

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПРИКАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені Василя Стефаника

Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем

М.Л. Петришин, Л.Б. Петришин

**АРХІТЕКТУРА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

**Цикл лабораторних робіт № 1.1 – 1.4**

**ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ  
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ  
ІЗ ВІДМОВАМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ**

Івано-Франківськ

М.Л.Петришин, Л.Б.Петришин Архітектура ОС

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з предмету «Архітектура обчислювальних систем» для студентів факультету математики та інформатики спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» / М.Л. Петришин, Л.Б. Петришин. — Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, 2019. — 46 с.

Затверджено на засіданні кафедри КНІС.  
Протокол № 1 від 30 серпня 2019 р.

#### Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з предмету «Архітектура обчислювальних систем» для студентів спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» факультету математики та інформатики

Автори: к.т.н. Михайло Любомирович Петришин,  
д.т.н., проф. Любомир Богданович Петришин  
Рецензент: д.т.н., проф. Ігор Тимофійович Когут  
зав. каф. комп'ютерної інженерії та електроніки

За редакцією авторів

Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника  
факультет математики та інформатики  
76018, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57  
тел. (0342) 75-23-51, факс (0342) 53-15-74  
e-mail: [inst@pu.if.ua](mailto:inst@pu.if.ua)

**ЗМІСТ**

Вступ .....	4
ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....	6
1.1 Основні положення оптимізації процесів обслуговування в системах з відмовами .....	8
1.2 Методика визначення оптимальних значень критеріїв ефективності .....	10
1.2.1 Визначення оптимальної кількості процесорів ОС .....	11
1.2.2 Вибір оптимального середнього часу обслуговування ...	14
1.2.3 Обчислення оптимальної інтенсивності вхідного потоку .	17
1.3 Методика покращення організації обслуговування .....	19
1.4 Контрольні запитання для самоперевірки .....	21
1.5 Цикл лабораторних робіт № 1.1 – 1.4 .....	23
Додатки .....	33
Література .....	37

## ВСТУП

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з предмету «Архітектура обчислювальних систем», орієнтовані на підготовку студентів спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки та інформаційні технології».

**Метою** викладання навчального предмету «Архітектура обчислювальних систем» є вивчення принципів побудови обчислювальних систем, їх технічних характеристик, а також проектування архітектури багатопроцесорних обчислювальних систем.

**Мета лабораторних робіт** - набуття студентами навичок з моделювання обчислювального навантаження та проектування архітектури багатопроцесорних обчислювальних систем.

Кожна з лабораторних робіт включає етапи:

- побудови функціональної схеми, яка реалізує задані функції;
- написання алгоритму цифрової обробки даних;
- висновки за отриманими результатами виконання завдання та оформлення звіту.

**Основними завданнями** вивчення предмету «Архітектура обчислювальних систем» є вивчення методів моделювання обчислювального навантаження та проектування архітектури багатопроцесорних обчислювальних систем.

Архітектура обчислювальних систем - 5 семестр

Кількість кредитів ECTS - 3

**Загальний обсяг – 90 год.**

**Аудиторних всього – 30 год.**

Лекції – 14 год.

Практичні – 16 год.

**Самостійна робота – 60 год.**

В результаті вивчення предмету студент повинен

**1. Знати:**

- принципи побудови ОС і МПС, їх елементну базу, технічні характеристики, поширені приклади ОС і МПС;
- принципи організації обчислень а ОС і МПС і способи прискорення обчислень;
- принципи управління обчислювальним процесом і його реалізацію;
- принципи побудови технічних засобів ОС і МПС і програм їх управління;
- принципи побудови паралельних і мережєвих систем;
- перспективи розвитку ОС і МПС.

**2. Вміти:**

- визначати технічний рівень ОС і МПС;
- здійснити дослідження роботи ОС і МПС на рівні внутрішніх ресурсів;
- виконати обґрунтування розширення функціональних можливостей ОС та її складових частин.

Підсумковий контроль знань студентів включає: іспит/залік.

## **ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

В навчальній лабораторії при виконанні лабораторних робіт викорис-товується робоча напруга, небезпечна для життя.

Перед початком роботи в навчальній лабораторії на початку навчального року відповідальний за техніку безпеки (ТБ) проводить інструктаж, після чого заповнює журнал, у якому розписуються студенти та той, хто проводив інструктаж.

У разі порушення правил ТБ при роботі в навчальній лабораторії викладачу необхідно звернути на це увагу групи з метою запобігання повторення порушення правил ТБ.

Налагодження і підготовку комп'ютерів до роботи, під'єднання пристроїв та встановлення відповідного програмного забезпечення, усунення будь-яких неполадок у роботі комп'ютера та пристроїв здійснюють виключно фахівці.

Під час роботи з комп'ютером у навчальній лабораторії **заборонено:**

- самостійно намагатися усунути будь-які неполадки в роботі комп'ютера, незалежно від того, коли і з чиеї вини вони трапились;
  - від'єднувати і під'єднувати будь-які пристрої комп'ютера;
  - доторкатися до будь-яких деталей на задній панелі системного блоку;
  - знімати кришку корпусу системного блоку;
  - вставляти чи виймати диски (магнітні й оптичні) під час роботи дисководів, коли світиться індикатор на дисководі;
  - силоміць вставляти чи виймати носії пам'яті;
  - застосовувати непередбачуваний вплив до будь-яких пристроїв — стукати по пристроях, трясти їх, перевертати, розбирати тощо.
- Крім того, під час роботи за комп'ютером необхідно **дотримуватися** таких правил:

1. Дисплей повинен бути розвернений від вікон під кутом, не меншим 90°, з метою запобігання потрапляння на екран прямих сонячних променів та уникнення відблиску, що значно ускладнює читання інформації з екрана дисплея.
2. Екран дисплея повинен бути очищений від пилу, який спричиняє появу шкідливих впливів при роботі за дисплеєм.
3. На робочому місці, де встановлено комп'ютер, не повинні знаходитися сторонніх речей, напоїв, їжі чи її залишків тощо.
4. Перед початком роботи за комп'ютером слід вимити і насухо витерти руки для запобігання появи плям на клавіатурі, корпусі комп'ютера, дисплея, мишки та ін.
5. Через кожні 25 хв. роботи за екраном дисплея слід зробити перерву на кілька хвилин, під час якої записати отримані результати, підготувати дані для продовження роботи чи її план, або просто відпочити.
6. Якщо використовується мишка, необхідно користуватись килимком для запобігання забруднення, що може призвести до виходу з ладу.
7. Якщо клавіатура не використовується, рекомендовано накрити спеціальною кришкою для запобігання попадання пилу чи якихось предметів під клавіші, що може призвести до ушкодження клавіатури.
8. При виникненні будь-яких запитань під час роботи з комп'ютером слід звертатися до викладача.

