

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-249-255](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-249-255)
УДК 004.7:004.056

Д.О. Персунов, аспірант
Н.В. Апенько, к.т.н., доц.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Математичне моделювання пропускну́ї здатності каналів передачі даних в умовах завад

У статті розглянуто проблему оцінки пропускну́ї здатності каналів передачі даних в умовах впливу різних видів завад, які знижують якість функціонування інформаційних мереж та телекомунікаційних систем. Визначено, що надійність та ефективність роботи мереж залежить від відношення сигнал/перешкода, яке є базовим критерієм електромагнітної сумісності. Наведено систематизацію чинників, що формують додаткові втрати сигналу: розсіювання та поглинання в об'єктах середовища, вплив фізичних бар'єрів, ефекти багатопроменевого поширення та завмирання, а також частотна розбіжність спектра завад і смуги пропускання приймача. Окремо розглянуто статистичні характеристики завмирань, зокрема швидких і повільних, що описуються відповідними розподілами (Релея, Райса, логнормальним).

Запропонований підхід базується на застосуванні методів математичного моделювання для аналізу енергетичних параметрів сигналу та визначення реальної пропускну́ї здатності каналу в умовах завадового середовища. Показано, що пропускна здатність може бути визначена відповідно до формули Шеннона, яка дозволяє оцінити граничні можливості системи залежно від співвідношення сигнал/шум та ширини смуги пропускання. Проведений аналіз дає можливість оцінити працездатність інформаційної мережі у конкретних умовах електромагнітного середовища та виявити критичні фактори, що обмежують її ефективність.

Практична значущість роботи полягає у тому, що результати математичного моделювання можуть бути використані для проектування нових і вдосконалення існуючих інформаційних систем, оптимізації параметрів телекомунікаційних каналів, а також підвищення стійкості до навмисних та ненавмисних завад. Представлені моделі та залежності є універсальними і можуть застосовуватися як у задачах цивільних бездротових мереж (Wi-Fi, 4G/5G), так і у спеціалізованих системах, де критично важливими є надійність і стабільність зв'язку.

Ключові слова: телекомунікаційні мережі; канали передачі даних; інформаційні мережі; пропускна здатність; математичне моделювання; відношення сигнал/перешкода; електромагнітна сумісність; завадостійкість; багатопроменеве поширення; завмирання сигналу; кібербезпека.

Актуальність теми. Сучасні інформаційні мережі функціонують у складному електромагнітному середовищі, яке формується під впливом як ненавмисних, так і навмисних завад. Зростання щільності розміщення бездротових систем, активне використання мобільних пристроїв та інтенсивний розвиток технологій п'ятого покоління (5G) призводять до ускладнення умов поширення сигналів і підвищення ймовірності виникнення перешкод. У таких умовах питання забезпечення завадостійкості каналів передачі даних та їхньої пропускну́ї здатності набуває особливого значення.

Важливим напрямом досліджень є створення математичних моделей, які дозволяють формалізовано описати вплив завад на роботу каналів зв'язку. Використання подібних моделей забезпечує можливість прогнозування ефективності функціонування мереж у різних сценаріях і розробки методів підвищення надійності та інформаційної безпеки. Таким чином, проблема математичного моделювання пропускну́ї здатності каналів в умовах завад є актуальною як з теоретичної, так і з прикладної точки зору, оскільки результати досліджень можуть бути використані для проектування і оптимізації сучасних телекомунікаційних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Актуальність проблеми завадостійкості інформаційних мереж підтверджується низкою сучасних наукових робіт [1–5]. У дослідженнях [7–8] увагу зосереджено на розробці математичних методів для підвищення надійності функціонування інформаційних систем, зокрема через використання нейронних мереж і методів багатокритеріальної оптимізації. Робота [9] присвячена створенню нових метаевристичних алгоритмів для розв'язання задач оптимізації, що є близьким до тематики даної статті в частині пошуку ефективних рішень у складних системах. Окрему увагу варто приділити дослідженням [1–5;10], у яких розглянуто питання аналізу стану інтелектуальних об'єктів та побудови баз даних для мобільних систем, що безпосередньо пов'язано з проблемами функціонування інформаційних мереж у складних умовах. У попередніх працях авторів [6–8] запропоновано математичні моделі інформаційних конфліктів у

мережах, а також методи пошуку рішень на основі біоінспірованих алгоритмів. Ці результати стали науковим підґрунтям для подальших досліджень, представлених у даній роботі.

