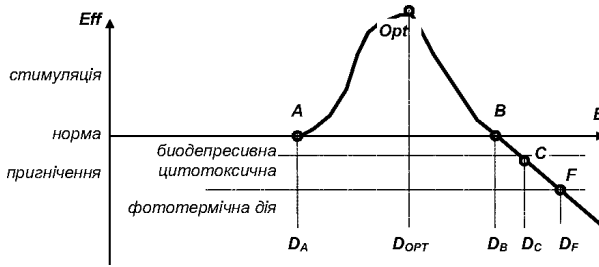


Рис. 3 – Залежність ефекту дії лазера на біологічний об’єкт від дози.

При побудові моделі найбільш точно мають бути задані координати точок  $E_{\min}, E_{\max}$  в яких  $Eff_x(E) = 0$ . Залежність (Рис. 3) можна представити за допомогою певних логістичних SL- функцій [7]  $SL_1, SL_2$  у вигляді

$$Eff_x(E) = SL_1(E) - SL_2(E) dx, \quad (10)$$

Для спрощення аналітичних операцій з апроксимуючою залежністю (10) використаємо властивість похідної SL- функції та правило апроксимації добутку SL- функцій [7].

$$\frac{dSL(E)}{dE} = c \cdot SL(E) \cdot (a - SL(E)) \approx c \cdot (SL_1(E) - SL_2(E)). \quad (11)$$

Для (7) виконаємо лінійну сплайн-інтерполяцію.

$$E(x, r) = \sum_{i=1, n} d_i(r) + k_i(r) \cdot x, \quad (12)$$

де  $d_i(r), k_i(r)$  – коефіцієнти  $i$ - го сплайн-відрізка. Тоді з урахуванням (10-12) представимо (9) у вигляді

$$\begin{aligned}
 Eff(r) &= \sum_{i=1, n} k_i(r) \cdot \int_{E_{i-1}(r)}^{E_i(r)} \frac{dSL(E)}{dE} dE = \\
 &= \sum_{i=1, n} k_i(r) \cdot (SL(E_i(r)) - SL(E_{i-1}(r))).
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Тепер задачу можна сформулювати як пошук множини таких значень параметру  $r$ , при яких забезпечується величина сумарного ефекту не більше деякого завданого рівня

$$Eff(r) \leq Eff_{зад}.
 \tag{14}$$

За допомогою (13) будуюмо графік  $Eff(r)$ , накладаємо обмеження (14) та знаходимо діапазон припустимих величин  $r > r_{min}$ . Задача вирішується чисельно або графоаналітичним методом (рис. 4). На підставі інформації про відстань до об'єкту можна перерахувати обмеження на кут розходження променя, який вважаємо управлінням.

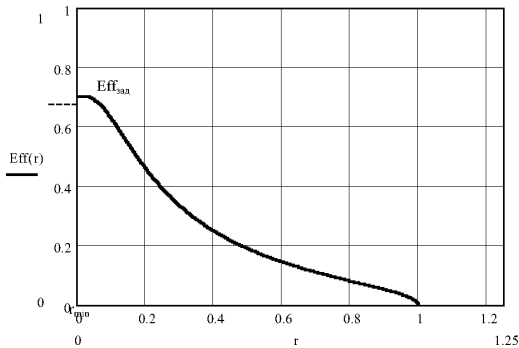


Рис. 4 – Залежність ефекту дії лазерного випромінювання від радіусу лазерної плями.

Загальний алгоритм забезпечення заданого рівня лазерної безпеки сформулюємо наступним чином.

1. Завдати попередні входні дані:  $r_0, r_1$  з урахуванням відстані до об'єкту та кута розходження променя;  $E_{min}, E_{max}, Eff_{зад}$  виходячи з інформації про потенційні об'єкти опромінювання;  $f, A$  – виходячи з інформації про режими сканування.

2. З допомогою (7) побудувати допоміжний масив значень функції  $E(x, r)$  для діапазону аргументів  $r \in [r_0, r_1], r_1 \leq A, x \in [0, A + r]$  с кроком, який забезпечує 50-200 значень на діапазон.