При виконанні завдань на комп'ютерній техніці **рекомендовано:**

- користуватися клавіатурою, під'єднаною до комп'ютера;
- користуватися маніпулятором типу миші;
- вмикати комп'ютер за допомогою вмикача на передній панелі системного блоку;
- вимикати комп'ютер тільки належним чином;
- після появи на екрані дисплея повідомлення «Тепер комп'ютер можна вимкнути» вимикати комп'ютер за допомогою вмикача на передній панелі системного блоку.

### **1.1. Основні положення оптимізації процесів обслуговування в системах з відмовами**

*Оптимізація складу ОС* здійснюється з метою розробки такої архітектури системи, яка дозволяє максимізувати або мінімізувати один із основних параметрів системи та оцінити ефективність її функціонування в цілому. Вибір критерію оптимізації залежить від типу вирішуваних задач. Наприклад, якщо користувач зацікавлений в підвищенні кількості обслугованих задач, то здійснюється максимізація значення такого критерію. Якщо необхідно зменшити час обслуговування задач вхідного потоку, то здійснюється мінімізація вказаного критерію. Тип екстремального критерію максимізації чи мінімізації змінюється шляхом заміни знаку критерію на протилежний.

Процедура оптимізації полягає у визначенні аналітичних виразів ефективності функціонування ОС в цілому в залежності від параметрів, які задані постановкою завдання та обмеженнями при їх виборі. Необхідно визначити такі значення параметрів, за яких критерій ефективності набуває екстремального (максимального чи мінімального) значення.

Обслуговування потоків задач в багатопроцесорних системах та комплексах систем передбачає здійснення розподілу задач по окремих системах та застосування методу подвійної оптимізації, що дозволяє здійснити на першому етапі оптимізацію функціонування кожної із багатопроцесорних систем



при заданих вихідних умовах, а на другому - оптимізувати функціонування комплексу систем. З метою ознайомлення із методами оптимізації систем спочатку проаналізуємо методи оптимізації процедур обслуговування в багатопроцесорних системах з відмовами.

*Ефективність функціонування ОС* в оптимальному режимі визначається співвідношенням основних показників, що характеризують систему обслуговування. Значення *показників ефективності* ОС визначаються вихідними даними, заданими:  $n$  - кількістю процесорів системи,  $\bar{t}_{обс}$  - середнім часом обслуговування одним процесором однієї задачі,  $\lambda$  - інтенсивність вхідного потоку, чи то середньою кількістю задач, що поступають в систему обслуговування за одиницю часу. Показником оптимального обслуговування є *ймовірність обслуговування*, яка є функцією вище наведених вихідних даних:

$$P_{обс} = f(n, \bar{t}_{обс}, \lambda).$$

Кожен із вихідних параметрів системи можна визначити через інші таким чином:

$$n = f(P_{обс}, \bar{t}_{обс}, \lambda);$$

$$\bar{t}_{обс} = f(P_{обс}, n, \lambda);$$

$$\lambda = f(P_{обс}, n, \bar{t}_{обс}).$$

Наведені параметри, які характеризують ефективність функціонування ОС, є взаємозалежними, що спричиняє вплив кожного на інші. Результатом вирішення завдання розробки ОС

із заданими вихідними умовами буде встановлення оптимального співвідношення між параметрами з метою досягнення максимальної ефективності обслуговування задач вхідного потоку. Аналіз критеріїв оптимального режиму здійсимо для ймовірності обслуговування  $P_{обс}$ , значення якої визначимо на основі *методу співставлення системи вихідних показників*.

### **1.2 Методика визначення оптимальних значень показників ефективності**

Аналіз функціонування ОС з відмовами в оптимальному режимі здійснюється шляхом співставлення значень пари навзаєм обернено залежних показників ефективності - ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  та коефіцієнта зайнятості процесорів системи  $K_3$ . Значення інтенсивності вхідного потоку  $\lambda$ , середнього часу обслуговування  $\bar{t}_{обс}$  та кількості процесорів обслуговування  $n$  за визначених умов приймаються постійними.

ОС функціонує в близькому до оптимального режимі, якщо ймовірність обслуговування  $P_{обс}$  і коефіцієнт зайнятості процесорів  $K_3$  набувають достатньо великих значень, що забезпечує мінімальне простоювання процесорів та високу ефективність використання обчислювальної потужності системи.

### 1.2.1 Визначення оптимальної кількості процесорів обчислювальної системи

Завдання оптимізації кількості процесорів  $n$  у системі обслуговування полягає у здійсненні ряду ітераційних обчислень з метою порівняння значень ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  і коефіцієнта зайнятості процесорів  $K_3$ , а також визначення кількості процесорів  $n$  в околі співрозмірності  $P_{обс}$  і  $K_3$ .

В теорії масового обслуговування [х] визначено, що кількість процесорів  $n$  в системі є оптимальною ( $n=n_{опт}$ ), якщо ймовірність обслуговування  $P_{обс}$  і коефіцієнт зайнятості процесорів  $K_3$  набувають однакових або ж співрозмірних значень ( $P_{обс}=K_3$ ) при постійних значеннях двох інших вихідних параметрів середнього часу обслуговування  $\bar{t}_{обс}=const$  і інтенсивності вхідного потоку  $\lambda=const$ . За результатами обчислень будують графічні залежності  $P_{обс}=f(n)$  та  $K_3=f(n)$  для заданих умовою значень  $\bar{t}_{обс}=const$  і  $\lambda=const$ . Значення  $n$ , для якого залежності  $P_{обс}=f(n)$  та  $K_3=f(n)$  перетнулися, є оптимальним для заданих вихідних умов (рис. 1.1).

Для різних значень  $\lambda=const$  множина оптимальних значень  $n$  утворює криволінійну залежність (рис. 1.2).