Викладення основного матеріалу. Функціонування сучасних інформаційних мереж відбувається в умовах постійного впливу завад, які знижують якість передачі даних та пропускну здатність каналів. Ці завади можуть бути як ненавмисними (природні шуми, техногенні електромагнітні впливи, взаємні перешкоди від інших пристроїв), так і навмисними (радіоелектронні атаки, навмисне створення завад). Усі вони призводять до зменшення співвідношення сигнал/шум (SNR), що прямо впливає на ймовірність бітрової помилки та ефективність функціонування мережі.

Одним із ключових критеріїв оцінки електромагнітної сумісності є відношення сигнал/перешкода (ВСПШ). Цей показник характеризує здатність системи протидіяти завадовим впливам і визначає фактичний рівень корисного сигналу на тлі шуму. Використання цього критерію є виправданим, оскільки в більшості випадків спектр завад перекриває спектр корисного сигналу, а їхні статистичні властивості наближені до білого гаусового шуму.

Для моделювання роботи інформаційного каналу враховуються такі параметри: потужність передавача; коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен; коефіцієнти корисної дії трактів передачі і прийому; довжина хвилі несучої; додаткові втрати сигналу, зумовлені середовищем поширення та дією перешкод. Ці фактори визначають рівень сигналу на вході приймача та дозволяють оцінити стійкість каналу до впливу зовнішніх завад.

Завмирання сигналу є одним із найбільш суттєвих чинників, що визначають якість роботи каналу. Виділяють: швидкі завмирання, що виникають у протяжних каналах зв'язку через інтерференцію великої кількості відбитих хвиль; повільні завмирання, що зумовлені рухомими об'єктами або атмосферними впливами. Статистично повільні завмирання описуються логнормальним розподілом, тоді як швидкі завмирання у більшості випадків підпорядковуються розподілу Релея або Райса.

Одним із базових показників ефективності системи є пропускну здатність. Вона визначає максимальну швидкість передачі даних при заданому відношенні сигнал/шум і описується формулою Шеннона. Аналіз цієї залежності дозволяє зробити висновки щодо того, чи може мережа забезпечувати задану якість обслуговування в умовах дії завад.

У рамках дослідження подальший виклад базується на застосуванні методів математичного моделювання. Такий підхід дозволяє формалізовано описати вплив завад на ключові параметри інформаційних каналів, зокрема відношення сигнал/перешкода, рівень потужності прийнятого сигналу та пропускну здатність.

Отримані залежності дають змогу оцінити працездатність системи в умовах електромагнітного впливу та визначити обмеження її ефективного функціонування.

Визначення впливу завад на передачу сигналів. У якості критерію електромагнітної сумісності (ЕМС) доцільно розглядати відношення ВСПШ, яке є одним з ключових параметрів оцінки якості функціонування каналів зв'язку. Використання цього критерію є обґрунтованим, оскільки завадові сигнали накладаються на корисний сигнал у тому ж частотному діапазоні. Крім того, через свою широкосмугову природу такі перешкоди за статистичними характеристиками наближені до білого шуму, що дозволяє коректно застосовувати даний підхід у процесі моделювання (1):

$$h^2 = \frac{P_c}{\sum_i P_{ni} + P_w}. \quad (1)$$

Для коректного розрахунку відношення ВСПШ в інформаційних мережах необхідно враховувати низку вихідних параметрів системи. До них належать:

P_c, P_{ni}, P_w – просторово-частотні характеристики середовища поширення сигналу.

Для розрахунку ВСПШ необхідно наявність таких вихідних даних:

h, d, l, n – характеристики середовища;

$P_{пер}$ – потужність передавача;

$G_{пер}, G_{пр}$ – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен у напрямку досліджуваної зони покриття;

$\eta_{пер}, \eta_{пр}$ – коефіцієнти корисної дії приймального і передавального фідерів;

λ – довжина хвилі несучої.

