

О.І. Ластівка, аспірант
О.П. Нечипорук, д.т.н., проф.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Дослідження ефективності модуляційних методів для забезпечення якості передачі даних в інформаційних мережах

У статті розглянуто актуальні проблеми забезпечення надійності каналів передачі даних у сучасних інформаційних мережах. Визначено основні дестабілізуючі чинники, що впливають на якість функціонування бездротових каналів, зокрема багатопроменеве поширення сигналу, завмирання та доплерівське зміщення. Проведено аналіз ефективності класичних методів модуляції (BPSK, QPSK) та сучасних технологій багатотональної модуляції (OFDM) з точки зору їхньої завадостійкості та енергетичної ефективності. Особливу увагу приділено комп'ютерному моделюванню, яке дозволило дослідити поведінку каналів за різних рівнів відношення сигнал / шум та у випадку частотних зсувів. Побудовані залежності ймовірності бітової помилки (BER) підтверджують теоретичні оцінки та демонструють переваги OFDM у середовищах із багатопроменевими викривленнями. Також запропоновано підхід до адаптивної зміни параметрів модуляції залежно від умов каналу, що дає можливість підвищити ефективність використання ресурсів мережі та забезпечити стабільність функціонування телекомунікаційних систем. Результати дослідження можуть бути застосовані під час проектування систем мобільного та супутникового зв'язку, сенсорних і спеціалізованих мереж, а також у критично важливих інформаційних технологіях, де особливо значущими є вимоги до надійності та пропускну здатності.

Ключові слова: інформаційні технології; телекомунікаційні мережі; канали передачі даних; завмирання сигналу; методи модуляції; BPSK; QPSK; OFDM; завадостійкість; моделювання.

Актуальність теми. Розвиток сучасних інформаційних технологій значною мірою пов'язаний із постійним зростанням вимог до швидкості, надійності та захищеності передачі даних у телекомунікаційних мережах. Особливої актуальності набувають бездротові системи зв'язку (Wi-Fi, LTE/5G, сенсорні та AD-HOC мережі), де параметри каналу істотно залежать від зовнішніх умов і можуть піддаватися дії дестабілізуючих чинників.

До таких чинників належать багатопроменевість, завмирання сигналу, доплерівські зсуви частоти, індустриальні та навмисні завади. Їх наявність знижує пропускну здатність і якість обслуговування користувачів, що є критичним для інформаційних технологій, орієнтованих на передавання великих обсягів мультимедійних даних у реальному часі.

Тому дослідження методів моделювання каналів передачі даних і вибору оптимальних схем модуляції є важливим завданням, яке дозволяє підвищити ефективність функціонування телекомунікаційних мереж. Одним із перспективних підходів є використання енергетично ефективних методів модуляції (BPSK, QPSK) та багаточастотних технологій (OFDM), які забезпечують компроміс між швидкістю передавання та завадостійкістю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Останні дослідження у сфері інформаційних технологій підтверджують актуальність проблеми підвищення надійності та ефективності передачі даних. У колективній монографії під редакцією С.Кашкевич [1] систематизовано математичні методи, що можуть бути використані для побудови систем підтримки прийняття рішень у складних телекомунікаційних середовищах. Методи комплексного аналізу та багатовимірного прогнозування, запропоновані В.Ковалем, О.Нечипорук та ін. [2, 6–8], дозволяють здійснювати оцінку стану інформаційних об'єктів і враховувати дестабілізуючі чинники у мережах. Проблемам захисту даних у процесі їх передавання присвячено фундаментальну працю В.Сталлінгса [3], де висвітлено сучасні підходи до криптографії та мережевої безпеки. У роботах Ю.Мелешка, О.Дрієва та Г.Дрієвої [4] запропоновано підхід до забезпечення якості обслуговування, який враховує особливості передачі інформації в мережах із динамічними параметрами. Додатковий напрям досліджень представлений у роботі Х.Чена [5, 9–11], де на основі нечіткої аналітичної ієрархічної процесії запропоновано методи оцінювання персоналізованого рівня сервісу, що безпосередньо пов'язано із завданнями управління якістю у сучасних інформаційних мережах.

