

*Д.В. СОКІРКАЄВ, О.А. ЗАРУДНИЙ, канд. техн. наук*

## **УЗГОДЖЕННЯ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ АПЕРТУРИ В СИСТЕМАХ БЕЗДРОТОВОЇ ЛАЗЕРНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ**

### **Вступ**

Розвиток систем бездротової передачі енергії є одним із пріоритетних напрямів сучасної радіоелектроніки та оптоелектроніки. Особливий інтерес викликають системи лазерної передачі енергії, що забезпечують високу спрямованість випромінювання і, як наслідок, мінімальні втрати при поширенні на значні відстані. Ефективність таких систем суттєво залежить від якості просторового перетворення лазерного випромінювання, що визначає концентрацію енергії в заданій області простору [1].

Бездротові лазерні системи передачі енергії представляють собою комплекс складних оптоелектронних пристроїв, що включають джерело лазерного випромінювання, систему формування і наведення променя, приймальний пристрій з фотоелектричним перетворювачем та систему керування і моніторингу. Центральною проблемою при розробці таких систем є забезпечення максимальної концентрації енергії в області приймача, що визначається якістю фокусування лазерного випромінювання.

На відміну від традиційних радіосистем передачі енергії, де випромінювання має значну дивергенцію та низьку спрямованість, лазерні системи дозволяють формувати вузькоспрямовані пучки з мінімальною розбіжністю. Це дає можливість передавати енергію на значні відстані з високою ефективністю, але вимагає точної системи узгодження характеристик випромінювання з геометричними характеристиками приймальних систем, а також для компенсації атмосферних спотворень [1, 3].

Актуальність досліджень у сфері фокусування лазерного випромінювання для систем бездротової передачі енергії обумовлена потребою у створенні високоефективних та економічно доцільних рішень для живлення віддалених об'єктів [4, 5]. Крім того, такі системи мають значний потенціал застосування в космічних комунікаціях, безпілотних літальних апаратах, системах моніторингу та інших спеціалізованих галузях.

Важливим аспектом використання лазерних систем передачі енергії є їх екологічність та безпечність для навколишнього середовища. На відміну від традиційних ліній електропередачі, лазерні системи не вимагають прокладання кабельних мереж, що значно знижує вплив на екосистеми. Також, при правильному проектуванні та експлуатації, системи лазерної передачі енергії мають мінімальний вплив на радіоелектронні системи та живі організми.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Питання ефективної бездротової передачі лазерної енергії активно досліджується у сучасних роботах, де особлива увага приділяється геометрії оптичних систем та узгодженню апертур передавача і приймача. У роботах [1–3] розглянуто принципи формування та фокусування лазерного променя при передачі енергії на великі відстані. Автори показали, що правильний вибір діаметра апертури передавача суттєво впливає на зменшення втрат енергії та підвищення ефективності перетворення на приймачі.

У дослідженнях [4, 5] запропоновано методи оптимізації параметрів коліматорів та афокальних телескопів для досягнення мінімального розходження пучка. Зокрема, показано, що використання двокомпонентних колімувальних систем забезпечує кращий компроміс між розміром апертури та ефективністю передачі енергії порівняно з простими лінзовими системами.

Особливе значення мають роботи [6–8], у яких досліджено вплив атмосферних факторів на фокусування променя та ефективність передачі енергії. Авторами доведено, що турбулентність атмосфери та розсіяння зумовлюють необхідність використання адаптивної оптики

та стабілізаційних систем, які дозволяють утримувати оптимальний розподіл енергії в зоні приймача навіть при змінних умовах.

