

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-29

**Якимчук Н. М., Лукомський І. В.**

Луцький національний технічний університет

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА

В статті У статті представлено результати теоретичного та аналітичного дослідження енергетичної ефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (*Visible Light Communication, VLC*). Розроблено уніфіковану методику оцінювання показників енергоефективності, яка враховує вплив ключових параметрів системи – ефективності світлодіодів, чутливості фотоприймача, площі детектора, рівня шумів та множинних відбиттів від поверхонь. Проведено порівняльний аналіз трьох типових методів модуляції: *On-Off Keying (OOK)*, *Pulse-Width Modulation (PWM)* та *Color-Shift Keying (CSK)* при фіксованому рівні освітленості. Встановлено, що *OOK* та *PWM* забезпечують близькі значення енергетичної ефективності, тоді як *CSK*, потребує більших енергетичних витрат, має перевагу в спектральній ефективності та потенціалі для високошвидкісної передачі даних. Врахування фонових шумів та геометричних характеристик середовища дозволило уточнити умови, за яких зростає або знижується ефективність системи. Результати дослідження мають практичне значення для проектування енергоощадних *VLC*-систем нового покоління, що поєднують функції освітлення та передачі інформації з мінімальними витратами енергії.

**Ключові слова:** *Li-Fi, VLC, модуляція, On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM), Color-Shift Keying (CSK), енергоефективність, SNR, фотодетектор, світлодіод.*

**Постановка проблеми.** Технології зв'язку на основі видимого світла (*Visible Light Communication, VLC*) стрімко розвиваються як перспективна альтернатива традиційним радіочастотним системам. Використання світлодіодів у ролі передавачів дає змогу забезпечити одночасно функції освітлення та передачі даних, проте вимагає адаптації методів модуляції до специфіки оптичного середовища. На відміну від радіочастотних каналів, у *VLC*-системах інформація може передаватися лише зміною інтенсивності світла, оскільки фотоприймачі реагують на потік випромінювання, а не на його фазу чи амплітуду. Це накладає обмеження на вибір модуляційних методів і створює низку технічних викликів, пов'язаних з уникненням мерехтіння, збереженням якості освітлення та забезпеченням енергетичної ефективності.

Одним із ключових питань є досягнення компромісу між швидкістю передачі даних, стійкістю до шумів та споживанням енергії. Різні методи модуляції – такі як *On-Off Keying (OOK)*, *Pulse-Width Modulation (PWM)* і *Color-Shift Keying (CSK)* – демонструють суттєві відмінності за спектральною ефективністю та енергетичними характеристиками. Тому дослідження енергоефективності цих методів є важливим для розробки високопродуктивних *VLC*-систем нового покоління. Оптимізація модуляції дозволяє мінімізувати енергоспоживання при збереженні необхідної якості зв'язку, що має особливе значення для побудови екологічно ефективних бездротових технологій освітлення та позиціонування.

**Аналіз останніх досліджень.** Вже упродовж тривалого часу зростає інтерес до технологій *VLC / Li-Fi*, що обумовлено їхнім потенціалом поєднувати освітлення й високошвидкісну передачу даних. Сучасні огляди узагальнюють прогрес у цифровій обробці сигналів, апаратних рішеннях та експериментальних демонстраціях, які дозволяють досягати високих пропускних здатностей за допомогою *LED* і спеціалізованих приймачів [1], [2]. Разом з цим література показує, що практичне розгортання обмежується реальними властивостями світлодіодів (люмінофорні затримки, нелінійність), вимогами до димінгу та уникнення видимого мерехтіння, а також впливом фонового освітлення на *SNR/BER* [1], [11].

Одне з головних напрямків – розвиток багатовимірних та багатоканальних підходів (*CSK, MIMO, OFDM*-подібні схеми) для підвищення спектральної ефективності. Роботи з *CSK* підкреслюють перевагу кольорової мультиканальної передачі, що дозволяє інтегрувати передачу інформації та підтримувати біле освітлення; одночасно вони вказують на підвищені вимоги до калібрування, спектральної чутливості приймача та потребу у підвищеному *SNR* для забезпечення низького *BER* [5], [6]. Дослідження *MIMO-VLC* демонструють додаткові

можливості підвищення пропускної здатності, проте вказують на ускладнення задач калібрування просторових каналів та енергетичні накладні витрати апаратури [3], [12].

