



DOI 10.28925/2663-4023.2024.24.257265

УДК 004.621.391

**Доровська Ірина Олександрівна**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID ID: 0000-0001-8694-5395

[i.dorovska@e-u.edu.ua](mailto:i.dorovska@e-u.edu.ua)

**Доровський Володимир Олексійович**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID ID: 0009-0008-7816-4546

[volodymyr.Dorovskyi@e-u.edu.ua](mailto:volodymyr.Dorovskyi@e-u.edu.ua)

**Доровський Дмитро Володимирович**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID ID: 0009-0008-7816-4546

[dmytro.dorovskyi@e-u.edu.ua](mailto:dmytro.dorovskyi@e-u.edu.ua)

**Яровий Роман Олександрович**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID ID: 0000-0001-8978-8137

[roman.yaroviy@e-u.edu.ua](mailto:roman.yaroviy@e-u.edu.ua)

## МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ТА НЕ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ В КІБЕРСИСТЕМАХ

**Анотація.** У статті досліджуються методи ідентифікації оптимальних та неоптимальних режимів функціонування ліній зв'язку в кіберсистемах. Основна увага приділена виявленню взаємозв'язків між характеристиками різних режимів використання лінії зв'язку, а також проведенню порівняльного аналізу цих характеристик для оптимальних і неоптимальних режимів. В якості вихідних даних використовуються відомі співвідношення для одноканальних систем масового обслуговування. Основні параметри, що аналізуються, включають середню тривалість обслуговування повідомлення, ймовірність зайнятості лінії, середню тривалість обслуговування повідомлення без очікування, середню тривалість очікування в черзі, коефіцієнт використання лінії зв'язку та обсяг пам'яті буферного пристрою. Представлено математичні формули та теореми, що описують ці взаємозв'язки. Також досліджено вплив коефіцієнта варіації тривалості обслуговування повідомлень на середню тривалість обслуговування в різних режимах. Теореми 3 і 4 показують, що при оптимальному режимі середня тривалість обслуговування скорочується більше ніж при неоптимальному режимі, причому затримка повідомлень у системі обслуговування є найбільшою при експоненціальному розподілі тривалості обслуговування. Результати дослідження можуть бути використані для розробки ефективних методів керування та оптимізації роботи ліній зв'язку в кіберсистемах. Таблиці і графіки, представлені у статті, дозволяють інженерам виконувати лінійну двупараметричну інтерполяцію для визначення оптимальних параметрів роботи ліній зв'язку. Висновки роботи мають важливе практичне значення для покращення продуктивності та надійності кіберсистем.

**Ключові слова:** лінії зв'язку; кіберсистеми; масове обслуговування; пропускна здатність; середня тривалість обслуговування; теорія черг; математичне моделювання.

### ВСТУП

У роботі Б.С. Цибакова [4] наведено асимптотичні формули для ймовірності втрат пакетів. Ці формули показують, що ймовірність втрат зменшується за ступеневим законом у залежності від розміру буфера та за показовим законом у залежності від пропускної спроможності каналу.



В дослідженні В.С. Заборовського [2] розглянуто вплив характеристик трафіку на продуктивність мережі та застосування теорії сплесків для аналізу властивостей трафіку.

Метою даної роботи є встановлення взаємозв'язків основних характеристик режимів використання лінії зв'язку в кіберсистемах, а також порівняльний аналіз цих характеристик для оптимальних і неоптимальних режимів. Для досягнення цієї мети як вихідні дані використовуються відомі співвідношення для характеристик одноканальних систем масового обслуговування [3].

**Постановка задачі.** Основними характеристиками режиму використання лінії зв'язку в кіберсистемах є середня тривалість  $T_0$  обслуговування повідомлення в системі, ймовірність  $P_0$  того, що лінія буде зайнята обслуговуванням повідомлень, середня тривалість  $T_{00}$  обслуговування повідомлення без очікування в черзі, якщо лінія вільна і повідомлення зразу ж поступає на обслуговування, середня тривалість  $T_{01}$  очікування повідомленням обслуговування в черзі, коефіцієнт  $P_0$  використання лінії зв'язку, обсяг  $n$  пам'яті буферного пристрою, коефіцієнт  $V$  варіації тривалості обслуговування.

