

**О. В. СТАЛЬЧЕНКО  
М. В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ  
В. К. СКОЩУК  
С. О. СЛОБОДЯНЮК**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ LI-FI ТЕХНОЛОГІЇ**

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*В результаті проведених досліджень вирішена важлива науково-технічна задача визначення завадостійкості бездротових оптичних локальних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання.*

**Ключові слова:** *бездротові оптичні мережі, завадостійкість оптичних мереж, LI-FI.*

### **Abstract**

*As a result of the conducted researches, an important scientific and technical task of determining the noise immunity of wireless optical local area networks of data transmission on the basis of visible light emitting diodes is solved.*

**Keywords:** *optical networks, noise immunity of optical networks, LI-FI.*

### **Вступ**

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що бездротові оптичні локальні мережі передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання, побудовані на базі інноваційної технології, ніде в світі не впроваджені в експлуатацію і вимагають розкриття їх потенціалу, особливо аспекти завадостійкості, які дозволять визначити області та способи їх застосування.

Ступінь розробленості теми дослідження можна оцінити по ряду праць зарубіжних авторів, які присвячені вивченню різних аспектів бездротових оптичних локальних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання, таких як: Харальд Хаас (Harald Haas), Свилен Димитров (Svilen Dimitrov), Анагностіс Параскевопулос (Anagnostis Paraskevopoulos), Хені Елга (Hany Elgala), Реїд Месла (Raed Mesleh), Доброслав Цонев (Dobroslav Tsonev), Клаус-Дітер Лангер (Klaus-Dieter Langer) та інших.

Їхні роботи містять положення про принципи функціонування комунікаційних ліній у видимому світлі за допомогою світлодіодів, методах підвищення пропускної спроможності і зниження ймовірності появи помилок при передачі сигналів. Однак, в працях цих вчених не розглядається ступінь впливу перешкод на пропускну здатність і способи оцінки цього впливу.

Метою роботи є визначення завадостійкості бездротових оптичних локальних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання, оцінка потенційних можливостей і необхідності застосування даних мереж.

### **Основна частина**

Робочий діапазон бездротових оптичних мереж передачі даних, не перетинається з діапазонами робочих частот експлуатованих нині мереж передачі даних, не здатний впливати на виробничі процеси або діяльність різних організацій, тому мережі VLC на базі світлодіодів видимого випромінювання придатні для експлуатації навіть в зонах чутливих до радіохвиль і електромагнітних полів в цілому (наприклад, медичні установи, повітряна і космічна техніка). Лише драйвери

світлодіодних ламп можуть створювати відчутне електромагнітне поле, для оцінки якого потрібне проведення додаткових досліджень.

Оцінка впливу шуму на пропускну здатність в мережах Li-Fi, який виникає від навколишнього природного і штучного світла, а також від світності фізичних об'єктів, повноцінно представлена в даній дослідницькій роботі і вона показала, що мережі Li-Fi успішно можуть функціонувати не тільки в добре освітлених приміщеннях, але навіть поза приміщеннями або під водою. Якщо при цьому будуть дотримані санітарні правила і норми по загазованості і запиленості, так як аерозолі представляють джерело шумів. З огляду на це, найбільш імовірною причиною погіршення або розриву зв'язку в офісному приміщенні, стане фізична перешкода через яку не зможе проникнути світло, що випадково опинилася на шляху сигналу, наприклад, хтось буде проходити між фотодетектором і світлодіодним випромінювачем. Проте, дотримання санітарних норм і правил, залишається невід'ємною умовою, для забезпечення якісної передачі сигналів в мережах Li-Fi.

Багатопроменевий ефект природно присутній і в радіочастотних бездротових мережах передачі даних і в оптичних бездротових мережах передачі даних, але, з урахуванням непроникності світлових сигналів крізь кордони приміщень будівель, оптичні сигнали мереж Li-Fi з суміжних приміщень не стануть причиною цього ефекту. Саме тому, такий спосіб боротьби з ним, як рознесення приймально-передавального обладнання і використання спрямованих випромінювачів сигналу буде більш ефективний. Його вклад в зниження пропускну здатності був оцінений в розробленій математичній моделі, і він виявився не таким істотним, як передбачалося спочатку.