Інша велика група робіт присвячена інтенсивнішим модуляціям, які сумісні з функцією освітлення – OOK, PWM, PPM і їхнім модифікаціям (MPPM, EPPM, MEPPM, VPPM). Загальні огляди та експерименти підтверджують: прості схеми (OOK, PWM) забезпечують простоту реалізації та відносну енергоефективність при фіксованому середньому освітленні, тоді як імпульсні схеми (PPM-різновиди) мають кращу енергоефективність і стійкість до нелінійностей, але жертвують спектральною щільністю без подальших модифікацій або гібридизації [1], [11]. Нові покращення VPPM та варіативних PPM-рішень спрямовані на одночасне забезпечення димінгу й стійкого передавання, зокрема шляхом детекторних алгоритмів, нечутливих до рівня димінгу [7-8].

У сфері приймачів і методів детекції помітний прогрес у розробці покращених схем виявлення для PPM та інших нечутливих до фази режимів; це зменшує втрати продуктивності енергодетекційних схем і дозволяє підвищувати швидкість при заданому BER [9], [10]. Також висвітлюються підходи до енергоефективної оптимізації ресурсів (передача + розподіл потужності, SLIPT, NOMA, RIS-допомога) у VLC-мережах, що демонструють значний інтерес до оптимізації споживання енергії як ключового індикатора енергоефективності системи [13], [14].

Окрім технічних рішень, значна частина останніх праць приділяє увагу гібридизації Li-Fi та Wi-Fi (HLWNets) для досягнення надійності покриття та ефективного керування ресурсами у багатоклієнтських середовищах; ці дослідження розглядають взаємодію на мережевому рівні, вплив модулювання на мобільність і заходи щодо балансування навантаження й керування переходами між середовищами зв'язку [4].

Незважаючи на помітний прогрес, у літературі виявляються системні прогалини. По-перше, відсутні узгоджені, експериментально підтверджені методики прямого порівняння різних модулювань за спектральними та енергетичними критеріями з урахуванням нелінійних характеристик білих LED і реальних шумових моделей. По-друге, для CSK все ще не вироблено практично зручних процедур калібрування під різні типи джерел (RGB/QLED) і реальні внутрішні відбивні середовища; це ускладнює її впровадження в широких осередках освітлювального обладнання [5]. У цьому контексті систематичний енергетичний аналіз для ключових схем модуляції при фіксованому середньому освітленні, із моделями нелінійності LED і реалістичними шумовими умовами, заповнює помітну прогалину між теоретичними оцінками та інженерними вимогами до впровадження VLC у освітлювальні мережі. Такий підхід дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо вибору модуляції залежно від завдань освітленості, зон покриття та апаратних обмежень.

**Метою даного дослідження є кількісне порівняння енергоефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (VLC/Li-Fi) з урахуванням практичних обмежень світлодіодних джерел випромінювання та фотоприймальних пристроїв.**

**Виклад основного матеріалу.** Модуляція у системах Li-Fi має суттєві відмінності від модуляції у традиційних радіочастотних системах. У радіочастотних каналах інформація може кодуватися за фазою та амплітудою сигналу, проте у випадку видимого світла такі методи непридатні. Це пов'язано з тим, що світловий потік не може змінювати фазу або амплітуду у звичному радіочастотному сенсі, оскільки фотодетектори сприймають лише інтенсивність випромінювання, а не його фазу.

Отже, у VLC модуляція досягається шляхом зміни інтенсивності світла, де рівень яскравості світлодіода відповідає інформаційному вмісту переданого сигналу. Такий принцип отримав назву модуляції за інтенсивністю із подальшою детекцією прямого випромінювання.