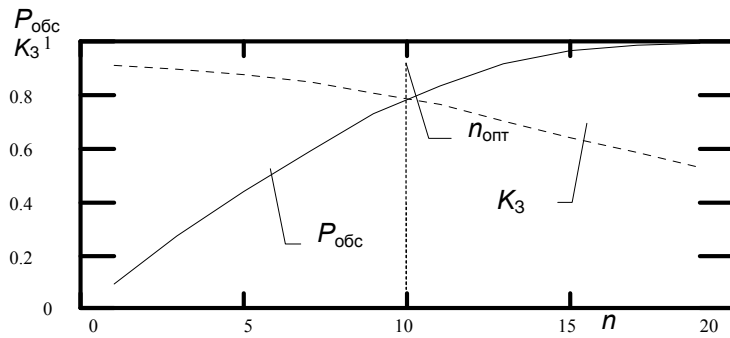


Рисунок 1.1 - Графічні залежності визначення оптимальної кількості процесорів ОС.

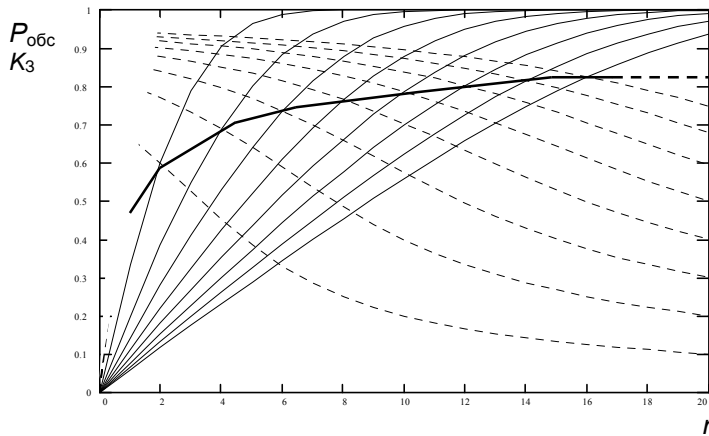


Рисунок 1.2 - Графічні залежності визначення оптимальної кількості процесорів.

Множини залежностей  $P_{обс}=f(n)$  (рис. 1.3) та  $K_з=f(n)$  (рис. 1.4), на підставі яких визначають оптимальні значення  $n$  для  $\bar{t}_{обс}=const$  і різних  $\lambda=const$ , утворюють криві площини

оптимальності, що дозволяють вибрати оптимальні співвідношення для довільних заданих вхідних умов.

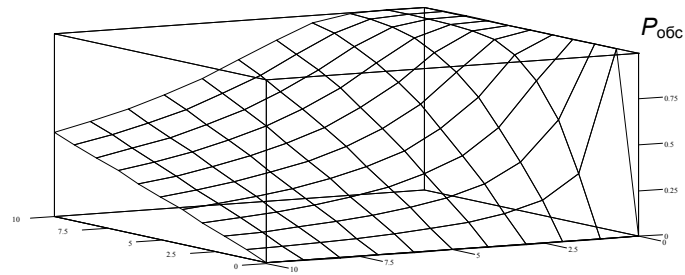


Рисунок 1.3 - Двовимірні графічні залежності  $P_{\text{обс}} = f(n, \lambda)$ .

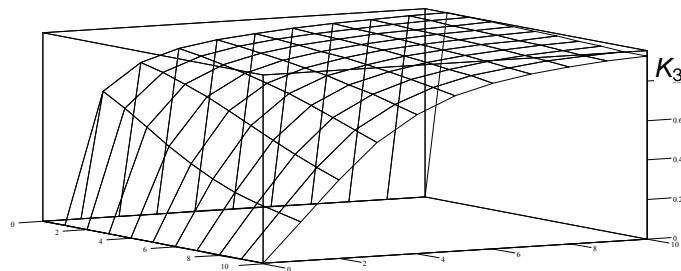


Рисунок 1.4 - Двовимірні графічні залежності  $K_3 = f(n, \lambda)$ .

За результатами аналізу графіків можна підсумувати, що в разі збільшенні кількості процесорів  $n$  і зменшенні інтенсивності вхідного потоку  $\lambda$  при постійному середньому часові обслуговування  $\bar{t}_{\text{обс}}$  значення ймовірності обслуговування  $P_{\text{обс}}$

зростають, а значення коефіцієнта зайнятості процесорів  $K_3$  спадають. Співвідношення оптимальних значень  $P_{\text{обс}}$  і  $K_3$  зростає при збільшенні кількості процесорів  $n$  та інтенсивності вхідного потоку  $\lambda$ , при чому в більшій мірі для менших значень  $n$  і  $\lambda$ . За умови малих значень інтенсивності вхідного потоку та малої кількості процесорів більшої обчислювальної потужності обчислювальні ресурси системи недовикористовуються в порівнянні із системою в складі більшої кількості процесорів меншої обчислювальної потужності, сумарна обчислювальна потужність якої є рівна сумарній обчислювальній потужності системи в складі малої кількості процесорів більшої обчислювальної потужності.

Збільшення кількості процесорів  $n$  і інтенсивності вхідного потоку  $\lambda$  при тих же значеннях середнього часу обслуговування  $\bar{t}_{\text{обс}}$  спричиняє зростання оптимальних значень ймовірності обслуговування  $P_{\text{обс}}$  та коефіцієнта зайнятості процесорів  $K_3$  і, як наслідок, збільшення ефективності використання обчислювальних ресурсів системи.

### **1.2.2 Вибір оптимального середнього часу обслуговування**

Згідно умови оптимальності - рівності ймовірності обслуговування  $P_{\text{обс}}$  і коефіцієнта зайнятості процесорів  $K_3$  ( $P_{\text{обс}}=K_3$ ), критерій оптимального часу обслуговування  $\bar{t}_{\text{обс}}^{\text{опт}}$

визначається для фіксованих значень  $n=const$  і  $\lambda=const$ , заданих умовою завдання. Для цього будують графічні залежності  $P_{обс}=f(\bar{t}_{обс})$  та  $K_3=f(\bar{t}_{обс})$  для заданих значень  $n=const$  і  $\lambda=const$  (рис. 1.5).