Крім того, можливе прийняття заходів, для зниження світності в приміщенні, яка також створює багатопримієвість, при виконанні яких не буде потрібно істотних матеріальних витрат. Якщо перед нами стоїть завдання контролю поширення сигналу і запобігання несанкціонованого доступу до каналу зв'язку, то неможливість виходу сигналу Li-Fi за межі закритого цільового приміщення є перевагою, в порівнянні з бездротовими радіочастотними мережами передачі даних, де для цього буде потрібне проведення ряду процедур. Тобто, бездротові оптичні мережі передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання з більшою легкістю дозволяють забезпечити конфіденційність каналу зв'язку. Забезпечення надійності порівнюваних мереж, створенням резервних пунктів доступу, представляється значно простішим і дешевшим в мережах Li-Fi. Але виявлення і заміна одного єдиного світлодіода який вийшов з ладу, в світлодіодному масиві світлодіодної лампи, видається важким і не доцільним завданням, тому буде потрібна заміна світлодіодної лампи цілком.

Радіочастотні мережі практично позбавлені можливості інтегрування в існуючу інфраструктуру будівель і населених пунктів, так як для мереж LTE необхідне встановлення базових станцій, а для Wi-Fi і WiMAX комунікаційне обладнання з антенами. На відміну від них, світлодіодні системи зв'язку можуть бути легко інтегровані в широко поширену освітлювальну інфраструктуру. Широко поширена світлодіодна техніка може бути легко дообладнана так, щоб використовуватися в мережах Li-Fi.

При цьому, споживана потужність світлодіодних освітлювальних пристроїв менше, ніж у інших освітлювальних приладів, тому не виникає необхідності у великих додаткових витратах потужності, що істотно здешевлює експлуатацію бездротових оптичних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання.

Тому, з точки зору грошових витрат, розгортання і експлуатація мереж Li-Fi не вимагає великих грошових вкладень. А супутній ефект зниження витрат на закупівлю енергоносіїв, від використання енергоефективних світлодіодних освітлювальних приладів, на заміну лампам розжарювання і люмінесцентним лампам, може виявитися також досить істотним в масштабах великих підприємств, де велике число світлотехнічного обладнання. Адже світлова віддача світлодіодних систем може досягати 120 лм/Вт, що вище світловіддачі люмінесцентних ламп в 60 - 100 лм/Вт і значно перевершує світловіддачу ламп розжарювання в 10 - 24 лм/Вт.

Іншими словами, для досягнення світлового потоку в 600 лм при використанні лампи розжарювання необхідно від 25 до 60 Вт електроенергії, а при використанні світлодіодної лампи - лише 5 Вт. Що при тарифі на електроенергію 3,06 грн./КВт · год (одноставковий тариф для пікової зони у Вінницькій області для підприємств на перше півріччя 2019 р.) за 40-годинний робочий тиждень дозволить заощадити від 121 до 334 грн. з кожної сотні лампочок, в рік ця цифра вже складе від 5971 до 16482 грн.

Крім того, в режимі ширококомовлення мережі Li-Fi можуть передавати сигнал необмеженому числу користувачів в зоні покриття мережі. Доведено, що радіочастотні мережі передачі даних негативно впливають на репродуктивні органи чоловіків, провокує швидку стомлюваність, апатію, слабкість, головний біль, порушення в роботі хворих органів, ослаблення уваги, пам'яті, нервові і психічні розлади, і хоча вплив мереж Li-Fi не вивчено, існують дослідження, що доказують, що світло яке випромінює світлодіод є найбільш комфортним джерелом штучного освітлення для людських очей.

Аналіз розвитку бездротової оптичної передачі цифрових даних і технологій бездротової передачі даних за допомогою видимого світла, а також сучасних досягнень в цій сфері показав, що мережі Li-Fi мають великий потенціал для масового використання і дозволив зробити наступні висновки:

1. В даний час сформульовані основні принципи функціонування бездротових оптичних локальних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання, розглянуто технологічні аспекти виробництва світлодіодних випромінювачів, їх параметри і особливості; світлодіоди та деякі їх параметри, які мають значення для даного дослідження; поточні досягнення та перспективи подальших досліджень в області їх виробництва світлодіодних випромінювачів, які підтверджують можливість організації високошвидкісної мережі Li-Fi на їх основі.

2. Вивчення фундаментальних принципів і технологій, на які спирається робота комунікаційних ліній у видимому світлі, так, наприклад, метод оптичного мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і квадратурна фазова маніпуляція, допомогли забезпечити високу пропускну здатність і ймовірність помилки на біт близько  $2 \times 10^{-5}$ ; і технології, застосовувані для організації зворотного зв'язку - PLC, PoE, Giga-IR і ін.

Теоретична значимість роботи полягає в розвитку теорії інформації, розвитку теореми Шеннона - Хартлі зокрема, і розробці рекомендацій з організації середовища передачі даних мереж Li-Fi. Значущим є й опис принципів функціонування, компонентів, виявлення основних джерел перешкод і способів підвищення завадостійкості бездротових оптичних локальних мереж передачі даних на базі світлодіодів видимого випромінювання.