**Рішення проблеми.** Сформулюємо встановлені закономірності у вигляді стверджень теорем.

**Теорема 1.** Середня тривалість  $T_0$  обслуговування повідомлення одноканальною лінією зв'язку і ймовірність  $P$  того, що лінія буде зайнята обслуговуванням повідомлення, пов'язані прямим і зворотнім перетворенням такого виду

$$0 \leq P_0 \leq 0.5, \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_0 = \frac{\ell_0}{C_0} \frac{1-P_0}{1-2P_0} = T_{00} \frac{1-P_0}{1-2P_0}, \\ P_0 = \frac{T_0 - T_{00}}{2T_0 - T_{00}} = \frac{T_{01}}{T_{00} + 2T_{01}} \end{cases} \quad (2)$$

де  $T_{01}$  — середня тривалість очікування обслуговування повідомленням в черзі.

Доведення. Середня тривалість обслуговування визначається формулою

$$T_0 = \frac{\ell_0}{C_0} \frac{1}{1-\rho_0} = T_{00} \frac{1}{1-\rho_0}, \quad (3)$$

де середня тривалість обслуговування повідомлення без очікування в черзі

$$T_{00} = \frac{\ell_0}{C_0}, \quad (4)$$

$\ell_0$  — середня довжина повідомлення,

$C_0$  — середня пропускна здатність лінії зв'язку,

$\rho_0 = R_0 / C_0$  — середній коефіцієнт використання пропускної здатності лінії зв'язку.

Врахуємо, що, як показано раніше, ймовірність  $P_0$  того, що лінія буде зайнята обслуговуванням попереднього повідомлення, пов'язана з  $\rho_0$  співвідношенням

$$P_0 = \rho_0 / (1 + \rho_0), \quad (5)$$

З (5) знайдемо, що  $\rho_0 = P_0 / (1 - P_0)$ .

Підставляючи значення  $\rho_0$  в формулу (3) отримаємо (1). Розв'язуючи рівняння (1) відносно  $P_0$  отримаємо зворотне перетворення (2), що і треба було довести.

**Наслідок 1.** З граничного співвідношення  $\lim_{P \rightarrow 0} T_0 \rightarrow T_{00}$  можна дати формальне визначення власної середньої тривалості обслуговування  $T_{00} = T_0(P_0 = 0)$ .



Тобто, власна середня тривалість обслуговування  $T_{00}$  є середня тривалість обслуговування у випадку коли лінія вільна і обслуговує тільки одне повідомлення.

Наслідок 2. З граничного співвідношення  $\lim_{\rho_0 \rightarrow 1} T_0 \rightarrow \infty$  можна визначити, що  $\lim_{\rho_0 \rightarrow 1} P_0 = \lim_{\rho_0 \rightarrow 1} \frac{\rho_0}{1 + \rho_0} \rightarrow 0.5$ , тому для значень  $P_0$  справедлива нерівність  $0 \leq P_0 \leq 0.5$ .

Наслідок 3. З нерівності  $P_0 = \frac{T_{01}}{T_{00} + 2T_{01}} < \frac{1}{2}$  слідує, що власна середня тривалість обслуговування  $T_{00} = \frac{\ell_0}{C_0} > 0$ , тобто повинні бути  $\ell_0 > 0$  і  $C_0 > 0$ .

Наслідок 4. З співвідношення (2) можна формально визначити значення середньої затримки в обслуговуванні повідомлення  $T_{01} = T_0 - T_{00}$ .

В табл. 1 наведені результати розрахунків  $\rho_0, P^*, P^*, T_0/T_{00}, T_0^*/T_{00}$  в залежності від  $P_0$ .