Таким чином, аналіз останніх досліджень свідчить, що підбір апертури передавача є одним із ключових факторів, що визначають ефективність бездротової передачі лазерної енергії. Оптимізація оптичних систем у поєднанні з адаптивними методами компенсації атмосферних спотворень дозволяє значно підвищити якість передачі та зменшити енергетичні втрати. Важливі аспекти проектування та оцінки DL-моделі для виявлення вразливостей у смарт-контрактах розглянуто у [10], де запропоновано підходи, що потенційно можуть бути адаптовані для оптимізації систем керування фокусуванням лазерного випромінювання. Автори демонструють можливість застосування методів машинного навчання для вирішення складних оптимізаційних задач, що є актуальним для систем адаптивного фокусування лазерного випромінювання.

Аналіз публікацій свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у розробці систем лазерної передачі енергії, існує ряд невирішених проблем, пов'язаних з оптимізацією фокусування лазерного випромінювання в умовах атмосферних збурень, компенсацією термооптичних ефектів та забезпеченням надійності систем при тривалій експлуатації.

У зв'язку з цим основними цілями статті є наступні:

1. Аналіз способів мінімізації поперечних розмірів лазерного випромінювання в системах лазерної бездротової передачі енергії.
2. Визначення оптимальних параметрів оптичної системи для забезпечення максимальної ефективності передачі енергії.
3. Формулювання рекомендацій щодо підвищення ефективності фокусування лазерного випромінювання в системах бездротової передачі енергії.

### Основний матеріал досліджень

Ефективність системи бездротової передачі лазерної енергії доцільно оцінювати через коефіцієнт ефективності, що визначається відношенням прийнятої оптичної енергії  $P_{\text{прийм}}$  до переданої оптичної потужності  $P_{\text{перед}}$ :

$$\eta = \frac{P_{\text{прийм}}}{P_{\text{перед}}} \quad (1)$$

Очевидно, що для забезпечення високої ефективності необхідно мінімізувати втрати випромінювання на всьому шляху проходження променя. Одним із ключових факторів, що визначають ці втрати, є узгодження апертури передавача і приймача. Основна умова формулюється так: радіус променя на площині приймача має бути рівним або меншим за радіус апертури приймального пристрою. Якщо ця умова виконується, більша частина енергії променя потрапляє на приймальний фотоперетворювач.

Таким чином, завдання узгодження апертур визначає головну мету проектування системи: досягти мінімально можливих розмірів апертури приймача при збереженні максимальної ефективності передачі енергії. Це особливо важливо у випадках мобільних чи повітряних платформ, де приймачі мають бути компактними, легкими та здатними працювати в умовах підвищених механічних і аеродинамічних навантажень. Збільшення діаметра приймача може призвести до зростання маси, погіршення аеродинамічних характеристик та ускладнення системи наведення, що накладає істотні обмеження на його конструкцію.

Слід також підкреслити, що наведений критерій ефективності  $\eta$  є ідеалізованим, оскільки він не враховує впливу атмосферних факторів – таких як поглинання, розсіяння чи турбулентність. В реальних умовах саме атмосферні спотворення часто визначають кінцеву ефективність системи, однак на початкових етапах проектування їх доцільно розглядати окремо, після аналізу геометричного узгодження апертур.

Відомо, що просторова структура лазерного випромінювання формується в лазерному резонаторі і являє собою Гаусові промені, що характеризуються такими параметрами:

діаметр променю в перетяжці (мінімальний діаметр)  $2r_n$ , конфокальна відстань  $z_k$ , радіус кривизни хвильового фронту  $R_z$ , кутове розходження  $2\theta$  тощо. Інтенсивність Гаусового пучка зменшується уздовж радіусу за законом

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left[-(r/r_n)^2\right], \quad (2)$$

де  $I_0$  – інтенсивність випромінювання на вісі пучка.