Рівень перешкоди на вході приймача $P_{пех}$ можна розрахувати, використовуючи рівняння передачі (всі складові виражені в дБ).

Рівень завадового впливу на вході приймача визначається за допомогою рівняння передачі, у якому всі складові подані в децибелах. Це дозволяє оцінити ефективність функціонування каналу в умовах впливу широкосмугових завад та визначити резерви підвищення його завадостійкості (2).

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{ПЕР}} + G_{\text{ПЕР}} + G_{\text{ПР}} - \eta_{\text{ПЕР}} - \eta_{\text{ПР}} - W_{\text{СВ}} - W(R)_{\text{доо}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{ПЕР}}$ – потужність передавача;

$$W_{\text{СВ}} = 10 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad \text{– ослаблення енергії у вільному просторі};$$

$W(R)_{\text{доо}}$ – додаткові втрати на відстані розносу R між рецептором і джерелом перешкод.

На наступному етапі виконується визначення відстаней від користувача інформаційної мережі до джерела корисного сигналу (3), а також до потенційних джерел перешкод. Отримані значення використовуються для розрахунку рівня потужності прийнятого сигналу та оцінки впливу заводських факторів, що дозволяє більш точно змоделювати умови функціонування каналу.

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (3)$$

При розрахунку енергетичних характеристик сигналів в інформаційних мережах особливу роль відіграє величина додаткових втрат, яку можна представити у вигляді відповідних коефіцієнтів загасання. Цей показник враховує вплив середовища поширення, інтенсивність завод та інші фактори, що визначають якість прийому сигналу на стороні користувача.

При розрахунку енергетики сигналів, в інформаційних мережах, особливу роль відіграє величина додаткових втрат $W(R)_{\text{доо}}$, яку можна записати у вигляді (4):

$$W(R)_{\text{доо}} = W_{\text{доо}}^{(1)} + W_{\text{доо}}^{(2)} + W_{\text{доо}}^{(3)} + W_{\text{доо}}^{(4)} + W_{\text{доо}}^{(5)}. \quad (4)$$

Додаткові втрати сигналу в інформаційних мережах можна подати у вигляді таких складових:

де $W_{\text{доо}}^{(1)}$ – додаткові втрати сигналу, зумовлені впливом навколишнього середовища та наявністю різних об'єктів у зоні поширення, дБ;

$W_{\text{доо}}^{(2)}$ – втрати сигналу, що виникають унаслідок наявності природних або техногенних бар'єрів, дБ;

$W_{\text{доо}}^{(3)}$ – додаткові втрати сигналу з урахуванням міжповерхового перекриття, дБ;

$W_{\text{доо}}^{(4)}$ – втрати, пов'язані з багатопроменевою та ефектами завмирання сигналу, дБ;

$W_{\text{доо}}^{(5)}$ – втрати, зумовлені частотною відбудовою перешкод та смугою пропускання приймального тракту, дБ.

Проаналізуємо докладно складові додаткового загасання.

$W_{\text{доо}}^{(1)}$ – ця складова враховує втрати енергії сигналу, що виникають унаслідок процесів розсіювання та поглинання в об'єктах, які знаходяться в межах зони функціонування радіоканалу. Показник характеризує просторову щільність та розподіл таких об'єктів і може бути виражений як функція масштабу відстаней між ними, піднесених до певного степеню $n = 3..5$, що дозволяє адекватно оцінювати вплив середовища на поширення сигналів (5).

$$W_{\text{доо}}^{(1)} = 10 \lg (R/R_0)^{-n}. \quad (5)$$

Облік додаткових втрат (6), що виникають при проходженні сигналу крізь N послідовних бар'єрів у середовищі поширення, здійснюється за формулою:

$$W_{\text{доо}}^{(2)} = N \cdot W_1, \quad (6)$$

де W_1 – втрати при проходженні сигналу крізь один бар'єр.