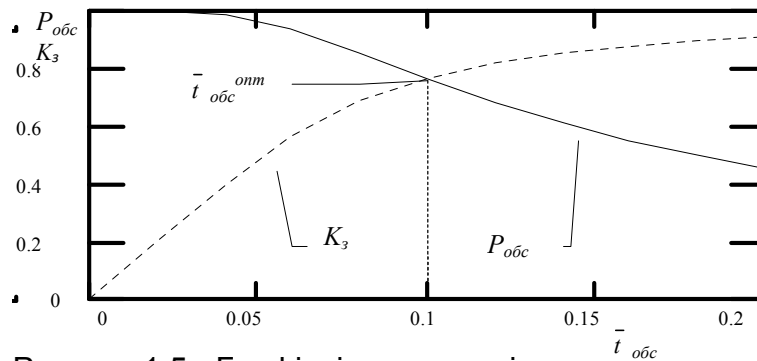


Рисунок 1.5 - Графічні залежності визначення оптимального часу обслуговування.

Для різних фіксованих значень  $\lambda=const$  отримуємо лінійну залежність множини оптимальних значень  $\bar{t}_{обс}^{опт}$  для заданих вихідних умов завдання (рис. 1.6).

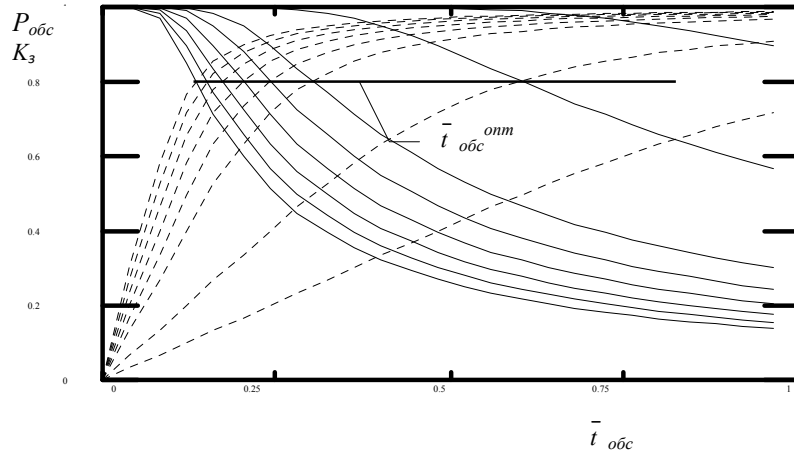


Рисунок 1.6 - Графічні залежності оптимального часу обслуговування.

Множина ліній залежності  $P_{обс}=f(\bar{t}_{обс})$  (рис. 1.7) та  $K_3=f(\bar{t}_{обс})$  (рис. 1.8) утворюють криволінійну площину розв'язків для заданих вихідною умовою  $\lambda=const$  і  $n=const$ .

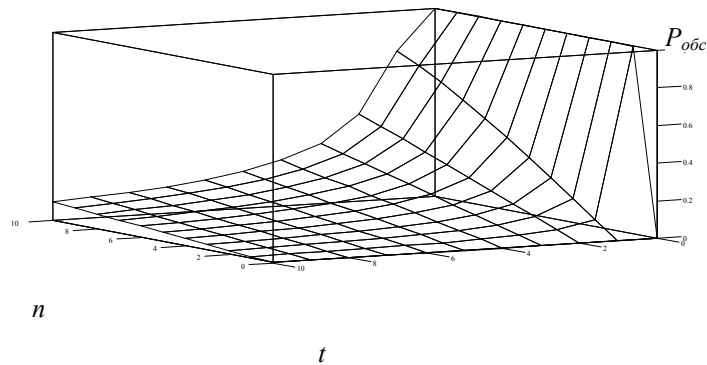


Рисунок 1.7 - Двовимірна залежність  $P_{обс}=f(\bar{t}_{обс})$ .



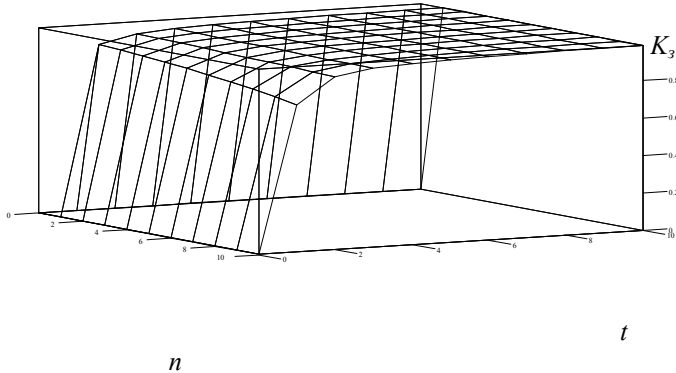


Рисунок 1.8 - Двовимірна залежність  $K_3 = f(\bar{t}_{обс})$ .

Аналіз графічних залежностей показує, що зі збільшенням середнього часу обслуговування  $\bar{t}_{обс}$  при тих же значеннях кількості процесорів  $n$  та інтенсивності вхідного потоку задач  $\lambda$ , значення ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  зменшується, а коефіцієнт зайнятості системи  $K_3$  зростає.

### 1.2.3 Визначення оптимальної інтенсивності вхідного потоку задач

Передумовою здійснення обчислень по визначенню оптимальних значень інтенсивності вхідного потоку є його стаціонарність, тобто стабільний режим поступлення задач. Аналогічно до попередніх викладок визначено, що ймовірність обслуговування  $P_{обс}$  та коефіцієнт зайнятості процесорів  $K_3$  набувають однакових оптимальних значень, а кількість

процесорів  $n$  і середній час обслуговування  $\bar{t}_{обс}$  встановлені в межах певних значень відповідно до умов завдання:

$$\lambda = \lambda_{опт}, \text{ якщо } P_{обс} = K_3, n = const, \bar{t}_{обс} = const.$$

Для заданих значень  $n = const$  і  $\bar{t}_{обс} = const$  побудовано графічні залежності  $P_{обс} = f(\lambda)$  та  $K_3 = f(\lambda)$  (рис. 1.9).

Множина оптимальних значень  $\lambda_{опт}$  інтенсивності потоку задач для однакових значень  $P_{обс}$  та  $K_3$  утворює лінію (рис. 1.10) для заданих вихідних умов завдання.