Радіус пучка на відстані  $z$  від перетяжки визначається формулою [3, 4]

$$r(z) = r_n \cdot \sqrt{1 + (z/z_k)^2}. \quad (3)$$

Радіус  $R_z$  хвильового фронту та конфокальна відстань  $z_k$  є однаковими для всіх мод лазерного пучка. Однак чим більше мод резонатора  $l$ , тим більше діаметр перетяжки. Збільшення діаметру відбувається у відповідності з формулою  $(2l+1)^{0.5}$ . Таким чином, якщо, наприклад, кількість поперечних мод буде дорівнювати  $l=50$ , то відповідно діаметр променю в перетяжці збільшиться на порядок. Оскільки для передачі енергії на відстань доцільно використовувати багатомодові лазери, як більш потужні, то діаметр в перетяжці може сягати одиниць сантиметрів і навіть більше. Найчастіше в потужних лазерах використовується напівконфокальний резонатор з плоским вихідним дзеркалом на якому формується перетяжка пучка. Подальший аналіз будемо проводити саме для такого варіанту резонатора.

Відомо, що структура коливань лазерного променю при його перетворенні оптичними системами не змінюється. Сформований промінь можна характеризувати діаметром  $2r'_n$ , конфокальною відстанню  $z'_k$  та кутовим розходженням  $2\theta'$ .

Необхідною умовою ефективної передачі енергії є узгодження поперечних розмірів пучка випромінювання з апертурою приймальної системи. Практично це зводиться до мінімізації поперечних розмірів пучка, сформованого оптичною системою. При цьому зважимо на те, що при аналізі будь-яку оптичну систему можна привести до еквівалентної лінзи з фокусною відстанню  $f$ . Для спрощення аналізу будемо вважати, що передня та задня фокальні відстані лінзи є однаковими.

Для розрахунків у ближній зоні, коли відстань від передавача та приймача одного порядку з конфокальною відстанню сформованого пучка, можна скористатися наступними співвідношеннями [6]:

$$\alpha_2 = \frac{z'_k}{z_k} = \frac{z'_p}{z_p} = \left(\frac{\theta}{\theta'}\right)^2 = \left(\frac{r'_n}{r_n}\right)^2 = \frac{f^2}{z_k^2 + z_p^2}; \quad (4)$$

$$\theta = \frac{r_n}{z_k}; \quad \theta' = \frac{r'_n}{z'_k},$$

де  $\alpha_2$  – коефіцієнт поздовжнього збільшення.

Відношення радіусів у перетяжках сформованого ( $r'_n$ ) та первинного променів ( $r_n$ ) визначає коефіцієнт лінійного збільшення:

$$\beta = r'_n/r_n. \quad (5)$$

Врахуємо також, що відстані від лінзи до перетяжок вихідного і сформованого променів пов'язані співвідношеннями:

$$L_n = z_n + f; \quad L'_n = z'_n + f. \quad (6)$$

З урахуванням формул (4)–(6) відстань від лінзи до перетяжки сформованого пучка можна записати у вигляді

$$L'_n = (L_n - f) \frac{f^2}{(L_n - f)^2 + z_k^2} + f. \quad (7)$$

Якщо завдання це отримати мінімальний діаметр сформованого пучка для узгодження з поперечними розмірами приймального пристрою, то очевидно що таке можливо, коли оптикоелектронний приймач розташований в перетяжці. Тому важливо визначити відстань між лінзою та претяжкою сформованого пучка.

Для зручності подальшого аналізу переписемо вираз (7) поділивши ліву та праву частини на  $f$ . Тоді отримаємо

$$\frac{L'_n}{f} = \frac{\left(\frac{L_n}{f} - 1\right)}{\left(\frac{L_n}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{z_k}{f}\right)^2} + 1. \quad (8)$$

Результати розрахунків за формулою (8) для варіантів співвідношення між конфокальною відстанню променю і фокусною відстанню лінзи представлено на рис. 1.