Під час розробки схеми модуляції для VLC необхідно враховувати два основні фактори:

1) Уникнення видимого мерехтіння. Одним із головних завдань є запобігання видимому мерехтінню, адже основна функція світлодіодів – це енергоефективне освітлення. Для уникнення дискомфорту зорового сприйняття частота перемикання сигналу має бути понад 200 Гц, а у високошвидкісних системах може досягати 10 МГц. Такий підхід дозволяє передавати дані без погіршення якості освітлення для користувача.

2) Збереження якості яскравості. Протоколи мультиплексування не повинні негативно впливати на яскравість освітлення, тому вибір методу модуляції має враховувати цю вимогу. Різні види діяльності потребують різного рівня освітленості. Наприклад, для звичайної візуальної активності у громадських приміщеннях необхідно 30–100 люкс. Таким чином, дизайн

модуляції повинен забезпечувати можливість димування – плавного регулювання яскравості без спотворення переданих даних.

Одним із найпростіших і найпоширеніших методів є модуляція ввімкнення/вимкнення (On-Off Keying, OOK). У цьому методі біт «1» передається шляхом вмикання світлодіода, а біт «0» – його вимкненням. На практиці LED не вимикається повністю, а лише зменшує інтенсивність випромінювання, що забезпечує комфортне освітлення. Перевагами OOK є простота реалізації та низька обчислювальна складність, однак обмеженням є низька швидкість передавання даних, особливо у випадку використання білих світлодіодів із жовтим люмінофором, який має повільну часову реакцію. Застосування фільтрації та аналогового вирівнювання дозволило підвищити швидкість передавання до понад 100 Мбіт/с, проте принципово метод залишається малоефективним для високошвидкісних систем.

Для підвищення ефективності було запропоновано імпульсні методи модуляції, у яких інформація кодується параметрами імпульсів, такими як ширина або положення у часі. Модуляція за шириною імпульсу (Pulse Width Modulation, PWM) регулює тривалість імпульсу відповідно до рівня яскравості. Це дозволяє не лише передавати дані, а й реалізовувати функцію димування, тобто регулювання освітленості у межах 0–100%. Недоліком PWM є низька швидкість передачі (до кількох кілобіт за секунду), тому у подальших роботах вона поєднувалася з іншими методами, наприклад, із дискретною багатотональною модуляцією (Discrete Multitone, DMT), що дозволило одночасно керувати освітленням і передавати дані на вищих швидкостях.

Суттєвим кроком уперед у розвитку VLC стала модуляція зі зсувом кольору (Color Shift Keying, CSK), запропонована у стандарті IEEE 802.15.7. Її суть полягає у зміні відносних інтенсивностей трьох кольорових компонентів – червоної, зеленої та синьої – у джерелі світла типу RGB. Комбінація цих інтенсивностей створює біле світло, але одночасно передає інформацію через зміни координат кольору у колірному просторі. На відміну від систем, що базуються на білих світлодіодах із жовтим люмінофором, CSK забезпечує значно більшу швидкість передавання даних, оскільки кожен колірний канал може використовуватися як незалежний носій інформації (табл. 1). При цьому використовується хроматична діаграма (Рис. 1), де координати  $x$  і  $y$  відповідають параметрам кольору, сприйнятим людським оком. CSK є перспективним методом, оскільки дозволяє досягти високих швидкостей передавання без погіршення якості освітлення.

Таблиця 1 – Центральні, кодові та хроматичні координати, що використовуються сімома смугами, які застосовуються в CSK [6]

Діапазон (нм)	Код	Центр (нм)	Координати (x, y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

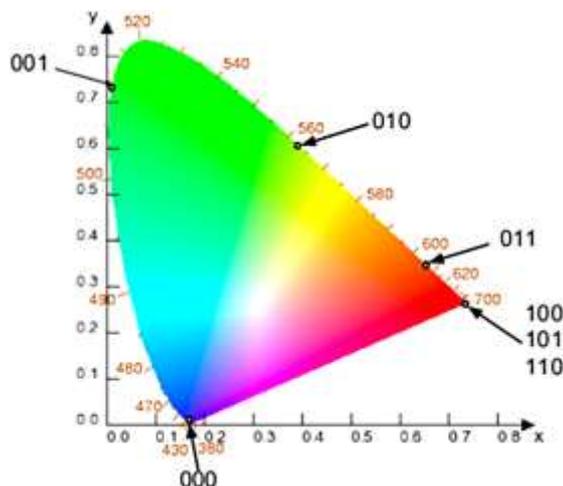


Рисунок 1 – Хроматична діаграма CSK [6]