Метою статті є аналіз дестабілізуючих чинників у каналах передачі даних, а також оцінка ефективності різних модуляційних методів для забезпечення надійності інформаційних технологій.

Викладення основного матеріалу. Канал зв'язку у сучасних інформаційних мережах належить до категорії бездротових каналів, які характеризуються складними умовами поширення сигналу. Типовими

фізичними явищами, що впливають на якість передачі, є багатопроменевість, відбиття, дифракція та розсіювання.

Відбиття виникає при взаємодії електромагнітної хвилі з великими перешкодами (будівлі, поверхня землі), дифракція – при перекритті траси поширення щільними об'єктами, а розсіювання – за наявності дрібних неоднорідностей середовища.

У сукупності ці ефекти формують завмирання сигналу, що можуть проявлятися як у великомасштабній (затіннення, втрати на трасі), так і у дрібномасштабній (швидкі флуктуації рівня сигналу) формах.

У більшості бездротових систем зв'язку розподіл миттєвих значень сигналу описується законом Релея або Райса. Це дозволяє адекватно моделювати поведінку каналу та прогнозувати якість передачі даних у різних умовах. Важливим є також урахування параметрів середовища поширення: довжини хвилі сигналу, відстані між передавачем і приймачем, а також впливу додаткових джерел завад.

Дестабілізуючі частотно-селективні зміни сигналу. Канал передачі інформації є частотно-селективним, а його параметри змінюються в часі. Тому при використанні звичайної одночастотної модуляції для забезпечення високошвидкісної передачі даних потрібна висока складність адаптивного еквалайзера, апаратурна реалізація якого є технічно складною. Один із ефективних підходів у цьому випадку – застосування технології мультиплексування з кодованим ортогональним частотним поділом каналів (COFDM), що має високу спектральну ефективність і перешкодостійкість.

Радіоканал зв'язку в інформаційних системах характеризується великим радіусом дії та високою швидкістю передачі даних. Це призводить до досить великої різниці між часом приходу сигналу по можливих шляхах його розповсюдження та високого доплерівського зміщення частоти.

Але при великому доплерівському зміщенні частоти ортогональність частот втрачається, і якість демодуляції сигналів OFDM сильно погіршується. Тому необхідна оцінка впливу доплерівського частотного зміщення на ефективність передачі даних з допомогою OFDM модуляції.

Канал зв'язку описується законом Райса. Сценарій описується двопроменевою моделлю, в якій відбиті затримані промені, що є релієвським процесом. Коефіцієнт Райса (відношення енергії компоненти прямої радіовидимості до сумарної розсіяної енергії сигналу) для цього сценарію набуває значення в діапазоні 2–20 дБ, типові значення – 15 дБ.

Висока спектральна ефективність OFDM модуляції забезпечується досить близьким розташуванням частот сусідніх піднесучих коливань, які генеруються спільно так, щоб сигнали всіх піднесучих були ортогональні.

Особливістю OFDM є використання циклічного префікса (CP), що дозволяє зменшити міжсимвольні інтерференції у каналах із відбиттям сигналу. Довжина CP визначає баланс між надійністю та спектральною ефективністю: його збільшення покращує якість прийому, але одночасно зменшує пропускну здатність.

Таким чином, аналіз сучасних методів модуляції та технологій обробки сигналів свідчить про необхідність адаптивного підходу до вибору параметрів системи залежно від умов каналу. Це забезпечує як підвищення завадостійкості, так і раціональне використання ресурсів інформаційних мереж.

Таблиця 1

Переваги та недоліки BPSK, QPSK та OFDM

Метод	Переваги	Недоліки
BPSK	Простота реалізації, висока завадостійкість	Низька швидкість передачі
QPSK	Вища швидкість, ніж у BPSK	Чутливіша до шуму
OFDM	Висока спектральна ефективність, стійкість до багатопроменевості	Складність реалізації, проблема PAPR

Для узагальнення основних характеристик розглянутих методів модуляції у таблиці 1 наведено їх переваги та недоліки. Це дозволяє порівняти ефективність схем за основними критеріями та обґрунтувати вибір для подальшого моделювання.