Деякі типи бар'єрів у середовищі поширення сигналів характеризуються складнішою структурою та значно більшими коефіцієнтами поглинання (7). Для їхнього урахування застосовуються емпіричні залежності, що дозволяють адекватно оцінити додаткові втрати енергії сигналу.

$$W_{\text{доо}}^{(3)} = W_0 \cdot K^{\left(\frac{K+2}{K+1} - c\right)}, \quad (7)$$

де K – кількість бар'єрів у середовищі поширення сигналу;

W_0 – середнє значення загасання, що вноситься кожним бар'єром, дБ;

c – поправочний коефіцієнт, який враховує специфіку матеріалів та структури перешкод.

Випадкова складова додаткового загасання (8) обумовлюється ефектами завмирання сигналу, що виникають унаслідок багатопроменевого поширення та флуктуацій характеристик середовища:

$$W_{\text{доо}}^{(4)} = W_{\text{ан}}^{(n)}(t) + W_{\text{ан}}^{(w)}(t), \quad (8)$$

де $W_{\text{ан}}^{(n)}(t)$, $W_{\text{ан}}^{(w)}(t)$ – відображають додатково: повільні і швидкі випадкові завмирання.

У розрахункових задачах з енергетики радіоліній швидкими завмираннями, як правило, нехтують, оскільки вони характерні для протяжних каналів зв'язку з довжиною траси понад 30–50 км, переважно у закритих або напівзакритих середовищах. Для локальних телекомунікаційних систем, зокрема бездротових мереж обмеженого радіусу дії, зазвичай приймається припущення про відсутність суттєвого впливу таких завмирань:

$$W_{\text{ан}}^{(w)}(t) \rightarrow 0.$$

Причиною випадкових змін рівня сигналу можуть бути динамічні зміни середовища поширення: переміщення об'єктів, транспортних засобів або будь-яких рухомих елементів інфраструктури, відбиті хвилі від яких надходять у точку прийому з різними фазами та амплітудами. Такі процеси зумовлюють виникнення повільних завмирань, характерний квазіперіод яких може становити від кількох секунд до хвилин. Завмирання з ще більшими часовими інтервалами (до годин) здебільшого пояснюються впливом атмосферних чинників. Статистично повільні завмирання підпорядковуються логнормальному розподілу, при якому логарифм рівня сигналу має нормальний закон розподілу: $u_c(t)$ – розподілений нормально з параметрами $N(0, \sigma)$ (9).

$$W_{sun}^{(n)}\{u(t)\} = \rho W_{cl}^{(m)}\{u(t - \Delta t)\} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot N(0, \sigma), \text{ (дБ)} \quad (9)$$

У процесі аналізу повільних завмирань важливим параметром є ρ – коефіцієнт кореляції між двома перетинами випадкового процесу зміни рівня сигналу. Цей показник дозволяє оцінити ступінь подібності значень сигналу у різні моменти часу та характеризує стабільність каналу в умовах дії завад. Високе значення кореляції свідчить про інерційність процесу, тоді як низьке – про швидку змінність і непередбачуваність середовища поширення $W_{sun}^{(n)}\{u(t)\}$, що розташоване на інтервалі Δt .

Додаткові втрати енергії сигналу $W_{ood}^{(5)}$ що виникають унаслідок частотної розбіжності між спектром завадового впливу та робочою смугою пропускання приймача, визначаються за формулою (10):

$$W_{ood}^{(5)} = 10^{-\frac{F(\Delta f_p)}{10}}, \quad (10)$$

де $F(\Delta f_p)$ – функція ослаблення потужності радіоперешкоди внаслідок частотної розбіжності між спектром завади та робочою смугою пропускання приймача, дБ. Вона відображає ефективність фільтрації небажаних сигналів і визначає ступінь їх впливу на корисний сигнал у каналі.

Δf_p – параметр, який характеризує частотне розстроювання між передавачем, джерелом перешкоди, та приймачем, який є рецептором перешкоди.

У випадку однотипних взаємодіючих систем

$$W_{ood}^{(5)} \rightarrow 0.$$

Після визначення величини загасання виконується розрахунок потужності прийнятого сигналу. Даний параметр обчислюється у децибелах відповідно до рівняння передачі, що враховує енергетичні характеристики передавального тракту, параметри каналу поширення та додаткові втрати сигналу (11).