Іншим поширеним методом є модуляція за позицією імпульсу (Pulse Position Modulation, PPM), у якій часова тривалість символу ділиться на рівні інтервали, а передавання здійснюється в одному з них. Такий підхід має високу енергетичну ефективність, але страждає на низьку швидкість передачі, оскільки в кожному символі використовується лише один імпульс. Для подолання цього обмеження було розроблено модифікації: багатоімпульсну PPM (MPPM), яка передбачає кілька імпульсів у межах одного символу, що підвищує спектральну ефективність; виключену PPM (EPPM), створену для систем, обмежених піковою потужністю; та багаторівневу EPPM (MEPPM), яка додатково збільшує щільність передавання інформації. Порівняльний аналіз цих методів показує, що вони забезпечують високу стійкість до мерехтіння та нелінійностей світлодіодів, водночас зберігаючи можливість регулювання яскравості (табл. 2).

Таблиця 2 – Аналіз ефективності видів модуляції за позицією імпульсу [6]

Метод модуляції	Підтримка димування	Спектральна ефективність	Сприйнятливості до мерехтіння	Вплив нелінійності LED
MPPM (Multipulse PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
EPPM (Expurgated PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
MEPPM (Multilevel EPPM)	Так	2–3	Дуже низька	Низький

Традиційна модуляція за позицією імпульсу (PPM, Pulse Position Modulation) передбачає використання високої напруги для представлення логічної «1». Оскільки інтенсивність світла пов'язана з робочим циклом сигналу, надто розріджена послідовність даних у PPM може призводити до зниження середньої яскравості.

Щоб усунути цей недолік, застосовується інверсна модуляція з лінійним положенням імпульсу (I-LPPM, Inverted Linear Pulse Position Modulation), у якій позиція імпульсу PPM інвертується. Це забезпечує збільшення середньої переданої потужності світлодіода і, відповідно, підвищує якість освітлення.

Крім цього, стандарт IEEE 802.15.7 визначає змінну модуляцію за позицією імпульсу (VPPM, Variable Pulse Position Modulation), що дозволяє уникнути ефекту мерехтіння; реалізувати механізм регулювання яскравості (dimming control). Попри переваги, VPPM наразі застосовується лише в обмеженій кількості систем позиціонування, і потребує подальших наукових досліджень для підвищення ефективності її використання у VLC-технологіях.

**Методика дослідження.** Одним із ключових аспектів проектування всіх видів систем зв'язку є енергетична ефективність, тобто здатність системи передавати максимальну кількість інформації при мінімальних енергетичних витратах [15]. У контексті VLC це питання набуває подвійного значення: енергія витрачається не лише на передачу даних, але й на освітлення, тому метод модуляції має забезпечувати баланс між інформаційною продуктивністю та якістю освітлення.

Енергоефективність у VLC оцінюється через відношення кількості переданих бітів до спожитої енергії, виражене у бітах на джоуль, або через енергію на біт  $E_b$ , що визначається як:

$$E_b = \frac{P_{el}^{сеп}}{R_b}, \quad (1)$$

де  $P_{el}^{сеп}$  – середня електрична потужність LED/системи,  $R_b$  – швидкість бітів.

Оскільки у VLC сигнал формується зміною інтенсивності світлового потоку, оптична потужність, яка досягає фотоприймача, визначається як функція геометрії простору, властивостей джерел та фотоприймача. Для однорідного набору  $N$  LED джерел з ламбертівським розподілом інтенсивності можна записати [7]:

$$P_s = \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R P_{T_i}}{2\pi D_i^2} \cos^m(\theta_i) \cos^M(\psi_i) T_s(\psi_i) g(\psi_i), \quad (2)$$

де  $D_i$  – відстань між  $i$ -м світлодіодом та приймачем,  $A_R$  – ефективна площа фотодетектора,  $P_{T_i}$  – оптична потужність джерела,  $\theta$  – кут випромінювання,  $\psi$  – кут падіння на приймач,  $T_s(\psi_i)$  –

коефіцієнт пропускання оптичного фільтра,  $g(\psi_i)$  – коефіцієнт підсилення концентратора, а  $m$  та  $M$  – ламбертівські порядки для джерела та приймача відповідно.