Таблиця 1

Результати розрахунків функцій  $T_0/T_{00}(P_0)$  і  $T_0^*/T_{00}(P^*)$

$P_0$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\rho_0$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$T_0/T_{00}$	1.0125	1.0667	1.225	1.8	$\infty$
$P^*$	0.309	0.3674	0.4365	0.4721	0.5
$\rho^*$	0.4472	0.6324	0.7745	0.8944	1.0
$T_0^*/T_{00}$	1.809	2.721	4.436	9.47	$\infty$

На рис. 1 показано графік залежності  $T_0/T_{00}$  від  $P_0$ . Аналізуючи дані табл. 1 і графік рис. 1 можна зробити висновок, що необхідність забезпечення мінімуму середніх витрат приводить до суттєвого збільшення імовірності  $P^*$  того, що лінія буде зайнята, коефіцієнту  $\rho^*$  використання пропускної здатності лінії, середньої тривалості  $T_{01}^*$  очікування повідомленням обслуговування в черзі (зірочкою позначені параметри оптимального режиму).

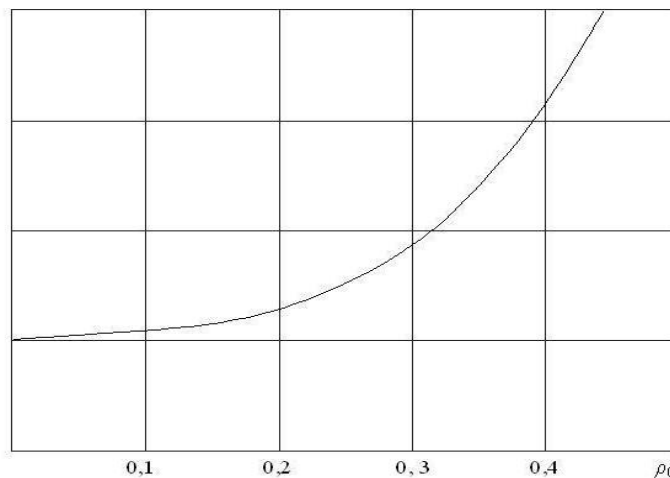


Рис. 1. Графік залежності  $T_0/T_{00}(P_0)$



Перейдемо до розгляду взаємозв'язків між обсягами пам'яті буферних пристроїв для оптимального і неоптимального режимів.

Теорема 2. Обсяги пам'яті буферних пристроїв при роботі лінії зв'язку в оптимальному і неоптимальному режимах пов'язані співвідношенням

$$n^* = \frac{1-\rho_0}{(1-\sqrt{\rho_0})\sqrt{\rho_0}} n_0 = I_n(\rho_0)n_0 \quad (6)$$

де  $n^*$  — обсяг пам'яті буферного пристрою в оптимальному режимі,

$n_0$  — обсяг пам'яті буферного пристрою в неоптимальному режимі,

$\rho_0$  — середній коефіцієнт використання пропускної здатності лінії зв'язку в неоптимальному режимі,

$I_n(\rho_0) = \frac{1-\rho_0}{(1-\sqrt{\rho_0})\sqrt{\rho_0}}$  — коефіцієнт збільшення обсягів пам'яті буферного пристрою в оптимальному режимі.

Доведення. Середнє число  $n_0$  повідомлень, що чекають в черзі обслуговування, пов'язано з  $\rho_0$  співвідношенням  $n_0 = \frac{\rho_0}{1-\rho_0}$ .

Очевидно, що обсяг пам'яті буферного пристрою в середньому повинен бути рівним  $n_0$  для того, щоб не було втрат повідомлень.

Врахуємо те, що в оптимальному режимі середній коефіцієнт використання лінії зв'язку збільшується до значення  $\rho^* = \sqrt{\rho_0}$ . Тому обсяг пам'яті  $n^*$  буферного пристрою лінії, що функціонує в оптимальному режимі, повинен бути збільшеним до значення

$$n^* = \frac{\sqrt{\rho_0}}{1-\sqrt{\rho_0}}$$

Коефіцієнт збільшення обсягу пам'яті буферного пристрою лінії, що функціонує в оптимальному режимі,

$$I_n(\rho_0) = \frac{n^*}{n_0} = \frac{\rho^*}{\rho_0} \frac{1-\rho_0}{1-\rho^*} = \frac{1-\rho_0}{(1-\sqrt{\rho_0})\sqrt{\rho_0}}$$

З цього співвідношення отримуємо (6), що і треба було довести.