Класифікація перешкод передбачає поділ їх на навмисні (радіоелектронні атаки, створення завад) та ненавмисні (індустріальні шуми, взаємні перешкоди від інших пристроїв). В обох випадках знижується співвідношення сигнал / шум, що призводить до втрати даних або зростання ймовірності помилки.

Залежно від характеру завад застосовуються різні методи захисту: використання завадостійких кодів, адаптивних схем модуляції, просторового та частотного рознесення сигналів. Комплексний підхід до протидії перешкодам дозволяє підвищити надійність функціонування телекомунікаційних систем навіть у несприятливих умовах.

На рисунку 1 показано, що зі зростанням частоти сигналу втрати збільшуються, що підтверджує необхідність застосування антенних решіток чи ретрансляторів у високочастотних системах (Wi-Fi, 5G).

Зокрема, у діапазоні 2,4 ГГц, що використовується більшістю побутових бездротових мереж, втрати є відносно помірними, що дозволяє забезпечувати покриття в межах десятків метрів.

У діапазоні 5–6 ГГц (Wi-Fi 5/6) радіус дії суттєво скорочується, і для підтримки стабільного зв'язку потрібна більша щільність точок доступу. У міліметровому діапазоні 24–28 ГГц (5G mmWave) загасання сигналу ще більше зростає, а додатковим чинником стає чутливість до фізичних перешкод, зокрема стін та навіть атмосферних явищ. Це вимагає використання технологій адаптивного формування променя (beamforming), багатопроменевих антенних систем та ретрансляторів для забезпечення належної якості сервісу. Крім того, у перспективі розвитку мереж шостого покоління (6G) планується вихід у терагерцовий діапазон (100–300 ГГц), де вплив загасання стане ще більш критичним. Тому дослідження закономірностей поширення сигналів у високочастотних середовищах є одним із ключових напрямів сучасних інформаційних технологій.

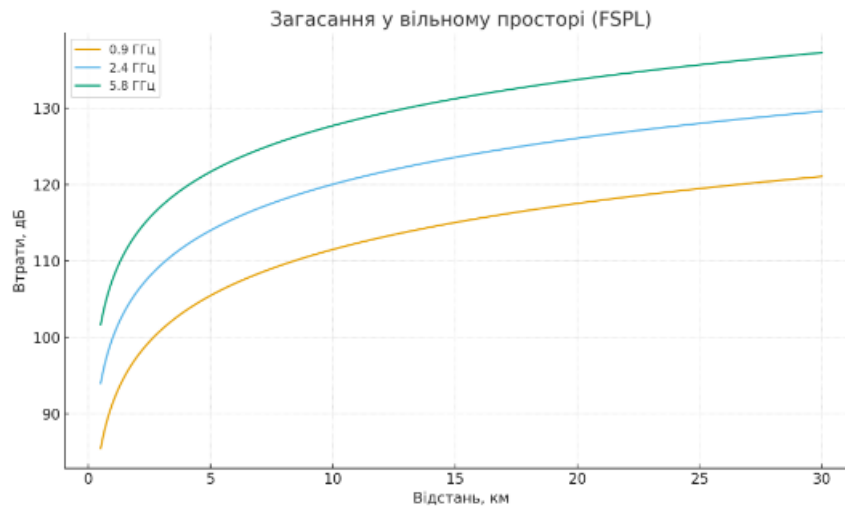


Рис. 1. Залежність втрат у вільному просторі (FSPL) від відстані між передавачем і приймачем

Втрати під час поширення сигналу. Завмирання – це фізичні явища, що призводять до зміни (в основному до зменшення) потужності на вході радіоприймального пристрою каналу радіозв'язку від розрахункової потужності, заданої рівнянням передачі, що зв'язує потужності на виході радіопередавального і на вході радіоприймального пристрою цього радіоканалу.