Електричний струм на виході фотодетектора визначається:

$$I_s = R \cdot P_r = R(P_s + P_{bg}), \quad (3)$$

де  $R$  – чутливість фотодіода, А/Вт,  $P_s$ ,  $P_{bg}$  – оптична потужність, що надходить від джерела (сигнальна складова) та потужність фонового освітлення.

Співвідношення сигнал/шум, **SNR**, в приймачі:

$$SNR = \frac{(R \cdot P_s)^2}{\sigma_n^2}. \quad (4)$$

де  $\sigma_n^2$  – сумарна дисперсія шуму.

Шумова модель включає стрілочний, термічний та темновий шуми [7]:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{therm}^2 + \sigma_{dark}^2, \quad (5)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_sB, \quad (6)$$

$$\sigma_{therm}^2 = \frac{4kTB}{R_l}, \quad (7)$$

$$\sigma_{dark}^2 = 2qRP_{bg}B, \quad (8)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура (300 К),  $B$  – смуга частот приймача ( $B \approx R_b/2$ ),  $R_l$  – еквівалентний опір навантаження.

Вимоги по SNR для кожного типу модуляції визначають, яка оптична (і отже електрична) потужність потрібна для досягнення цільового BER. Різні моди мають різні вимоги: у загальному, багаторівневі/мультисимвольні методи (CSK з багатоточковою констеляцією) потребують вищого SNR ніж просте дворівневе ООК для однакового BER. Оцінка необхідної електричної потужності здійснюється як:

1) Для ООК методу. Символ «1»: LED випромінює ( $P_{on}=P_t$ ). Символ «0»: ( $P_{off}=0$ ). При випадкових 0/1 з ймовірністю  $D=0.5$  середня оптична потужність  $N$  LED джерел:

$$\bar{P}_t^{OOK} = NP_tD. \quad (9)$$

Електрична потужність (за ефективністю LED  $\eta$ ):

$$P_t^{OOK} = \bar{P}_t^{OOK} / \eta. \quad (10)$$

2) При використанні PWM інформація кодується шириною імпульсу; при тій самій середній яскравості PWM може застосувати вищий піковий струм, але середня оптична потужність для заданого рівня освітленості однакова. Для енергетичного аналізу при тому ж середньому освітленні:  $\bar{P}_{el}^{PWM} \approx \bar{P}_t^{OOK}$ , але спектральні властивості та SNR на біт можуть відрізнитись (через ширину імпульсу/частоту PWM і ширину каналу).

3) Для CSK передача символів за зміною відносної інтенсивності каналів різних кольорів (наприклад RGB). Загальна оптична потужність розподіляється по кольорах.

Для даного середнього освітлення сумарна оптична потужність може бути такою ж, як у ООК, але щоб досягти того ж BER, CSK зазвичай вимагає вищого SNR (внаслідок меншого мінімального евклідового відстані констеляції у відтінковому просторі), отже потребує більшої потужності (або кращого приймача).

Розглянемо приклад розрахунку для моделі з чотирьох світлодіодів, розміщених у вигляді квадратної решітки в межах одного приміщення. Розглянуто режим мультиплексування AllSame – усі LED передають однакову інформацію; сигнали сумуються на приймачі, що покращує SNR.

Для досягнення цільового рівня бітової похибки ( $BER \approx 10^{-6}$ ) приймемо як необхідне опорне значення  $SNR=10$  для всіх методів модуляції.