Із графічної залежності можна підсумувати, що із збільшенням інтенсивності вхідного потоку задач значення ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  зменшуються, а коефіцієнт зайнятості  $K_3$  системи зростає, що може спричинити до перевантаження ОС та втрати значної кількості задач.

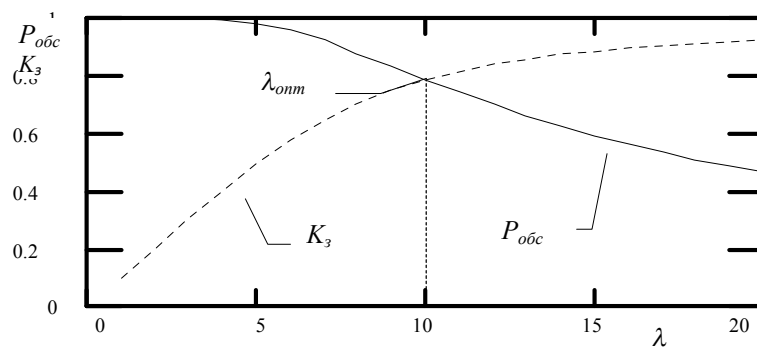


Рисунок 1.9 - Графічні залежності оптимальної інтенсивності вхідного потоку задач.

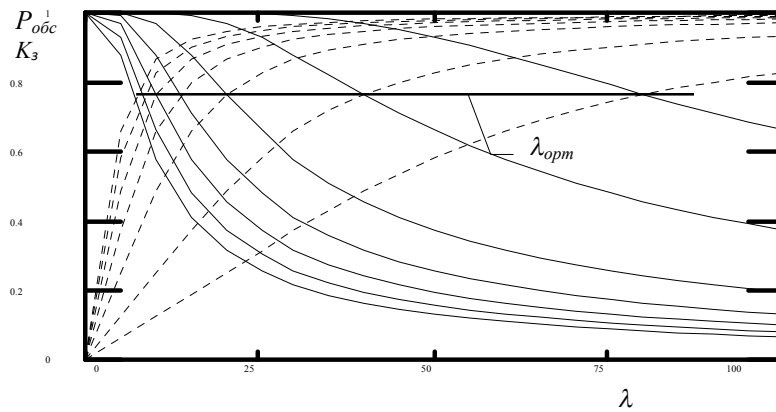


Рисунок 1.10 - Графічні залежності множини значень оптимальної інтенсивності вхідного потоку задач.

### 1.3 Методика покращення організації обслуговування

З метою покращення функціонування ОС з відмовами, спричинених змінами умов постановки вирішення конкретного завдання обслуговування вхідного потоку задач, доцільним є модифікація архітектури та параметрів системи згідно отриманих результатів обчислень та моделювання ОС. Вирішення задачі покращення параметрів ОС можливо внаслідок:

- включення в систему додаткових процесорів обслуговування;
- підвищення інтенсивності обслуговування процесорами задач вхідного потоку;

- скорочення середнього часу обслуговування однієї задачі процесором однієї задачі при тих же значеннях показників ефективності;

- передачі частини задач на обслуговування в суміжну систему комплексу обслуговування.

Ймовірність обслуговування задач вхідного потоку є основним критерієм ефективності функціонування ОС. Значення показника ефективності системи можна підвищити:

- при тих же середніх значеннях інтенсивності вхідного потоку та інтенсивності обслуговування одним процесором однієї задачі шляхом збільшення кількості процесорів ОС;

- при тих же значеннях кількості процесорів і інтенсивності вхідного потоку задач внаслідок скорочення середнього часу обслуговування за умови, що не знижується якість обслуговування;

- при тих же значеннях кількості процесорів і інтенсивності обслуговування одним процесором однієї задачі шляхом зменшення інтенсивності вхідного потоку задач.

#### **1.4 Контрольні запитання для самоперевірки**

Визначити основні положення оптимізації процесів обслуговування в системах з відмовами.

З якою метою проводиться оптимізація ОС?

У чому полягає здійснення оптимізації ОС?

Що передбачає обслуговування потоків задач в ОС?

Чим визначається ефективність функціонування ОС в оптимальному режимі?

Задання вихідних параметрів обслуговування задач в ОС та визначення критеріїв ефективності на їхній основі.

Критерій оптимального обслуговування ОС.

Визначення кожного з вихідних параметрів системи через інші.

Застосування методу співставлення вихідних показників системи.

Охарактеризувати методику визначення оптимальних значень критеріїв ефективності.

Яким шляхом здійснюється аналіз функціонування ОС з відмовами в оптимальному режимі?

Умова оптимального функціонування ОС.

Визначення оптимальної кількості процесорів ОС.

Охарактеризувати графічні залежності визначення оптимальної кількості процесорів системи.

Залежності ймовірності обслуговування і коефіцієнту зайнятості процесорів від кількості процесорів, інтенсивності вхідного потоку

задач і середнього часу обслуговування одним процесором однієї задачі.

За якої умови обчислювальні ресурси системи недовикористовуються?

Основи методики вибору оптимального середнього часу обслуговування.

Охарактеризувати графічні залежності оптимального часу обслуговування.

Визначення оптимальної інтенсивності вхідного потоку задач.

Передумова здійснення обчислень по визначенню оптимальних значень інтенсивності вхідного потоку.

Охарактеризувати графічні залежності оптимальної інтенсивності вхідного потоку.

Основні положення методики покращення функціонування ОС з відмовами.

Шляхи вирішення задачі модифікації параметрів ОС.

Визначити основний критерій ефективності функціонування ОС.

Шляхи підвищення показника ефективності системи.

## 1.5 Цикл лабораторних робіт № 1.1 – 1.4

### Лабораторна робота № 1.1

Тема: “Розробка багатопроцесорної обчислювальної системи з відмовами”

На базі методики оптимізації процесів обслуговування в ОС з відмовами, наведеної в четвертому розділі, оптимізувати вихідні параметри системи згідно варіанту завдання (Додаток 1) та запропонувати архітектуру оптимізованої ОС.

**Увага!** При оформленні звітів за результатами проведених досліджень весь розрахунковий, табличний та графічний матеріал повинен бути обов’язково супроводжений коментарями (поясненнями). Усі скорочення вихідних даних та отриманих результатів в програмі обчислень повинні бути розкриті.