Наслідок 1. При  $\rho_0 \rightarrow 0$

$$\lim_{\rho_0 \rightarrow 0} I_n(\rho_0) \rightarrow \infty.$$

Тому при малих  $\rho_0 \ll 1$  має місце особливо велика різниця в обсягах пам'яті буферних пристроїв.

Наслідок 2. При  $\rho_0 \rightarrow 1$

$$\lim_{\rho_0 \rightarrow 1} I_n(\rho_0) \rightarrow 2.$$

Тому при великих  $\rho_0 \sim 1$  обсяг пам'яті  $n^*$  буферного пристрою лінії зв'язку, що функціонує в оптимальному режимі, повинен бути приблизно вдвічі більшим обсягу пам'яті  $n_0$ .

На рис. 2. показано графік залежності  $I_n(\rho_0)$ . Можна зробити з аналізу цього графіку головний висновок про те, що оптимальний режим роботи лінії зв'язку в кіберсистемах потребує більших ніж вдвічі обсягів пам'яті буферних пристроїв порівняно з неоптимальними режимами.

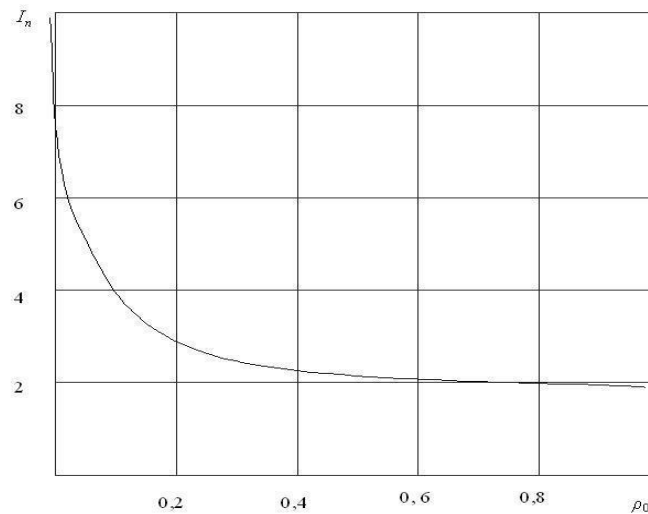


Рис. 2. Графік залежності  $I_n(\rho_0)$

Розглянемо як впливає коефіцієнт варіації  $V$  тривалості обслуговування повідомлень без очікування в черзі на середню тривалість обслуговування в режимах, що порівнюються. Припустимо, що математичне сподівання  $T_{00}$  і дисперсія  $\sigma^2$  тривалості обслуговування відомі.

Теорема 3. Якщо коефіцієнт варіації  $V = \sigma / T_{00}$  розподілу тривалості обслуговування повідомлення, що не чекає обслуговування в черзі, підкоряється умові  $0 \leq V \leq 1$ , тоді в неоптимальному режимі обслуговування повідомлення для середньої тривалості обслуговування повідомлення справедлива складна нерівність

$$\frac{T_{00}}{1-\rho_0} \left( 1 - \frac{\rho_0^2}{2} \right) \leq T_0 \leq \frac{T_{00}}{1-\rho_0}, \quad (7)$$

Доведення. В 1951 р. Кендал у роботі [4] довів, що математичне сподівання часу перебування повідомлень в одноканальній системі

$$T_0 = \frac{1}{\mu_0 C_0} + \frac{\rho_0^2 + \lambda_0^2 \sigma^2}{2\lambda_0(1-\rho_0)}, \quad (8)$$