Порівняльний аналіз виконано при однаковому середньому рівні освітленості, що дозволяє об'єктивно оцінити енергоефективність кожної схеми без спотворення освітлювальних характеристик. Для базових умов: кімната  $4 \times 4$  м; LED розташовані у сітці на стелі (висота 3,0 м) у точках (1,1), (1,3), (3,1), (3,3) в метрах; фотоприймач розміщений у центрі кімнати на висоті 0,85 м (робоча поверхня); вертикальна відстань від LED до приймача  $z = 3.0 - 0.85 = 2.15$  м. Параметри LED/приймача: пікова оптична потужність одного LED  $P_l = 0.5$  Вт (оптична); кут напівсили  $\theta_{1/2} = 60^\circ$ , (тоді Ламбертівський порядок  $m = 1$ ); площа фотодіода  $A_{pd} = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ; чутливість фотодіода  $R = 0.4$  А/Вт; оптичний фільтр і концентратор з параметрами:  $T_s = 1$ ,  $g = 1$ ; LED електрооптична ефективність  $\eta = 0.30$  (30%), бітрейт  $R_b = 10$  Мбіт/с; умовна дисперсія шумового струму  $\sigma_n = 10^{-6}$  А; усі 4 LED передають однаково (симетрично).

Результати узагальнено у вигляді показників в таблиці 3.

Таблиця 3 – Енергетика випромінювання для трьох видів модуляції

Модуляція	Середня опт. потужн., Вт	Середня ел. потужн., Вт	Енергія на біт, Дж/біт	Ефективність, біт/Дж
OOK	1.0	3.333	$3.33 \cdot 10^{-7}$	$3.0 \cdot 10^6$
PWM	$\approx 1.0$	$\approx 3.333$	$\approx 3.33 \cdot 10^{-7}$	$\approx 3.0 \cdot 10^6$
CSK	2.0	6.667	$6.67 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^6$

За однакового середнього освітлення OOK і PWM дають схожу енергоефективність, бо середня оптична потужність однакова. PWM може мати інші переваги/недоліки (легкість димування, простота апаратної реалізації).

CSK у загальному випадку буде менш енергоефективним, якщо для досягнення того ж BER вимагає вищого SNR (а отже і більшої оптичної потужності). Однак CSK дає додаткові переваги (мультиканальна передача, кольорові констеляції, сумісність з RGB-освітленням).

Встановлено ключові фактори, що впливають на показники ефективності в практичних застосуваннях числа: ефективність LED  $\eta$ , чутливість фотоприймача  $R$ , площа фотодіода  $A_{pd}$ , **рівень шуму**, бітрейт, спосіб мультиплексування (якщо LED несуть різні дані), затінення та рефлексії (множинні відбиття від поверхонь кімнати підвищують  $P_r$  і поліпшують енергоефективність). Було отримано залежності середньої електричної потужності системи від ключових параметрів для трьох видів модуляції для забезпечення цільового SNR (рис. 2).

Аналіз показує, що:

- CSK потребує значно більшої потужності для досягнення заданого BER, що пояснюється вищими вимогами до SNR через використання багаторівневої констеляції кольорів;
- OOK і PWM демонструють близькі показники, оскільки їхні SNR-вимоги ідентичні, а відмінність полягає лише у часовому співвідношенні імпульсів;
- підвищення ефективності світлодіодів  $\eta$  або чутливості фотоприймача  $R$  прямо зменшує необхідну електричну потужність;
- збільшення площі фотодіода  $A_{pd}$  покращує збір оптичної потужності, проте надмірне зростання може збільшити шум і є обмеженим технологічно;
- зростання швидкості передавання  $R_b$  або ширини смуги  $B$  веде до зростання шумів і, відповідно, до потреби у вищій потужності;
- вплив затінення та відбиттів має критичний характер – зменшення  $K_0$  через часткове перекриття променів може підвищити необхідну потужність на порядок;