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} + W_{(заз)} - \eta_{np} - \eta_{nep}. \quad (11)$$

Очевидно, що завадові впливи від сторонніх систем призводять до зниження основних показників ефективності функціонування досліджуваної або проекрованої інформаційної мережі.

Одним із найбільш чутливих параметрів у цьому випадку виступає пропускна здатність каналу зв'язку. У разі дії адитивного білого гаусового шуму (AWGN) пропускна здатність каналу визначається відповідно до відомої формули Шеннона (12):

$$C = \Delta F \cdot \log_2(1 + Bh^2), \quad (12)$$

де B – база сигналу.

На основі розрахованої пропускної здатності каналу та відомих вимог до необхідної швидкості передавання даних можна оцінити реальну працездатність інформаційної мережі в умовах дії електромагнітних завад. Такий підхід дозволяє визначити, чи забезпечується коректне функціонування системи за поточних параметрів середовища, та виявити критичні обмеження її роботи.

Для підтвердження адекватності теоретичної моделі було виконано комп'ютерне моделювання на Python. Розрахунки проводилися за рівнянням передачі з урахуванням втрат у вільному просторі, додаткових втрат сигналу (розсіювання, бар'єри, багатопроменівість, частотні ефекти) та завад. Для оцінки ефективності каналу розраховано відношення сигнал/завада+шум та пропускну здатність за формулою Шеннона.

Лістинг коду на мові Python:

```
import numpy as np
# Параметри
Pt_dBm = 20.0 # потужність передавача, dBm
Gt_dBi = 5.0 # підсилення TX антени, dBi
Gr_dBi = 5.0 # підсилення RX антени, dBi
eta_t, eta_r = 0.9, 0.9
f_GHz = 2.4
B_MHz = 20.0
NF_dB = 5.0
# Додаткові втрати
L_env = 2.0
```

```

L_bar = 0.0
N_bar = 0
L_mult = 3.0
L_freq = 0.0
# Завади
I_dBm_list = [-np.inf, -90, -80]
def fspl_dB(d_km, f_GHz):
    f_MHz = f_GHz*1e3
    return 20*np.log10(d_km) + 20*np.log10(f_MHz) + 32.44
def feeder_loss_dB(eta_t, eta_r):
    return -10*np.log10(eta_t*eta_r)
def noise_power_dBm(B_MHz, NF_dB):
    B_Hz = B_MHz*1e6
    return -174 + 10*np.log10(B_Hz) + NF_dB
def lin(x_dB): return 10**(x_dB/10)
def dB(x): return 10*np.log10(x+1e-30)
def received_power_dBm(d_km):
    return (Pt_dBm + Gt_dBi + Gr_dBi
            - fspl_dB(d_km, f_GHz)
            - feeder_loss_dB(eta_t, eta_r)
            - (L_env + N_bar*L_bar + L_mult + L_freq))
def sinr(Pr_dBm, N_dBm, I_dBm):
    Pr = lin(Pr_dBm); N = lin(N_dBm)
    I = 0.0 if np.isneginf(I_dBm) else lin(I_dBm)
    return Pr / (N+I)
def capacity(B_MHz, SINR):
    B_Hz = B_MHz*1e6
    return B_Hz * np.log2(1+SINR) / 1e6
# Розрахунок для різних відстаней
distances = [0.5, 1.0, 2.0] # км
N_dBm = noise_power_dBm(B_MHz, NF_dB)
print("Distance(km) | Interference(dBm) | Pr(dBm) | SINR(dB) | C(Mbps)")
for d in distances:
    Pr = received_power_dBm(d)
    for I_dBm in I_dBm_list:
        S = sinr(Pr, N_dBm, I_dBm)
        C = capacity(B_MHz, S)
        print(f"{d:8.2f} | {I_dBm:15} | {Pr:7.2f} | {dB(S):7.2f} | {C:7.2f}")

```

Результат виконання за наведеним лістингом продемонстровано на рисунку 1.