Введемо, як і раніше, власну характеристику одноканальної лінії зв'язку — середню тривалість обслуговування  $T_{00}$  повідомлення, що не затримується в черзі, а зразу ж поступає на обслуговування

$$T_{00} = \frac{1}{\mu_0 C_0} = \frac{\ell_0}{C_0}.$$

Підставимо значення  $T_{00}$  і  $V$  в формулу (8), після необхідних проміжних перетворень отримаємо

$$T_0 = \frac{T_{00}}{1-\rho_0} \left[ 1 - \frac{\rho_0^2}{2} (1-V^2) \right].$$

Аналіз граничних співвідношень

$$\lim_{V \rightarrow 0} T_0(V) = \frac{T_{00}}{1-\rho_0} \left( 1 - \frac{\rho_0^2}{2} \right), \quad (9)$$



$$\lim_{V \rightarrow 1} T_0(V) = \frac{T_{00}}{1 - \rho_0}, \quad (10)$$

показує, що для  $T_0(V)$  справедлива складна нерівність (7), що і треба було довести.

Наслідок 1. Так як  $\rho_0 > 0$ , з порівняння співвідношень (9) і (10) можна зробити висновок, що при  $V < 1$  середня тривалість обслуговування скорочується на величину

$$\Delta T_0(V) = \frac{T_{00} \cdot \rho_0^2}{1 - \rho_0} (1 - V^2)$$

Наслідок 2. Максимальне значення  $\Delta T_0(V)$  має місце при  $V = 0$ , бо

$$\lim_{V \rightarrow 0} \Delta T_0(V) \rightarrow \frac{T_{00} \cdot \rho_0^2}{1 - \rho_0}$$

Цей випадок характеризує детерміновану тривалість обслуговування.

Наслідок 3. При  $V \rightarrow 1$ , як слідує з граничного співвідношення (10),

$$\lim_{V \rightarrow 1} \Delta T_0(V) \rightarrow 0$$

Цей випадок характеризує добре відомий експоненціальний розподіл тривалості обслуговування, у якому затримка обслуговування максимальна.

З наслідків 1–3 можна зробити головний висновок про те, що при експоненціальному розподілі тривалості обслуговування затримка повідомлення в системі обслуговування найбільша. При  $0 < V < 1$  мають місце менші затримки.

Теорема 4. Якщо коефіцієнт варіації  $V^* = \sigma / T_{00}^*$  розподілу тривалості обслуговування повідомлення, що не чекає обслуговування в черзі, підкоряється умові  $0 \leq V^* \leq 1$ , тоді в оптимальному режимі обслуговування повідомлення для середньої тривалості обслуговування повідомлення справедлива складна нерівність

$$\frac{T_{00}^*}{1 - \sqrt{\rho_0}} \left(1 - \frac{\rho_0}{2}\right) \leq T_0^* \leq \frac{T_{00}^*}{1 - \sqrt{\rho_0}}, \quad (11)$$

Доведення. Доведення ствердження цієї теореми виконується аналогічно

доведенню попередньої теореми з урахуванням того, що  $T_{00}^* = \frac{1}{\mu_0 C_{opt}} = \frac{\ell_0}{C_{opt}}$ ,  $\rho^* = \sqrt{\rho_0}$ ,  $C_{opt} = \rho^* C_0$ .

Наслідок 1. Так як  $\sqrt{\rho_0} > \rho_0$ , з порівняння лівої і правої границь нерівності (11) слідує, що скорочення середнього часу обслуговування повідомлення режимі буде

$$\Delta T_0^*(V) = \frac{T_{00}^* \cdot \rho_0}{1 - \sqrt{\rho_0}} (1 - V^2)$$

відносно більшим

Наслідок 2. Максимальне значення  $\Delta T_0^*(V)$ , як і раніш, має місце при  $V = 0$ , бо

$$\lim_{V \rightarrow 0} \Delta T_0^*(V) \rightarrow \frac{T_{00}^* \cdot \rho_0}{1 - \sqrt{\rho_0}}$$

Наслідок 3. При  $V \rightarrow 1$ , як і раніш,  $\lim_{V \rightarrow 1} \Delta T_0^*(V) = 0$ , тобто затримка повідомлення максимальна.