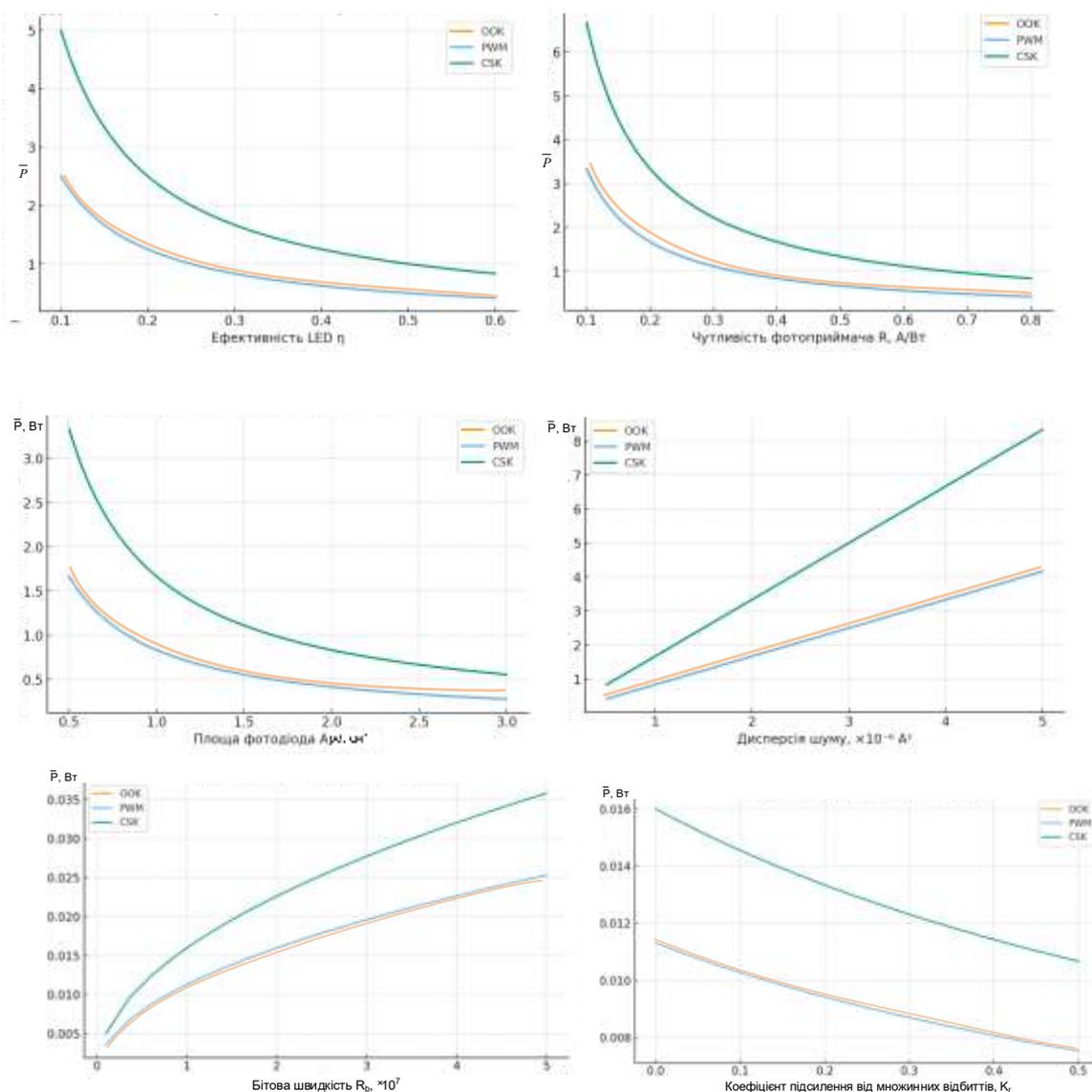


Рисунок 2 – залежність середньої електричної потужності системи від ключових параметрів VLC-системи

Ці результати наочно демонструють: OOK і PWM мають близькі енергетичні характеристики, тоді як CSK забезпечує більшу пропускну здатність ціною підвищеного енергоспоживання, що підтверджує висновки аналітичної частини дослідження. Дослідження є підґрунтям для розробки адаптивних методів вибору модуляції залежно від вимог до освітленості, швидкості та енергоспоживання.