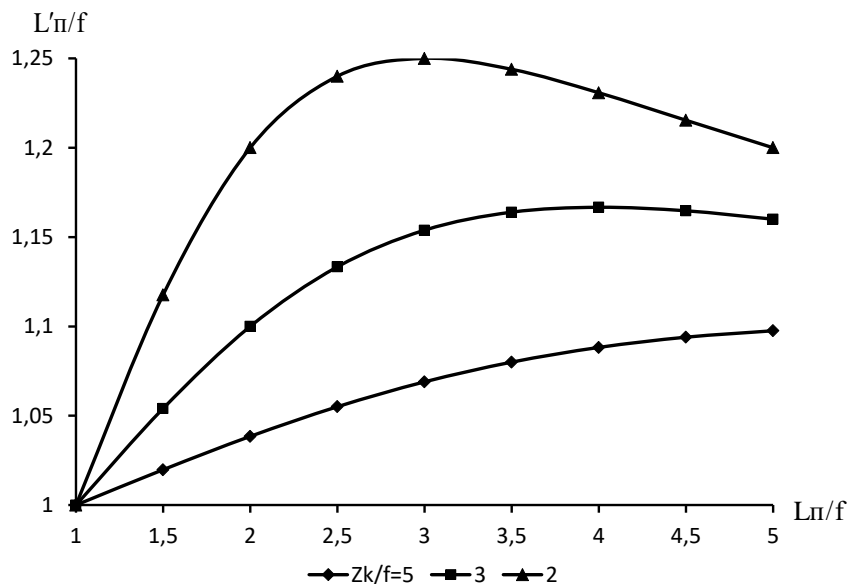


Рис. 1. Залежність між конфокальною відстанню променю і фокусною відстанню лінзи

Аналіз результатів розрахунків, ілюстрований на рис. 1, показав, що відстань від лінзи до перетяжки сформованого пучка завжди більше фокусної відстані лінзи, тобто знаходиться за задньою фокальною площиною і це треба враховувати при розташуванні приймального оптикоелектронного перетворювача. Виключення є тільки для  $L_p/f=1$ , тобто коли лінза розташована на відстані  $L_p$  від перетяжки, що дорівнює її фокусній відстані (для конфокального резонатора це відстань між лінзою та переднім вихідним дзеркалом резонатора).

З рис. 1 видно, що відносно збільшення відстані  $L'_p/f$  зростає із збільшенням відстані між лінзою та перетяжкою первинного пучка. Відзначимо також, що таке зростання є тим більшим, чим менше відношення конфокального параметра вихідного пучка до фокальної відстані лінзи.

Аналогічно з виразу (4) можна отримати співвідношення для радіусів первинного і сформованого пучків:

$$\frac{r'_p}{r_p} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L_p}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{z_k}{f}\right)^2}}. \quad (9)$$

Результати розрахунків за формулою (9) з урахуванням (8) представлено на рис. 2.

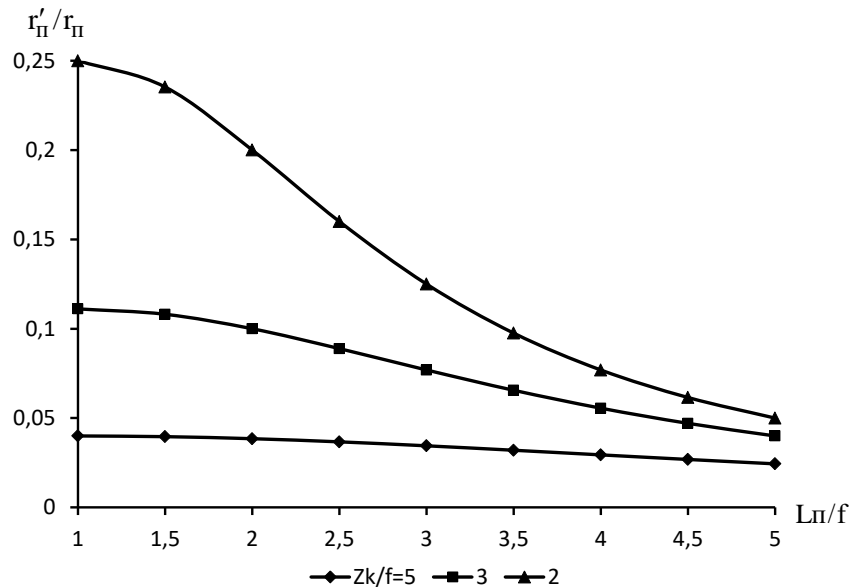


Рис. 2. Залежність радіусів первинного і сформованого пучків від відношення відстані від лінзи до перетяжки сформованого пучка до фокусної відстані лінзи ( $L_p/f$ )