Distance(km)	Interference(dBm)	Pr(dBm)	SINR(dB)	C(Mbps)
0.50	-inf	-69.94	26.05	173.15
0.50	-90	-69.94	19.09	127.16
0.50	-80	-69.94	9.95	68.91
1.00	-inf	-75.96	20.03	133.36
1.00	-90	-75.96	13.07	88.19
1.00	-80	-75.96	3.93	35.93
2.00	-inf	-81.98	14.01	94.20
2.00	-90	-81.98	7.04	52.00
2.00	-80	-81.98	-2.09	13.89

Process exited - Return Code: 0

Рис. 1. Пропускна здатність для різних відстаней та рівнів завад

Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило коректність запропонованих математичних залежностей для оцінки пропускної здатності каналів передачі даних в умовах завад. На прикладі енергетичного балансу каналу було продемонстровано, що при відстані 1 км і робочій частоті 2,4 ГГц рівень прийнятої потужності становить близько – 75 дБм, що забезпечує відношення сигнал/шум понад 20 дБ. Це дозволяє досягати пропускної здатності на рівні понад 130 Мбіт/с при смузі пропускання

20 МГц. Разом з тим, наявність додаткових втрат (завмирання, розсіювання, завади від інших систем) призводить до зниження ефективності, що підтверджує важливість врахування цих факторів на етапі проектування інформаційних мереж.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі проведено аналіз чинників, що впливають на пропускну здатність каналів передачі даних в умовах завод. Розглянуто класифікацію перешкод, математичні моделі додаткових втрат сигналу та формулу Шеннона для визначення граничної пропускну здатності. Виконане моделювання показало, що найбільший внесок у погіршення характеристик мережі становлять втрати у вільному просторі та багатопроменевість, тоді як правильний вибір смуги пропускання та параметрів антенно-фідерних трактів може істотно покращити показники.

Отримані результати мають прикладне значення для проектування сучасних телекомунікаційних систем, сенсорних мереж, систем мобільного зв'язку, забез

печення цілісності даних у багатоджерельних сховищах, та інфраструктури Інтернету речей, де особливо важливою є надійність і стабільність каналів зв'язку в умовах зовнішніх та внутрішніх завод.

Список використаної літератури:

1. Decision support systems: mathematical support / ed. S.Kashkevich. – Kharkiv : TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. DOI: 10.15587/978-617-8360-13-9.
2. Інформаційні технології стохастичної моделі надійності комп'ютеризованих систем для захисту інформації / А.Аль-Амморі, Р.М. Іщенко, А.С. Клочан та ін. // Зв'язок. – 2024. – № 4. – С. 10–18. DOI: 10.31673/2412-9070.2024.041018.
3. Hayyolalam V. Black widow optimization algorithm: a novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems / V.Hayyolalam, A.A.P. Kazem // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 87. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.103249.
4. Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects / O.Nechyporuk, O.Sova, A.Shyshatskyi and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 2. – № 4 (122). – P. 31–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.276168.
5. Литвиненко О.Є. Декомпозиційний метод обчислення вагових коефіцієнтів бінарної нейронної мережі / О.Є. Литвиненко, Д.П. Кучеров, М.М. Глибовець // Кібернетика та системний аналіз. – 2022. – Т. 58, № 6. – С. 45–53.
6. The development of solution search method using improved jumping frog algorithm / G.A. Mamoori, O.Sova, O.Zhuk and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 4, № 3 (124). – P. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.285292.
7. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm / K.A. Tamer, O.Sova, O.Shaposhnikova and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1, № 4 (127). – P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298205.
8. Mathematical model of information conflict of information networks / S.Kashkevich, O.Dmytriieva, O.Trotsko and other // ScienceRise. – 2024. – № 1. – P. 3–13. DOI: 10.21303/2313-8416.2024.003395.
9. The creation of the database for mobile robots navigation under the conditions of flexible change of flight assignment / N.Yeromina, V.Kurban, S.Mykus and other // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2021. – Vol. 11, Issue 5. – P. 37–41. DOI: 10.46338/ijetae0521_05.
10. Chen H. Evaluation of personalized service level for library information management based on fuzzy analytic hierarchy process / H.Chen // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 131. – P. 952–958. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.233.