**Висновки.** Проведене дослідження дозволило оцінити енергетичну ефективність основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла та порівняти різні методи не лише за швидкістю передавання або стійкістю до завад, а й за критерієм енергії на біт при сталому рівні освітленості, що є критично важливим для практичного впровадження у системах «розумного» освітлення, автомобільних Li-Fi-комунікаціях та мережах IoT. Розроблена аналітична модель із урахуванням шумових процесів, ефективності LED, чутливості фотоприймача, площі детектора та впливу відбиттів дала змогу кількісно визначити залежність середньої електричної потужності системи від цих параметрів при фіксованому рівні освітленості. Отримані результати показали, що методи On-Off Keying та Pulse-Width Modulation мають практично однакову енергетичну ефективність і є доцільними для застосування у побутових та офісних VLC-системах, де пріоритетом є низьке енергоспоживання та стабільна якість освітлення. Водночас метод Color-Shift Keying, незважаючи на більші енергетичні витрати, продемонстрував перевагу в спектральній ефективності та потенціал для реалізації високошвидкісних каналів передачі даних. Врахування фонових шумів та множинних відбиттів

показало, що ці фактори істотно впливають на необхідну потужність для досягнення цільового SNR. Таким чином, запропонована методика енергетичного аналізу, що поєднує аналітичні моделі з урахуванням шумових процесів, оптичних параметрів і геометрії середовища, може бути застосована для оцінювання ефективності гібридних і багаторівневих схем модуляції, зокрема Variable Pulse Position Modulation (VPPM), Multi-Pulse PPM (MPPM), Multi-Level Expurgated PPM (MEPPM), Discrete Multitone Modulation (DMT) та Color-Intensity Modulation (CIM).

#### Інформаційні джерела

1. Loureiro P. A., Guiomar F. P., Monteiro P. P. Visible light communications: A survey on recent high-capacity demonstrations and digital modulation techniques. *Photonics*, 10(9), 993, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
2. Gupta S., Roy D., Bose S., Dixit V., Kumar A. Illuminating the future: A comprehensive review of visible light communication applications. *Optics & Laser Technology*, 177, 111182, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111182>
3. Sejan M. A. S., et al. A comprehensive survey on MIMO visible light communication: Current research, machine learning and future trends. *Sensors*, 23(2), 739, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020739>
4. Besjedica T., Fertalj K., Lipovac V., Zakarija I. Evolution of hybrid LiFi-WiFi networks: A survey. *Sensors*, 23(9), 4252, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094252>
5. Becerra R., Azurdia-Meza C. A., Palacios Játiva P., Soto I., Sandoval J., Ijaz M., Carrera D. F. A wavelength-dependent visible light communication channel model for underground environments and its performance using a color-shift keying modulation scheme. *Electronics*, 12(3), 577, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030577>
6. Yu T. C., Huang W. T., Lee W. B., Chow C. W., Chang S. W., Kuo H. C. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications. *Crystals* 2021, 11, 1098, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11091098>
7. Zhu Z., Yang Y., Chen M., Guo C., Cheng J., Cui S. A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges. *arXiv preprint*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.13893>
8. Beguni C. et al. Increasing Vehicular Visible Light Communications Range by Modified VPPM. *Sensors. PMC*, Mar 31; 23(7): 3656, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23073656>
9. Khani H. Improved Detection Schemes for Non-coherent PPM. *Wireless Pers. Commun.*, 131, 2173–2192, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10537-7>
10. Islam M. S., Younis M., Mahmud M. and Choa F. S. An Efficient Pulse Position Modulation Scheme to Improve the Bit Rate of Photoacoustic Communication. 2023 32nd Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA, 2023, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WOCC58016.2023.10139346>.
11. He C., Ali W. Advances in visible light communication. *Photonics*, 10(11), 1277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10111277>
12. Hassan E. S., Jabbari A., Alharbi A. A. Evaluating MIMO-VLC System Performance: Modulation Techniques and Ambient Light Interference Effects. *Photonics*, 12(7), 649, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics12070649>
13. Ncube W. Z., Qidan A. A., El-Gorashi T., Elmirghani J. M. N. On the energy efficiency of Laser-based Optical Wireless Networks. *ArXiv*, arXiv:2203.10904, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.10904>
14. Ihsan A. et al. Energy-Efficient TDMA-NOMA for RIS-Assisted Ultra-Dense VLC Networks. 2024. 13 p. URL: <https://strathprints.strath.ac.uk>
15. Zablotskyi V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022. PP. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
07.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р