З рис. 2 видно, що відносне зменшення радіусу сформованого пучка зворотно пропорційне збільшенню відстані між лінзою і перетяжкою первинного пучка, а також залежить від відношення конфокального параметра вихідного пучка до фокальної відстані лінзи. Взагалі, як випливає з формули (4), зменшення радіусу перетяжки сформованого пучка відбувається за умови  $z_k/f > 1$ .

Використовуючи формули (8) і (9), можна визначити необхідні відстані між лінзою та перетяжками променів, а також забезпечити узгодження з апертурою приймального пристрою.

Представлений аналіз може бути корисним, якщо відстань між випромінювачем та приймачем не перевершує десятків метрів. Якщо ж необхідно передати енергію на більшу відстань, то це призведе до невиправданого збільшення розмірів передавальної системи.

З формули (4) випливає, що відстань до перетяжки сформованого пучка приблизно пропорційна квадрату фокусної відстані лінзи, тому для передачі енергії на великі відстані (сотні метрів і більше) необхідно відповідно збільшувати відстань між перетяжкою первинного пучка та лінзою, що і є причиною збільшення габаритних розмірів передавальної системи. Частково ця проблема може бути вирішена за рахунок використання двоконцентричних систем, у яких за рахунок відстані між фокальними площинами компонентів  $\Delta$  можливе регулювання еквівалентної фокусної відстані системи. Однак, як показує більш детальний аналіз, у такому випадку необхідні дуже жорсткі вимоги до точності взаємного розташування оптичних компонентів, які збільшуються із зростанням відстані передачі енергії.

Зважаючи на останнє зауваження, більш доцільне використання на великі відстані двоконцентричних афокальних телескопів-коліматорів, у яких фокальні площини компонентів є суміщеними. Оптична схема коліматора представлена на рис. 3.

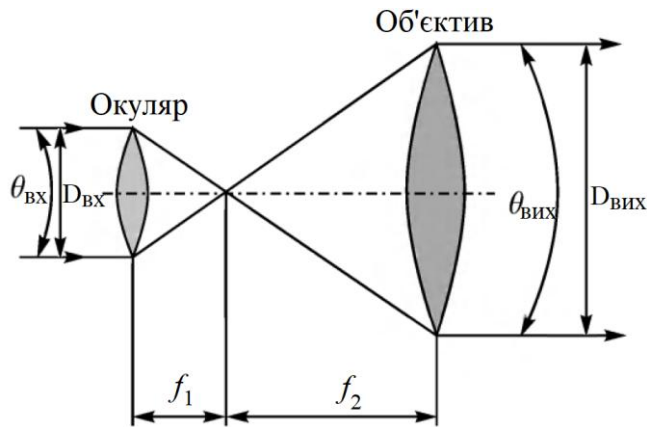


Рис. 3. Оптична схема коліматора

Для коліматора дійсними є співвідношення

$$K = \frac{f_2}{f_1} = \frac{D_{\text{вих}}}{D_{\text{вх}}} = \frac{(2\theta_{\text{вх}})}{(2\theta_{\text{вих}})}, \quad (10)$$

де  $K$  – коефіцієнт збільшення коліматора.

Згідно з формулою (10) із збільшенням  $K$  пропорційно зростає вихідний діаметр і в стільки ж разів зменшується кут розходження випромінювання.