Радіопередавальний пристрій включає генератор електромагнітних коливань, антенно-фідерний тракт і передавальну антену. Радіоприймальний пристрій включає приймальну антену, антенно-фідерний тракт і приймальний пристрій.

Великомасштабні завмирання описують середнє ослаблення сигналу під час його поширення в каналі зв'язку. Втрати на трасі та затінення – ось два основні механізми, які призводять до ефектів замирань великого масштабу.

Для оцінки якості роботи телекомунікаційних систем широко застосовується показник ймовірності бітової помилки (BER), що відображає залежність надійності передачі від рівня завадостійкості системи.

У різних методах модуляції цей показник може змінюватися, що дозволяє обирати оптимальний варіант для конкретних умов функціонування мережі.

Середні втрати радіосигналу на трасі визначаються за формулою:

$$L(d)[\text{дБ}] = L(d_0)[\text{дБ}] + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma, \quad (1)$$

де $L(d_0)$ – середні втрати на трасі прямої видимості при еталонній відстані d_0 у вільному просторі; d – це відстань між передавачем та приймачем; γ – експонента втрати на трасі, яка залежить від довкілля; X_σ – логарифмічно нормальне завмирання внаслідок затінення.

Середні втрати $L(d_0)$ при поширенні у вільному просторі розраховуються за формулою:

$$L(d_0)[\text{дБ}] = 10 \log(4\pi d_0 / \lambda)^2, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі сигналу.

Якщо відстань d_0 і частота f ($f = c/\lambda$, c – швидкість світла) вимірюються у кілометрах та мегагерцах відповідно, то з рівнянь (1) та (2), було отримано: при $X_\sigma = 0$

$$L(d)[\text{дБ}] = 10\gamma \log(d) + (20 - 10\gamma) \log(d_0) + 20 \log(f) + 32,45. \quad (3)$$

Як видно з рисунка 2, за однакових умов канал із замираннями (Rayleigh) значно погіршує завадостійкість системи. BPSK демонструє кращу енергетичну ефективність порівняно з QPSK.

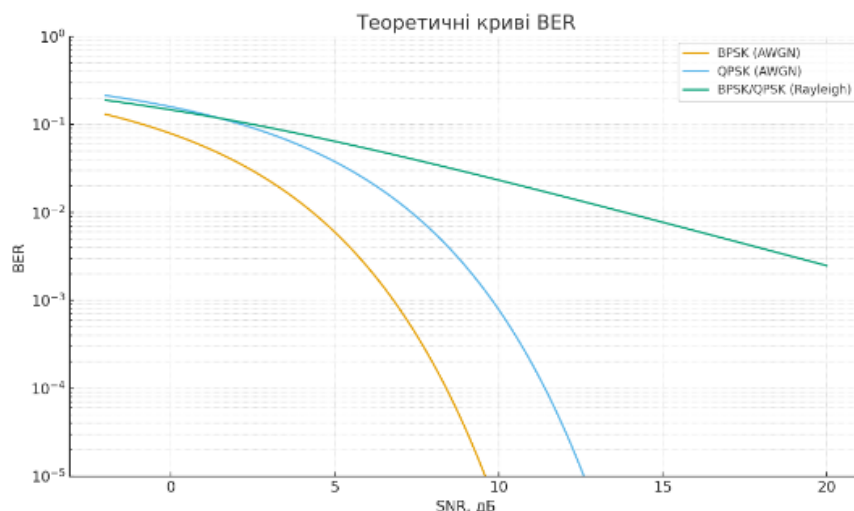


Рис. 2. Теоретичні залежності ймовірності бітової помилки (BER) від SNR для BPSK і QPSK у каналах AWGN та Rayleigh

У гірших умовах поширення $\gamma=3$ згасання сигналу сильно збільшується. Для компенсації такого ослаблення сигналу можна використовувати різні способи, у тому числі підвищення коефіцієнта посилення антен (головним чином, наземний), використання енергетично вигідних видів модуляції, підвищення вихідної потужності передачі (до максимально дозволеної).