3. На підставі масиву  $E(x, r)$  побудувати масиви інтерполюючих коефіцієнтів  $k_i(r)$  і координат меж сплайн-відрізків  $E_i(r)$ . Для забезпечення необхідної точності, в залежності від величини  $r$ , достатньо розрахувати 15-50 відрізків інтерполяції.

4. За допомогою (13) будуюмо  $Eff(r)$ .

5. Визначаємо параметри апроксимуючої SL-функції

$$\Delta E = \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2}, \quad T = \Delta E - E_{\min}. \quad (15)$$

6. З урахуванням (15) чисельним або графоаналітичним способом знаходимо діапазон припустимих величин  $r > r_{\min}$ .

### Висновки

Таким чином у роботі запропонований загальний підхід щодо управління екологічною безпекою скануючих лазерів. Проаналізовані окремі техніко-економічні та соціально-економічні аспекти лазерної безпеки. Розроблена методика та запропонований алгоритм управління рівнем екологічної безпеки скануючих лазерів, які побудовані на основі електромагнітних дефлекторів.

Якщо, для завданих умов та обмежень застосування скануючих лазерних систем не вдається знайти рішення, що задовольняє умовам постановки задачі, то рекомендується замінити електромагнітні дефлектори на дефлектори які не мають ефекту крайового передозування, наприклад акустоптичні. Але слід врахувати, що така заміна призведе до суттєвого збільшення вартості.

**Напрямами подальших досліджень** мають бути поширення запропонованої методики на інші типи дефлекторів, поглиблення досліджень щодо техніко-економічних та соціально-економічних аспектів лазерної безпеки.

### Література

1. Шевченко В.Л. Современная лазерная техника как источник лазерной опасности// в журн. "Арсенал XXI століття", 2, 2002. - с.21
2. Шевченко В.Л. Основы рационального применения терапевтических лазеров.- Киев: НПО "Профессор", 2003. - с. 170
3. Право війни: Порадник для командного складу Збройних Сил України / Під загальною редакцією В.П.Базова. –Видання друге, доповнене – Київ: "Поліграфкнига", 1997. – с. 112
4. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: "Советское радио", 1977. - с. 336
5. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров 5804-91.- М.: Изд.дом "Имидж", 1991. - с. 95
6. Справочник по лазерной технике. Пер. с нем. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – с. 544.: ил.
7. Шевченко В.Л. Использование SL-зависимостей для построения моделей развития технологий и упрощения процедур поиска оптимальных решений на примере уравнения Беллмана // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск.6 (35). - Дніпропетровськ: ДНВП "Системні технології", 2004. - С.148-153.

8. Спосіб забезпечення заданого рівня ефекту лазерної терапії. Пат. 6524, Україна, МПК 7 А61Н5/06. В.Л.Шевченко. - Заявка 200500483. Заявлено 18.01.05. Опубл. 2005, Бюл. 6. – 4с., ил.
9. Михайлов В.А., Скобелкин О.К., Денисов И.Н. Основные принципы низкоинтенсивной лазерной терапии для лечения онкологических больных в запущенной стадии заболевания // Перспективные направления лазерной медицины (Материалы международной конференции г. Одесса 18-20 ноября 1992 г.) Москва, Одесса, 1992. – С.341-344.
10. Илларионов В.Е. Лазерная терапия // Врач. - 1992 8, с.11-16.
11. ИНСТРУКЦИЯ по применению лазерной физиотерапевтической установки УФЛ-01 для лечения стоматологических заболеваний // Типовая инструкция по охране труда при проведении работ с лазерными аппаратами. М.:1988. - С. 6-15.
12. Корепанов В.И. Теория и практика лазерной терапии. Часть первая. М.: НПП "Рapid", 1993. - с. 110
13. Лобода М.В., Самосюк І.З., Колесник Е.О. Нетрадиційні та фізіотерапевтичні методи лікування в АТ „Укрпрофоздоровниця” // Медичинська реабілітація, курортологія, фізіотерапія. – 1998. – 1(13). - С.3-5.