На деякій відстані  $L$  від коліматора діаметр пучка випромінювання визначається очевидним співвідношенням

$$D_L = D_{\text{вих}} + (2\theta_{\text{вих}}) \cdot L$$

або з урахуванням (10):

$$D_L = D_{\text{вх}} K + \frac{(2\theta_{\text{вх}})}{K} \cdot L. \quad (11)$$

Важливим з практичної точки зору є питання визначення такого коефіцієнту збільшення, при якому діаметр  $D_L$  на приймачі був би мінімальним, оскільки це дозволило б мінімізувати його апертуру. Для цього проаналізуємо формулу (11) на екстремум по змінній  $K = \text{var}$ . Взввши похідну, отримаємо рівняння

$$D_{\text{вх}} - \frac{(2\theta_{\text{вх}})}{K^2} L = 0,$$

звідки маємо

$$K_{\text{opt}} = \sqrt{(2\theta_{\text{вх}}) \cdot \frac{L}{D_{\text{вх}}}}. \quad (12)$$

Результати розрахунків  $K_{\text{opt}}$  при різних значеннях кутів розходження і при  $D_{\text{вх}} = 1$  см представлено на рис. 4, а на рис. 5 – відповідно діаметри пучків випромінювання на відстані  $L$ . Фактично це є мінімально можливий діаметр приймальної системи  $D_{\text{np(min)}}$ .

З рис. 4 видно, що  $K_{\text{opt}}$  має більші значення для більших кутів розходження і зростає із збільшенням довжини траси  $L$ .

Результати розрахунків вказують на те, що за рахунок оптимального вибору параметрів коліматора можлива ефективна передача енергії при досить невеликих розмірах апертури приймальної системи. Так, наприклад, для відстані 5000 м і при куті розходження 1 мрад маємо оптимальний коефіцієнт збільшення приблизно 20, а діаметр пучка на приймальній

апертурі – 25 см. При цьому вихідний діаметр пучка, що визначає розмір вихідної лінзи коліматора, дорівнює приблизно 20 см, що є цілком задовільним результатом.

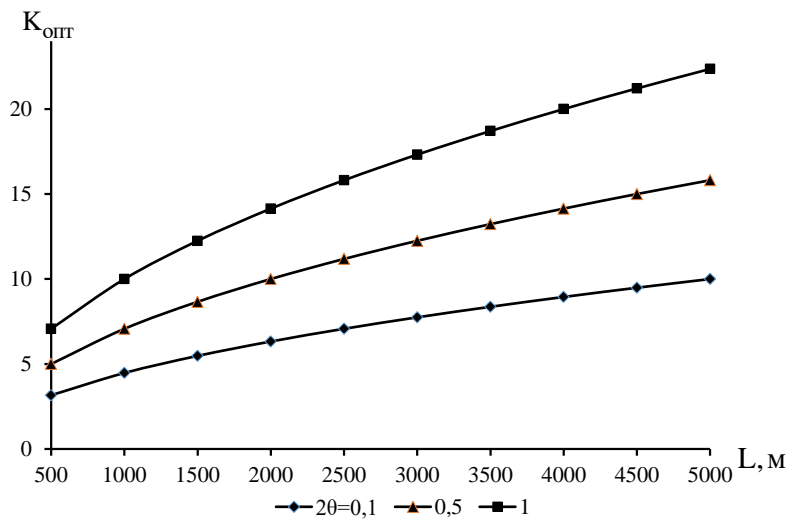


Рис. 4. Оптимальний коефіцієнт збільшення  $K(K_{\text{opt}})$  при різних значеннях кутів розходження