Як видно з рисунка 3, навіть невеликий зсув частоти (0,1 відстані між піднесучими) призводить до суттєвого зростання BER, що обґрунтовує необхідність використання алгоритмів частотної синхронізації.

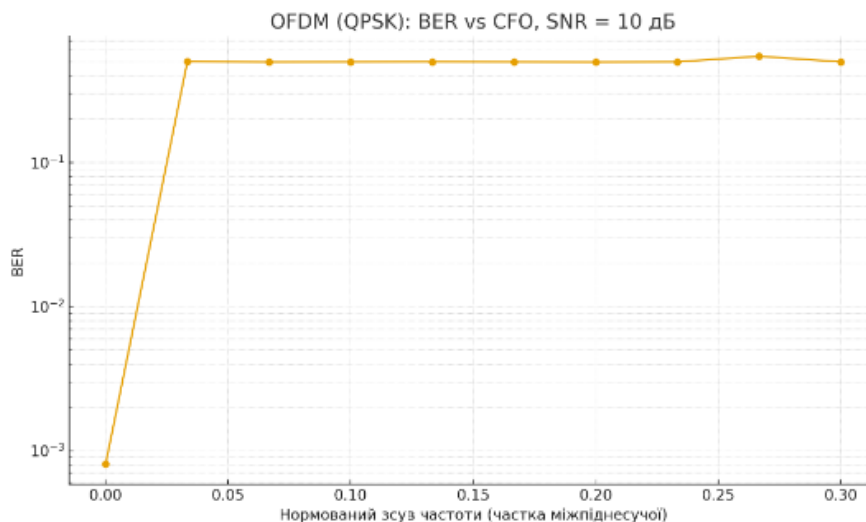


Рис. 3. Вплив нормованого частотного зсуву (CFO) на BER у системі OFDM

На рисунку 4 продемонстровано, що збільшення довжини Cyclic Prefix (CP) зменшує вплив міжсимвольних інтерференцій, але водночас знижує спектральну ефективність, що вимагає компромісного вибору параметрів.

Зазвичай довжину CP обирають у межах 1/4 або 1/8 від тривалості корисного символу, що дозволяє збалансувати втрати пропускну здатності та стійкість до багатопроменевих спотворень. У системах LTE та 5G використовуються різні варіанти CP (normal та extended), які підбираються залежно від умов поширення сигналу та вимог до якості сервісу. Таким чином, правильне налаштування CP є ключовим фактором для забезпечення ефективності та надійності OFDM-систем.

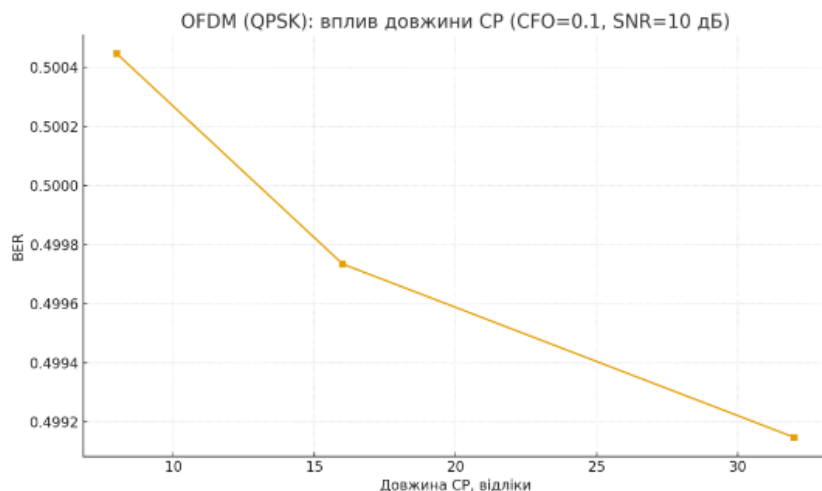


Рис. 4. Залежність BER від довжини циклічного префікса

Моделювання виконано в MATLAB. Розглянуто FSPL, теоретичні BER для BPSK/QPSK у AWGN та Rayleigh; проведено симуляцію OFDM (QPSK, $N_{\text{sub}} = 64$, CP = 16) з оцінкою впливу нормованого частотного зсуву (0...0.3) на BER при SNR = 10 дБ.