Оптимізація вихідних параметрів і розробка архітектури системи здійснюється по пунктах згідно наступної послідовності.

**Задано:** багатопроцесорну ОС із відмовами, що складається із  $n$  процесорів, кожен із яких в стані одночасно обслуговувати тільки одну задачу вхідного потоку.  $\bar{t}_{обс}$  - середній час обслуговування одним процесором однієї задачі.  $\lambda$  - середня інтенсивність поступлення задач вхідного потоку в систему.

**Необхідно:** оцінити ефективність функціонування ОС і внести за необхідності зміни в її архітектуру.

*Хід рішення:* За формулами для обчислення критеріїв ефективності систем із відмовами визначити основні показники:

- усереднену кількість процесорів із співвідношення середньої кількості задач, що поступають в систему протягом середнього часу обслуговування

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot \bar{t}_{обс.} ;$$

- ймовірність того, що всі процесори ОС не зайняті обслуговуванням

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k} = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!}} = P_k \frac{k!}{\alpha^k} ;$$

- ймовірність відмови черговій задачі в обслуговуванні

$$P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \frac{1}{n!}}{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k} = \frac{P_0}{n!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = \frac{\alpha^n}{n!} \cdot P_0 .$$

Із основних показників ефективності функціонування ОС визначити похідні показники:

- ймовірність того, що задача буде системою обслужена

$$P_{обс} = 1 - P_n ;$$

- середню кількість зайнятих обслуговуванням процесорів

$$\bar{N}_k = \frac{A}{\mu} = \frac{\lambda \cdot (1 - P_n)}{\mu} = \lambda \cdot \bar{t}_{обс} \cdot (1 - P_n) = \alpha \cdot (1 - P_n) ;$$

- коефіцієнт зайнятості процесорів



$$K_3 = \bar{N}_k / n;$$

- середню кількість не зайнятих обслуговуванням процесорів

$$\bar{N}_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) \cdot \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \frac{1}{n!}}{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k} = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) \cdot P_k = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\alpha^k (n-k)}{k!} \cdot P_0;$$

- коефіцієнт простоювання процесорів системи

$$K_{\Pi} = \bar{N}_0 / n.$$

За результатами обчислень заповнити перший рядок таблиці згідно форми (Таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 - Результати обчислень показників ефективності обслуговування ОС.

$n = \dots; \bar{t}_{обс} = \dots; \text{(згідно індивідуального завдання)}$										
ітерація	основні				похідні					розрядність
	$\lambda$	$\alpha$	$P_0$	$P_n$	$P_{обс}$	$\bar{N}_k$	$K_3$	$\bar{N}_0$	$K_{\Pi}$	$n$
1										
2										
3										

Якщо значення параметрів ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  і коефіцієнта зайнятості  $K_3$  системи не співпали, то ОС функціонує в не оптимальному режимі. Якщо  $P_{обс} < K_3$ , то

ефективність функціонування системи, заданої такими вихідними умовами, не є достатньою, а її завантаженість досить значна.

Простоювання процесорів майже відсутнє, оскільки  $K_{\Gamma}$  набуває малого значення. Якщо ж  $P_{обс} > K_3$ , то ефективність обслуговування задач вхідного потоку досить висока, але ОС функціонує з недовантаженням. Процесори системи часто простоюють, оскільки значення  $K_{\Gamma}$  відносно високе. В обох випадках склад процесорів в архітектурі ОС не є оптимальним, тому виникає необхідність внесення змін для покращення показників ефективності використання обчислювальної потужності системи.

Визначити значення  $n_{опт}$  - оптимальної кількості процесорів системи, для якого показники ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  і коефіцієнта зайнятості  $K_3$  системи набудуть однакових значень.

Відобразити графічні залежності  $P_{обс}=f(n)$  та  $K_3=f(n)$  характеру  $P_{обс}$  і  $K_3$ . Проаналізувати значення показників ефективності в околі точки  $n_{опт}$  - оптимальної кількості процесорів для двох суміжних значень  $n$  (меншого та більшого від  $n_{опт}$ ) для заданих умовою значень  $\bar{t}_{обс}=const$  і  $\lambda=const$ . Значення  $n$ , для якого залежності  $P_{обс}=f(n)$  та  $K_3=f(n)$  перетнулись, є оптимальним за даних вихідних умов (рис. 1.1).

**Висновок:** проаналізувати отримані результати та необхідні заходи по забезпеченню оптимального функціонування ОС із заданими вихідними параметрами.

### Лабораторна робота № 1.2

*Задано:* (згідно попередньої умови) багатопроцесорну систему із відмовами,  $\bar{t}_{обс}$  - середній час обслуговування одним процесором однієї задачі,  $\lambda$  - середня інтенсивність вхідного потоку задач.

*Необхідно:* визначити кількість процесорів ОС, для якої ймовірність обслуговування була б не меншою від  $P^n_{обсзд} \dots$  (згідно індивідуального завдання) і внести зміни в її архітектуру.

Вказати необхідну кількість процесорів (каналів обслуговування) ОС, що необхідно ввести в дію із резерву, або вивести в резерв.

*Хід рішення:* За формулами для обчислення критерію ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  згідно заданих умовою значень  $\lambda$  і  $\bar{t}_{обс}$  в функціональній залежності від кількості процесорів системи  $n$  по обчислених точках  $P_{обс}=f(n)$  заповнити таблицю згідно форми (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 - Результати обчислення залежності  $P_{обс} = f(n)$ .

$P^n_{обсзд} = \dots; \lambda = \dots; \bar{t}_{обс} = \dots;$ (згідно індивідуального завдання)					
$n$	...	...	...	...	...
$P_{обс}$	...	...	...	...	...

Побудувати графічну залежність  $P_{обс}=f(n)$ . Визначити кількість процесорів системи  $n$ , що за даних умов задовольняє рівності  $P_{обс}=P_{обс зад}^n$ . На графіку позначити значення  $P_{обс зад}^n$  ... та кількість процесорів ОС  $n$ , що задовольняють вказану якість обслуговування. Визначити характер зміни залежності  $P_{обс}=f(n)$ .

*Висновок:* охарактеризувати отримані результати та необхідні заходи по забезпеченню функціонування ОС із заданим значенням ймовірності обслуговування  $P_{обс зад}^n$ .