Практична цінність роботи полягає в тому, що матеріали і висновки роботи, отримані автором в ході дослідження, можуть бути використані широким колом фахівців, як в області інформаційних технологій, наприклад, для організації бездротових оптичних мереж передачі даних, так і в інших областях, наприклад, в галузі автомобілебудування, для створення і вдосконалення систем безпілотного руху.

## Висновки

Дослідження параметрів мереж Li-Fi дозволило виявити їх переваги, недоліки та перспективні області застосування. Відсутність опублікованих даних по оцінці завадостійкості локальних мереж Li-Fi і наявність очевидних джерел перешкод в середовищі передачі даних, підтверджують необхідність проведення даного дослідження на базі математичних розрахунків.

Встановлено, що бездротові оптичні локальні мережі передачі даних на світлодіодах видимого випромінювання можуть забезпечувати пропускну здатність не нижче 100 Гбіт/с на відстані від 5 до 23 м і не нижче 10 Гбіт/с на відстані від 11 до 51 м (в залежності від типу приміщення і відповідного йому рівня освітленості, а також з урахуванням інших умов експерименту) в будь-яких приміщеннях громадських будівель, а також в супутніх їм виробничих приміщеннях, які відповідають санітарним правилам і нормам.

Визначено, що при досить сильному сигналі, який може забезпечуватися за рахунок використання ширини смуги пропускання випромінювання всіх (складових білого світла) кольорів (від 20 ТГц), і великим світловим потоком світлодіодного випромінювача (якому відповідає сила світла 500 кд), передавати дані з пропускну спроможністю 100 Мбіт/с можливо і в денний час на відкритих просторах, але на досить малі відстані, що не перевищують 23 м.

Ширина смуги пропускання мереж Li-Fi ширше, щонайменше, в 300 разів, але теоретично можна досягти ширини смуги пропускання в 200 ТГц, яка в 10000 раз ширше максимальної ширини смуги пропускання мереж Wi-Fi, WiMAX, LTE 4G +.

Отже, локальні мережі Li-Fi можуть стати більш швидким, дешевим, простим (в установці і експлуатації) та енергоефективним способом передачі даних, ніж існуючі бездротові радіочастотні мережі передачі даних. Маючи при цьому, більш високу захищеність каналів зв'язку від

несанкціонованого доступу і електромагнітну сумісність з обладнанням, чутливим до радіочастотних сигналів, що говорить про можливість використання мереж Li-Fi в промислових спорудах, де радіопередачі можуть втрутитися в виробничий процес, медичних установах, на повітряних і космічних апаратах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Абдуллаев О.Р. Новая технология создания ограничительных кремниевых диодов с интегральным теплоотводом // Научные технологии. 2013. Т. 14. № 11. С. 19–21.
2. Dimitrov S., Haas H. Principles of LED Light Communications. Towards Networked Li-Fi. 2015. Cambridge University Press (UK). 224 p.
3. Fakidis J., Ijaz M., Kucera S., Claussen H., Haas H. On the Design of an Optical Wireless Link for Small Cell Backhaul Communication and Energy Harvesting // IEEE 25th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC). 2014. Washington DC. USA. 09/2014.
4. Fath T., Heller C., Haas H. Optical Wireless Transmitter Employing Discrete Power Level Stepping // Journal of Lightwave Technology. 2013. 31(11). pp: 1734–1743.
5. Rajbhandari S., Chun H., Faulkner G., Cameron K., Jalajakumari A., Henderson R. High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 01/2015.
6. Tsonev D., Chun H., Rajbhandari S., McKendry J., Videv S., Gu E., Haji M., Watson S., Kelly A.E., Faulkner G., Dawson M.D., Haas H., O'Brien D. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride  $\mu$  LED IEEE Photonics Technology Letters. 2014. PP(99):1.
7. Tsonev D., Sinanovic S., Haas H. Complete Modeling of Nonlinear Distortion in OFDM-Based Optical Wireless Communication // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2013. Vol. 31 (18). pp. 3064–3076.

**Васильківський Микола Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Стальченко Олександр Володимирович** – канд. тех. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Скошук Валентин Костянтинович** — студент групи ТКР-166, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Слободянюк Сергій Олександрович** — студент групи ТКТ-17мс, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Vasykivskiy Mikola V.** – Ph.D., Senior lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

**Stalkhenko Alexander V.** – Ph.D., Senior lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

**Skoshchuk Valentin K.** - student of the TKR-16b group, Faculty of Infocommunications, Radioelectronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

**Slobodyanyuk Sergey A.** - student of the group TKT-17ms, faculty of infocommunications, radio electronics and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.