References:

1. Kashkevich, S. (ed.) (2025), *Decision support systems: mathematical support*, TECHNOLOGY CENTER PC, Kharkiv, doi: 10.15587/978-617-8360-13-9.
2. Al-Ammori, A., Ishchenko, R.M., Klochan, A.Ye. et al. (2024), «Informatsiini tekhnolohii stokhastychnoi modeli nadiinosti kompiuteryzovanykh system dlia zakhystu informatsii», *Zviazok*, No. 4, pp. 10–18, doi: 10.31673/2412-9070.2024.041018.
3. Hayyolalam, V. and Kazem, A.A.P. (2020), «Black widow optimization algorithm: a novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 87, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103249.
4. Nechyporuk, O., Sova, 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*, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 31–41, doi: 10.15587/1729-4061.2023.276168.
5. Lytvynenko, O.Ye., Kucherov, D.P. and Hlybovets, M.M. (2022), «Dekompozitsiyni metod obchyslennia vahovykh koefitsiientiv binarnoi neironnoi merezhi», *Kibernetyka ta systemnyi analiz*, Vol. 58, No. 6, pp. 45–53.
6. Mamoori, G.A., Sova, O., Zhuk, O. et al. (2023), «The development of solution search method using improved jumping frog algorithm», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 3 (124), pp. 45–53, doi: 10.15587/1729-4061.2023.285292.
7. Tamer, K.A., Sova, O., Shaposhnikova, O. et al. (2024), «Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 4 (127), pp. 6–13, doi: 10.15587/1729-4061.2024.298205.

8. Kashkevich, S., Dmytriieva, O., Trotsko, O. et al. (2024), «Mathematical model of information conflict of information networks», *ScienceRise*, No. 1, pp. 3–13, doi: 10.21303/2313-8416.2024.003395.
9. 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 5, pp. 37–41, doi: 10.46338/ijetae0521_05.
10. 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.

Персунов Дмитро Олександрович – аспірант кафедри інтелектуальних кібернетичних систем Державного університету «Київський авіаційний інститут».

<https://orcid.org/0009-0000-5877-3493>.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- штучний інтелект у мережевих технологіях.

Апенко Наталія Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем Державного університету «Київський авіаційний інститут».

<https://orcid.org/0000-0001-6891-0869>.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- системи підтримки прийняття рішень;
- штучний інтелект.

Persunov D.O., Apenko N.V.

Mathematical modelling of the throughput capacity of data transmission channels under interference conditions

The article considers the problem of assessing the throughput capacity of data transmission channels under the influence of various types of interference that reduce the quality of information networks and telecommunications systems. It is determined that the reliability and efficiency of networks depend on the signal-to-noise ratio, which is the basic criterion for electromagnetic compatibility. A systematisation of factors that cause additional signal losses is presented: scattering and absorption in environmental objects, the influence of physical barriers, the effects of multipath propagation and fading, as well as the frequency discrepancy between the interference spectrum and the receiver's passband. The statistical characteristics of fading, in particular fast and slow fading, described by the corresponding distributions (Rayleigh, Rice, lognormal) are considered separately.

The proposed approach is based on the use of mathematical modelling methods to analyse the energy parameters of the signal and determine the actual channel capacity in a noisy environment. It is shown that the throughput can be determined according to Shannon's formula, which allows estimating the limiting capabilities of the system depending on the signal-to-noise ratio and bandwidth. The analysis makes it possible to evaluate the performance of an information network in specific electromagnetic environment conditions and identify critical factors that limit its efficiency.

The practical significance of the work lies in the fact that the results of mathematical modelling can be used to design new and improve existing information systems, optimise telecommunications channel parameters, and increase resistance to intentional and unintentional interference. The presented models and dependencies are universal and can be applied both in civil wireless networks (Wi-Fi, 4G/5G) and in specialised systems where reliability and stability of communication are critical.

Keywords: telecommunications networks; data transmission channels; information networks; bandwidth; mathematical modelling; signal-to-noise ratio; electromagnetic compatibility; noise immunity; multipath propagation; signal fading; cybersecurity.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2025.