### Лабораторна робота № 1.3

*Задано:* (згідно попередньої умови) багатопроцесорну ОС із відмовами, яка складається із  $n$  процесорів,  $\lambda$  - середня інтенсивність вхідного потоку задач.

*Необхідно:* визначити, яким середнім часом обслуговування однієї задачі вхідного потоку повинен володіти один процесор, щоб ймовірність обслуговування становила  $P_{обс\ зд}^t \dots$  (згідно індивідуального завдання).

*Хід рішення:* За формулами для обчислення ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  згідно заданих умовою значень  $n$  і  $\lambda$  в функціональній залежності від середнього часу обслуговування задач вхідного потоку  $\bar{t}_{обс}$  за обчисленими значеннями  $P_{обс} = f(\bar{t}_{обс})$  заповнити таблицю згідно форми (Таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 - Результати обчислення залежності

$$P_{обс} = f(\bar{t}_{обс}).$$

$P_{обс\ зд}^t = \dots; n = \dots; \lambda = \dots;$ (згідно індивідуального завдання)					
$\bar{t}_{обс}$	...	...	...	...	...
$P_{обс}$	...	...	...	...	...

Побудувати графічну залежність  $P_{обс} = f(\bar{t}_{обс})$ . Визначити середній час обслуговування задач вхідного потоку  $\bar{t}_{обс}$ , що за заданих умов задовольняє рівності  $P_{обс} = P_{обс\ зд}^t$ . На графіку позначити значення ймовірності  $P_{обс\ зд}^t \dots$  та середній час

обслуговування задач вхідного потоку  $\bar{t}_{обс}$ , що задовольняють вказану якість обслуговування. Визначити характер зміни залежності  $P_{обс}=f(\bar{t}_{обс})$ .

*Висновок:* охарактеризувати отримані результати та необхідні заходи по забезпеченню функціонування ОС із заданим значенням ймовірності обслуговування  $P_{обс}^t$  з д .

### Лабораторна робота № 1.4

*Задано:* (згідно попередньої умови) багатопроцесорну ОС із відмовами, що складається із  $n$  процесорів.  $\bar{t}_{обс}$  - середній час обслуговування одним процесором однієї задачі.

*Необхідно:* визначити кількість задач вхідного потоку, які в стані обслужити багатопроцесорна система, щоб ймовірність обслуговування була не меншою від  $P_{обс\ зд}^\lambda \dots$  (згідно індивідуального завдання).

*Хід рішення:* За формулами для обчислення критерію ймовірності обслуговування  $P_{обс}$  згідно заданих умовою значень  $n$  і  $\bar{t}_{обс}$  в функціональній залежності від середньої інтенсивності вхідного потоку  $\lambda$  по обчислених точках залежності  $P_{обс}=f(\lambda)$  заповнити таблицю згідно форми (Таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 - Результати обчислення залежності

$$P_{обс}=f(\lambda).$$

$P_{обс\ зд}^\lambda = \dots; n = \dots; \bar{t}_{обс} = \dots;$ (згідно індивідуального завдання)					
$\lambda$	...	...	...	...	...
$P_{обс}$	...	...	...	...	...

Побудувати графічну залежність ймовірності обслуговування в функції інтенсивності вхідного потоку задач  $P_{обс}=f(\lambda)$ . Визначити середню інтенсивність поступлення задач

вхідного потоку  $\lambda$ , що за заданих умов задовольняє рівності  $P_{обс} = P_{обс зд}^\lambda$ . На графіку позначити значення ймовірності  $P_{обс зд}^\lambda \dots$  та середню інтенсивність задач вхідного потоку  $\lambda$ , що задовольняють вказану якість обслуговування. Визначити характер зміни залежності  $P_{обс} = f(\lambda)$ .

*Висновок:* охарактеризувати отримані результати та необхідні заходи по забезпеченню функціонування багатопроцесорної ОС із заданим значенням ймовірності обслуговування  $P_{обс зд}^\lambda$ .

Нарисувати узагальнену архітектуру розробленої багатопроцесорної ОС та проаналізувати основні параметри ефективності її функціонування.

*Загальні висновки* щодо результатів виконання лабораторної роботи.



Додаток 1.1

Вихідні дані індивідуальних завдань  
до виконання циклу лабораторних робіт №1.1÷1.4  
“Розробка багатопроцесорної обчислювальної системи  
з відмовами”

вар-т од.вм	$\bar{t}_{обс}$ $10^{-2}$ с	$\lambda$ с <sup>-1</sup>	$n_{завд.}$	$P^n_{обсзд}$	$P^t_{обсзд}$	$P^\lambda_{обсзд}$
1.	10	70	5	0.921	0.866	0.847
2.	10	80	10	0.949	0.939	0.878
3.	10	90	7	0.879	0.911	0.902
4.	10	100	12	0.943	0.9	0.64
5.	10	110	9	0.881	0.909	0.899
6.	10	120	10	0.883	0.467	0.725
7.	12,5	80	8	0.916	0.957	0.9
8.	14	50	10	0.986	0.783	0.6
9.	15	80	8	0.883	0.88	0.89
10.	15	60	6	0.917	0.837	0.67
11.	16	50	6	0.949	0.93	0.609
12.	18	50	6	0.946	0.827	0.949
13.	20	60	8	0.94	0.67	0.725
14.	20	55	8	0.941	0.595	0.952
15.	20	50	14	0.978	0.9	0.623
16.	20	45	11	0.966	0.89	0.925
17.	20	40	5	0.969	0.93	0.577
18.	20	35	9	0.993	0.864	0.549
19.	22	50	6	0.915	0.879	0.93
20.	24	50	10	0.914	0.949	0.633
21.	25	40	9	0.978	0.623	0.59
22.	30	30	7	0.946	0.853	0.925
23.	30	40	9	0.914	0.658	0.56
24.	35	20	11	0.997	0.879	0.569
25.	40	30	13	0.94	0.917	0.949