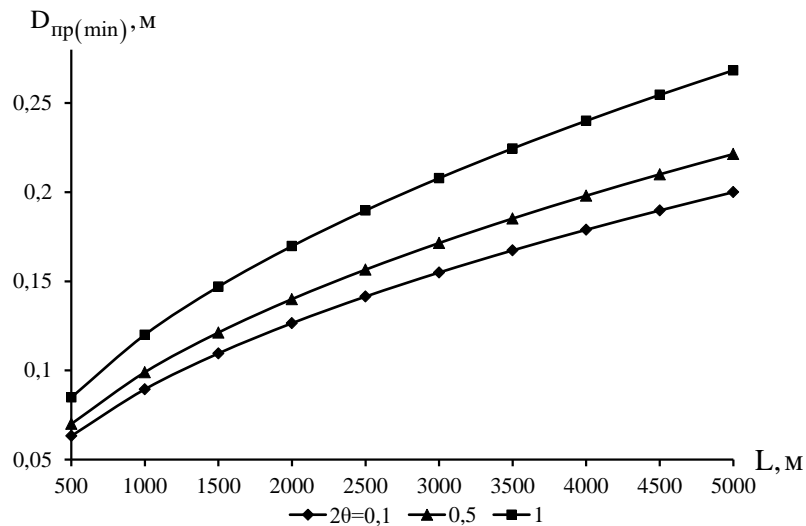


Рис. 5. Залежність діаметра пучка випромінювання від довжини траєкторії

На основі отриманих формул (9)–(12) та результатів чисельних розрахунків, представлених на рис. 4, 5, можна зробити наступні практико-орієнтовані висновки. Оптимальний коефіцієнт збільшення  $K_{\text{опт}}$  залежить від внутрішніх параметрів коліматора (вихідний діаметр  $D_{\text{вх}}$ , фокусні відстані компонентів). Для фіксованого  $D_{\text{вх}}$  і збільшення  $L$  оптимальний  $K_{\text{опт}}$  зростає, що супроводжується збільшенням вихідного діаметра апертури коліматора та зменшенням кутового розходження на виході. Це дає змогу зменшити діаметр пучка на приймачі до значень, сумісних з практично реалізованими апертурами приймальних фотоелектричних перетворювачів.

Разом з тим, подальше зростання  $K$  приводить до технічно складніших конструкцій і підвищених вимог до механічної жорсткості та точності наведення – похибки позиціонування лінз і дефазу в елементах оптичної системи прямо впливають на концентрованість пучка на відстані. Тому при практичному проєктуванні доцільно знаходити компроміс між оптичним  $K$ , габаритними розмірами апертур та вимогами до систем наведення і стабілізації [13].

Крім геометричних та оптичних аспектів, важливим чинником для передачі енергії на сотні метрів і більше є вплив атмосфери (поглинання, розсіяння, турбулентність) [11, 12].

Хоча математична частина роботи показала можливості оптимізації через вибір параметрів коліматора, для реальних умов необхідно враховувати статистичну природу атмосферних збурень та динаміку погіршення фазового фронту [14, 15]. Отже, остаточна ефективність системи визначається поєднанням оптичної схеми передавача і засобів компенсації атмосферних впливів.

## Висновки

Проведено аналіз впливу геометричних параметрів оптичних систем на якість фокусування лазерного випромінювання в системах бездротової передачі енергії. Розглянуто ключові співвідношення для однокомпонентних лінзових систем формули (1)–(8) та для двокомпонентних афокальних телескопів-коліматорів формули (9)–(12). На підставі чисельних розрахунків встановлено, що:

1. Для передачі на відстані порядку десятків метрів ефективним є застосування лінзових систем з ретельним підбором відстаней між перетяжками і фокусними площинами, що дозволяє узгодити поперечні розміри пучка з апертурою приймача. Проте масштабування такої схеми на сотні метрів чи кілометри призводить до значного збільшення габаритних розмірів передавальної системи.

2. Використання двокомпонентних афокальних коліматорів є більш практичним для великих відстаней: при оптимальному коефіцієнті збільшення  $K_{\text{опт}}$  можна зменшити діаметр пучка на приймачі до значень, сумісних з практичними апертурами фотоелектричних перетворювачів, з прийнятним вихідним діаметром коліматора. Однак це пов'язано з підвищеними вимогами до точності механічного та оптичного узгодження компонентів.

3. Додатково необхідно враховувати атмосферний вплив. Розглянута модель є ідеалізованою, тоді як поглинання, розсіяння та турбулентність атмосфери можуть суттєво обмежувати ефективність системи лазерної бездротової передачі енергії, особливо на великих відстанях.