У таблиці 2 наведено порівняння ймовірності бітової помилки для різних методів модуляції та умов поширення сигналу.

Таблиця 2

Порівняння ймовірності бітової помилки (BER) для різних методів модуляції та умов каналу

Умови каналу	BPSK (AWGN)	QPSK (AWGN)	QPSK (Rayleigh)	OFDM
SNR = 5 дБ	0,078	0,12	0,21	0,15
SNR = 10 дБ	0,006	0,009	0,05	0,02
SNR = 15 дБ	0,0003	0,0006	0,02	0,005

Отримані результати підтвердили теоретичні оцінки та продемонстрували критичну залежність BER від параметрів каналу і системи, що вказує на необхідність адаптивного підходу під час проєктування телекомунікаційних систем.

Попри високу ефективність OFDM, основними проблемами залишаються високе пікове відношення сигнал / шум (PAPR) та чутливість до частотних зсувів. Це зумовлює необхідність розробки додаткових алгоритмів корекції та підвищення стійкості системи.

Результати проведеного моделювання підтверджують важливість комплексного підходу до аналізу каналів передачі даних у сучасних інформаційних мережах. Порівняння теоретичних та експериментальних залежностей продемонструвало адекватність використаних моделей і дозволило виділити ключові фактори, що впливають на якість зв'язку: частота сигналу, умови поширення, наявність багатопроменевості та частотних зсувів. Це свідчить про доцільність застосування комп'ютерного моделювання як інструменту для прогнозування поведінки систем у реальних умовах експлуатації.

Перспективними напрямками є аналіз роботи систем у більш високих частотних діапазонах (мм-хвилі та терагерцовий спектр), а також вивчення впливу мобільності користувачів і динамічних змін топології мереж. Такий підхід дозволить сформулювати науково обґрунтовані рекомендації для проєктування мереж наступних поколінь (5G, 6G) з підвищеними вимогами до надійності та пропускну здатності.

Якість функціонування каналів передачі даних значною мірою визначається вибором методу модуляції та параметрів системи. Для класичних методів (BPSK, QPSK) характерною є висока завадостійкість у каналах з адитивним білим шумом, проте їх ефективність суттєво знижується у випадку багатопроменевих викривлень. Натомість технологія OFDM завдяки ортогональності частотних складових сигналу забезпечує більш стійку передачу в умовах замирання та інтерференцій.

Важливим фактором також є співвідношення сигнал / шум (SNR), що прямо впливає на ймовірність бітової помилки. При низькому рівні SNR звичайні методи модуляції демонструють значні втрати, тоді як за високих значень стає можливим використання більш складних схем із вищою спектральною

ефективністю. Таким чином, аналіз методів модуляції у різних каналних умовах дає змогу визначити оптимальні рішення для конкретних сценаріїв функціонування інформаційних мереж.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати роботи підтверджують необхідність комплексного підходу до проектування телекомунікаційних систем: використання різних методів модуляції залежно від умов поширення сигналу, застосування корекційних кодів та технологій адаптивної зміни параметрів каналу. Це дозволяє підвищити завадостійкість, ефективність використання спектра та якість обслуговування користувачів.

Таким чином, отримані результати можуть бути використані під час проектування бездротових інформаційних систем, сенсорних мереж, систем мобільного зв'язку та інших телекомунікаційних технологій, де критично важливими є надійність та стабільність каналів передачі даних.

Суттєву цінність має підтвердження адекватності комп'ютерного моделювання як інструменту для прогнозування роботи мереж у реальних умовах.

Перспективним напрямом є розширення досліджень на високочастотні діапазони, де вплив завад і втрат стає ще більш відчутним.