З Наслідків 1–3 можна зробити головний висновок про те, що варіація розподілу тривалості обслуговування в оптимальному режимі приблизно однаково впливає на середню тривалість обслуговування, що і в неоптимальному режимі. При цьому суттєво змінюються порядки величин затримки.

Для аналізу впливу коефіцієнта варіації  $V$  розподілу на скорочення середньої тривалості обслуговування зручно використовувати нормовану по  $T_{00}^*$  залежність  $T_0^*$  від

$$X_0^*(\rho_0, V) = \frac{T_0^*}{T_{00}^*} = \frac{T_{00}^* + T_{01}^*}{T_{00}^*} = 1 + \frac{T_{01}^*}{T_{00}^*} = \frac{1 - \rho_0(1 - V^2)}{1 - \sqrt{\rho_0}}$$

Ця залежність дозволяє робити аналіз впливу варіації закону розподілу тривалості обслуговування повідомлення в системі на середню тривалість обслуговування в оптимальному режимі. На рис. 3. показано графіки залежності  $X_0^*(\rho_0, V)$  при  $V = 0(1); 1(2)$ . Можна помітити, що при  $\rho_0 > 1/2$  суттєво зростає затримка повідомлення в черзі на обслуговування і вона може в кілька разів перевищувати  $T_{00}^*$ .

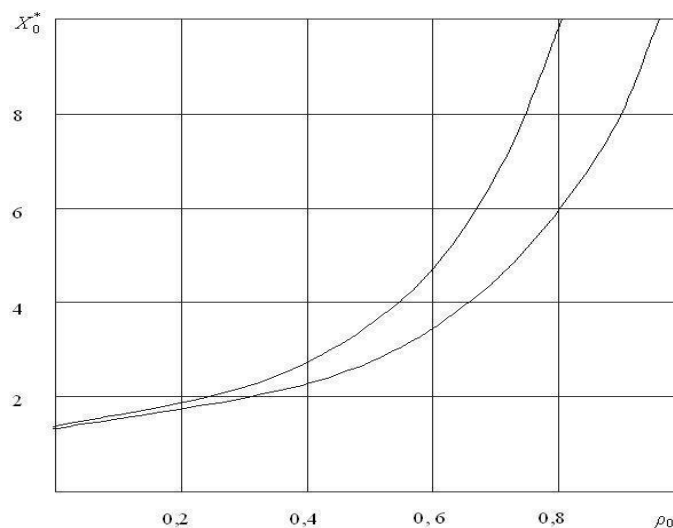


Рис. 3. Графік залежності  $X_0^*(\rho_0, V)$  при  $V = 0(1); 1(2)$

Для більш деталізованих розрахунків в  $X_0^*(\rho_0, V)$  побудовано табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунків функції  $X_0^*$  при  $V = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ .**

$\rho_0$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$X_0^*(0)$	1,0	1,628	2,176	3,10	5,682	$\infty$
$X_0^*(0,2)$	1,0	1,635	2,198	3,159	5,883	$\infty$
$X_0^*(0,4)$	1,0	1,719	2,263	3,314	6,288	$\infty$
$X_0^*(0,6)$	1,0	1,731	2,372	3,585	7,045	$\infty$
$X_0^*(0,8)$	1,0	1,744	2,524	3,957	8,106	$\infty$
$X_0^*(1,0)$	1,0	1,81	2,72	4,436	9,47	$\infty$



За допомогою цієї таблиці зручно виконувати лінійну двупараметричну інтерполяцію  $X_0^*$  при любых значеннях  $\rho_0$  і  $V$ .

## ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таким чином, в даній роботі виконано порівняльний аналіз основних характеристик оптимального і неоптимального режимів, доказано теореми про взаємозв'язки середньої тривалості  $T_0$  обслуговування повідомлень і ймовірності  $P_0$  того, що лінія буде зайнята, про взаємозв'язки обсягів пам'яті  $n^*$  і  $n_0$  буферних пристроїв ліній зв'язку, що функціонують в оптимальному і неоптимальному режимах, про вплив коефіцієнту варіації  $V$  розподілу тривалості обслуговування на середню тривалість обслуговування  $T_0$  повідомлення в оптимальному і неоптимальному режимах, а також середню затримку  $T_{01}$  повідомлення в черзі на обслуговування, запропоновано відносно простий спосіб лінійної двупараметричної інтерполяції нормованої середньої тривалості обслуговування  $X_0^*$  в оптимальному режимі за допомогою даних табл. 2. Показано, що дані табл. 2 дозволяють лінійну двупараметричну інтерполяцію  $X_0^*$  ( $\rho_0, V$ ) з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Заборовський, В. С. (б.д.). *Протяжні стохастичні і динамічні процеси в комп'ютерних мережах: моделі, методи аналізу для систем захисту інформації*.
2. Іванов, І. П. (б.д.). *Методи моделювання та оптимізації в телекомунікаційних системах*.
3. Васильєв, В. В. (б.д.). *Теорія масового обслуговування і її застосування*.
4. Цибаков, Б. С. (б.д.). *Асимптотичні формули для ймовірності втрат пакетів у комп'ютерних мережах*.
5. Скляренко, О. В., Терещук, Г. М., & Колодінська, Я. О. (2024). *Економіко-математичне моделювання: Навчальний посібник*. Вид-во Європейського університету.



**Iryna Dorovska**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID ID: 0000-0001-8694-5395

[i.dorovska@e-u.edu.ua](mailto:i.dorovska@e-u.edu.ua)**Volodymyr Dorovskiy**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID ID: 0009-0008-7816-4546

[volodymyr.Dorovskiy@e-u.edu.ua](mailto:volodymyr.Dorovskiy@e-u.edu.ua)**Dmytro Dorovskoy**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID ID: 0009-0008-7816-4546

[dmytro.dorovskiy@e-u.edu.ua](mailto:dmytro.dorovskiy@e-u.edu.ua)**Roman Yaroviychuk**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID ID: 0000-0001-8978-8137

[roman.yaroviychuk@e-u.edu.ua](mailto:roman.yaroviychuk@e-u.edu.ua)

## METHODS FOR IDENTIFYING OPTIMAL AND NON-OPTIMAL MODES OF COMMUNICATION LINES FUNCTIONING IN CYBER SYSTEMS

**Abstract.** The article investigates methods for identifying optimal and suboptimal operating modes of communication lines in cybersystems. The primary focus is on identifying relationships between the characteristics of different modes of line usage and performing a comparative analysis of these characteristics for optimal and suboptimal modes. Known relationships for single-channel queueing systems are used as the basis for this analysis. Key parameters analyzed include the average service time of messages, the probability of the line being busy, the average service time of messages without waiting, the average waiting time in the queue, the utilization factor of the communication line, and the memory capacity of the buffer device. Mathematical formulas and theorems describing these relationships are presented. The impact of the coefficient of variation of service times on the average service time in different modes is also studied. Theorems 3 and 4 demonstrate that in the optimal mode, the average service time is significantly reduced compared to the suboptimal mode, with the service delay being the highest under an exponential distribution of service times. The findings can be utilized for developing effective management and optimization methods for the operation of communication lines in cybersystems. The tables and graphs presented in the article enable engineers to perform linear two-parameter interpolation to determine the optimal parameters for communication line operation. The conclusions of the study have significant practical implications for improving the performance and reliability of cybersystems.

**Keywords:** communication lines, cybersystems, queueing theory, throughput capacity, average service time, queueing theory, mathematical modeling.

### REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Zaborovsky, V. S. (n.d.). *Extensive stochastic and dynamic processes in computer networks: models, methods of analysis for information security systems.*
2. Ivanov, I. P. (n.d.). *Modeling and optimization methods in telecommunication systems.*
3. Vasiliev, V. V. (n.d.). *Queueing theory and its application.*
4. Tsybakov, B. S. (n.d.). *Asymptotic formulas for the probability of packet loss in computer networks.*
5. Skliarenko, O. V., Tereshchuk, G. M., & Kolodinska, Y. O. (2024). *Economic and mathematical modeling: Study guide.* European University Press.



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.