4. Практичне проєктування системи передачі енергії має враховувати компроміс між оптичними параметрами, механічною реалізацією, швидкістю та якістю системи наведення.

## Список літератури:

1. Zhang Q., Fang W., Xiong M., Liu Q., Wu J., Xia P. Adaptive Resonant Beam Charging for Intelligent Wireless Power Transfer // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Т. 6, № 1. С. 1160–1170. DOI:10.1109/IIOT.2018.2871165.
2. Raboin J. W., Whiteley M. M., Resor S. L., Perlin G., Murphy P., Slostad J. Optical Power Beaming in the Lunar Environment. arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.06002. URL:https://arxiv.org/abs/2405.06002.
3. Barbeau N. R. Power deposited by a Gaussian beam on a decentered circular aperture // Applied Optics. 1995. Т. 34, № 28. С. 443–445. DOI: 10.1364/AO.34.006443.
4. Wang Y., Silva D. A. Encircled-energy analysis of laser-diode beams coupled into circular apertures // Applied Optics. 1991. Т. 30, № 21. С. 2962–2969. DOI: 10.1364/AO.30.002962.
5. Kaymak Y., Rojas-Cessa R., Feng J., Ansari N., Zhou M., Zhang T. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Т. 20, № 2. С. 1104–1123. DOI:10.1109/COMST.2017.2787707.
6. JPL DESCANSO Monograph Series 7. Deep Space Optical Communications. Pasadena, CA: JPL, 2000. (part 5.1: acquisition, tracking and pointing; методи вирівнювання).
7. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of Photonics. 3rd ed. Wiley, 2019. 1392 p.
8. Andrews L. C., Phillips R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. 2nd ed. Bellingham, WA : SPIE Press, 2005. 782 p. DOI: 10.1117/3.626196.
9. Hemmati H. (ed.) Near-Earth Laser Communications. Boca Raton: CRC Press, 2009. 432 p.
10. Shmatko O., Kolomiitsev O., Rekova N., Kuchuk N., & Matvieiev, O. Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts // Advanced Information Systems. 2023. No7(4). P. 41–51. DOI: 10.20998/2522-9052.2023.4.05
11. Ho T.-H. Pointing, Acquisition, and Tracking Systems for Free-Space Optical Communication Links. PhD Thesis. University of Maryland, 2007. 220 p. URL:https://drum.lib.umd.edu/
12. Magnan E., Maslek J., Bracamontes C., Restelli A., Boulier T., Porto J. V. A low-steering piezo-driven mirror // Review of Scientific Instruments. 2018. Т. 89, № 6. 063105. DOI:10.1063/1.5027020.

13. Park S., Choi J., Cho D. Development of a 9-W wireless optical power transfer for free-space data and power transfer // Optics Express. 2007. T. 15, № 8. P. 5141–5151. DOI:10.1364/OE.15.005141.
14. Digital Optical Communications (DSOC) team. Overview of the deep space optical communications (DSOC) technology demonstration // Proc. SPIE. 2025. Vol. 13355. Article 133550J. DOI:10.1117/12.3043966.
15. Guo Y., Liu Y., Leng Q., et al. High-Efficiency Resonant Beam Charging and Communication. arXiv preprint. 2021. arXiv:2107.14458. URL:<https://arxiv.org/abs/2107.14458>

*Надійшла до редколегії 18.01.2026*

*Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026*

*Публікація (оприлюднення) 30.04.2026*

*Відомості про авторів:*

**Сокіркаєв Денис Вадимович** – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант; Україна; e-mail: [denys.sokirkaiev@nure.ua](mailto:denys.sokirkaiev@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4659-529X>

**Зарудний Олександр Андрійович** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем; Україна; e-mail: [oleksandr.zarudnyi@nure.ua](mailto:oleksandr.zarudnyi@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1612-0256>