References:

1. Kashkevich, S. (ed.) (2025), *Decision support systems: mathematical support*, TESHNOLOGY SENTER PC, Kharkiv, 202 p., doi: 10.15587/978-617-8360-13-9.
2. Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A. et al. (2023), «Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects», *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, pp. 31–41, doi: 10.15587/1729-4061.2023.276168.
3. Stallings, W. (2023), *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*, 8th ed., Pearson, 752 p.
4. Meleshko, Y., Drieiev, O. and Drieieva, H. (2020), «Metod identyfikatsii profiliv botiv na osnovi neironnykh merezh u rekomendatsiinykh systemakh», *Suchasni informatsiini systemy*, Vol. 4, No. 2, pp. 24–28, doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.05.
5. Chen, H. (2018), «Evaluation of Personalized Service Level for Library Information Management Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process», *Procedia Computer Science*, Vol. 131, pp. 952–958, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.233.
6. Yeromina, N., Kurban, V., Mykus, S. et al. (2021), «The Creation of the Database for Mobile Robots Navigation under the Conditions of Flexible Change of Flight Assignment», *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 11, Issue 05, pp. 37–41, doi: 10.46338/ijetae0521_05.
7. Pérez-González, C.J., Colebrook, M., Roda-García, J.L. and Rosa-Remedios, C.B (2019), «Developing a data analytics platform to support decision making in emergency and security management», *Expert Systems with Applications*, Vol. 120, pp. 167–184, doi: 10.1016/j.eswa.2018.11.023.
8. Osman, A.M.S. (2019), «A novel big data analytics framework for smart cities», *Future Generation Computer Systems*, Vol. 91, pp. 620–633, doi: 10.1016/j.future.2018.06.046.
9. Kashkevich, S., Kuchuk, H., Plekhova, G. et al. (2024), «The development of methods of learning artificial neural networks of intelligent decision-making support systems», *Information and control systems: modelling and optimizations*, collective monograph, TESHNOLOGY SENTER PC, Kharkiv, pp. 102–136, doi: 10.15587/978-617-8360-04-7.ch4.
10. Kashkevich, S., Litvinenko, O., Shyshatskyi, A. et al. (2024), «The method of self-organization of information networks in the conditions of the complex influence of destabilizing factors», *Suchasni informatsiini systemy*, Vol. 8, No. 3, pp. 59–79, doi: 10.20998/2522-9052.2024.3.07.
11. Gozalvez, J. and Coll-Perales, B. (2013), «Experimental evaluation of multihop cellular networks using mobile relays», *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, No. 7, pp. 122–129, doi: 10.1109/MCOM.2013.6553688.

Ластівка Олександр Іванович – аспірант кафедри інтелектуальних кібернетичних систем Державного університету «Київський авіаційний інститут».

<https://orcid.org/0009-0005-4754-259X>.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- штучний інтелект у мережевих технологіях.

Нечипорук Олена Петрівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних кібернетичних систем Державного університету «Київський авіаційний інститут».

<https://orcid.org/0000-0001-8203-7998>.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- системи підтримки прийняття рішень.

Lastivka O.I., Nechyporuk O.P.

Research on the effectiveness of modulation methods for ensuring data transmission quality in information networks

The article discusses current issues related to ensuring the reliability of data transmission channels in modern information networks. The main destabilising factors affecting the quality of wireless channels are identified, in particular multipath signal propagation, fading and Doppler shift. The effectiveness of classical modulation methods (BPSK, QPSK) and modern multitone modulation technologies (OFDM) are analysed in terms of their noise immunity and energy efficiency. Particular attention is paid to computer modelling, which made it possible to study the behaviour of channels at different signal-to-noise ratios and in the case of frequency shifts. The constructed bit error rate (BER) dependencies confirm theoretical estimates and demonstrate the advantages of OFDM in environments with multipath distortions. An approach to adaptive modulation parameter change depending on channel conditions is also proposed, which makes it possible to increase the efficiency of network resource use and ensure the stability of telecommunication systems. The research results can be applied in the design of mobile and satellite communication systems, sensor and specialised networks, as well as in critical information technologies, where reliability and throughput requirements are particularly important.

Keywords: information technologies; telecommunication networks; data transmission channels; signal fading; modulation methods; BPSK; QPSK; OFDM; noise immunity; modelling.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2025.