Продовження додатку 1.1

вар-т од.ВМ	$\bar{l}_{обс}$ $10^{-2}$ с	$\lambda$ $с^{-1}$	$n_{завд.}$	$P^n_{обсзд}$	$P^t_{обсзд}$	$P^\lambda_{обсзд}$
26.	40	25	7	0.978	0.59	0.989
27.	40	20	7	0.995	0.93	0.9
28.	45	20	10	0.98	0.878	0.69
29.	50	14	12	0.999	0.927	0.549
30.	50	16	9	0.991	0.939	0.93
31.	50	18	11	0.989	0.868	0.602
32.	50	20	6	0.964	0.957	0.659
33.	50	22	7	0.841	0.705	0.919
34.	50	24	14	0.94	0.895	0.69
35.	60	15	8	0.98	0.853	0.925
36.	60	20	10	0.845	0.949	0.937
37.	70	10	6	0.952	0.879	0.569
38.	80	10	7	0.949	0.878	0.97
39.	80	12,5	13	0.978	0.678	0.559
40.	80	15	9	0.883	0.917	0.999
41.	80	17,5	12	0.945	0.891	0.763
42.	90	10	6	0.966	0.878	0.584
43.	100	10	11	0.964	0.74	0.982
44.	100	12	10	0.954	0.801	0.968
45.	100	14	16	0.963	0.911	0.873
46.	100	16	14	0.972	0.855	0.945
47.	100	18	20	0.936	0.891	0.972
48.	100	8	8	0.927	0.918	0.854
49.	110	10	5	0.941	0.879	0.595
50.	120	10	6	0.914	0.725	0.467

Додаток 1.2

Вказівки щодо оформлення  
звітів виконання лабораторних робіт

Звіти виконання лабораторних робіт оформляються на аркушах формату А4 (297x210 мм) із полями: ліве - 30 мм, праве - 10 мм, верхнє - 25 мм, нижнє - 20мм.

Текст вписується шрифтом TNR-14 обсягом 30 рядків по 60 знаків в кожному рядку.

Рисунки оформляються на графічному полі із масштабною сіткою, оскільки по отриманій графічній залежності здійснюється вибір параметрів оптимізації. Рисунки дозволено розташовувати на окремих листках відразу після посилання на них в тексті.

Порядок розташування матеріалу:

- титульний листок згідно встановлених вимог (додаток 1.3);
- зміст;
- вихідні дані індивідуального завдання;
- розрахунково-графічна частина;
- висновки;
- список літератури.

М.Л.Петришин, Л.Б.Петришин Архітектура ОС

Додаток 1.3

Міністерство освіти та науки України  
Прикарпатський національний університет  
ім. Василя Стефаника

Кафедра КНІС

Лабораторна робота № X  
з курсу “Архітектура ОС”

Тема: “ ..... ”  
.....”

Варіант № XX

Викона<sup>в</sup>/ла студ. гр. КН(ІСТ)-XX-У  
Прізвище, ім’я, по-батькові

Роботу прийняв  
проф., докт. техн. наук  
Прізвище І.Б.

Допущений до захисту  
“.....” .....20XX р.  
Рейтинг .....балів  
Оцінка .....  
Підпис .....

Івано-Франківськ  
20XX

### **Список використаних літературних джерел**

- Arazi A., Ben-Jacob E., Yechiali U. Bridging genetic net works and queueing theory, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 332, 2004, 585–616.
- Bhat U.N. *An Introduction to Queueing Theory : Modeling and Analysis in Applications*. Publisher: Boston, MA : Birkhäuser Boston : Imprint : Birkhäuser, 2015.
- Bhat U.N. *An Introduction to Queueing Theory Modeling and Analysis in Applications*, Birkhäuser, Boston, MA, 2008.
- Bocharov P.P., D'Apice C., Pechinkin A.V. *Queueing Theory*. Publisher: Berlin ; Boston : De Gruyter, 2011.
- Burzyński J. *Teoria masowej obsługi*. Wyd. AGH Kraków, 1977.
- Chydzński A. *Nowe modele kolejkowe dla węzłów sieci pakietowych / Gliwice : Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego, 2013.*
- Cookson N.A., Mather W.H., Danino T., Mondragón- Palomino O., Williams R.J., Tsimring L.S., Hasty J., *Queueing up for enzymatic processing: correlated signaling through coupled degradation*, *Molecular Systems Biology* 7 (2011), 1. [9] A.S. Gibbons, *Model-centered instruction*, *Journal of Structural Learning and Intelligent Systems* 4, 2001, 511–540.
- Cooper R.B. *Introduction to queueing theory*. Publisher: Washington, DC : CEEPress Books, 1990.
- Czachórski T. *Modele kolejkowe w ocenie efektywności pracy sieci i systemów komputerowych / Gliwice : Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego, 1999.*

Filipiak J. Modelling and control of dynamic flows in communication networks. Publisher: Berlin : Springer-Verlag, 1988.

Filipowicz B. Modelowanie i analiza sieci kolejkowych / 1 st edition. Kraków : Wydawnictwo Poldex, 2005.

Filipowicz B. Modelowanie i analiza sieci kolejkowych / Kraków : Wydawnictwa AGH, 1997.

Gautam N. Analysis of queues : methods and applications. Publisher: Boca Raton : CRC Press/Taylor & Francis, cop. 2012.

Gnedenko B.V., Nowakowski J.J., Fidelis E., Wiśniewski K., Kowalenko I.N., Wstęp do teorii obsługi masowej. Warszawa : BNI Biblioteka Naukowa Inżyniera. Państwowe Wydaw. Naukowe, 1971.

Gniedenko B., Kowalenko N. Wstęp do teorii masowej obsługi. PWN Warszawa, 1971.

Gordon G. The Application of GPSS V to Discrete System Simulation. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. - 1975. - 389 pp.

Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2003.

Harchol-Balter M. Performance modeling and design of computer systems : queueing theory in action. Publisher: New York : Cambridge University Press, 2014.

Hassin R. Rational queueing. Publisher: Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2016.

Haviv M. Queues : a Course in Queueing Theory. Publication: Queues. Publisher: New York, NY : Springer, 2013.

Haviv M. Queues : a Course in Queueing Theory. Publisher: New York, NY : Springer, 2013.

Hellander A. Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods, 2009.

Ivchenko G.I., Kastanov V.A., Kovalenko I.N. Queuing System Theory, Visshaja Shkola, Moscow, 1982.

Joel Z.L., Wei N.W., Louis J., Chuan T.S., Discreteevent simulation of queuing systems, in: Sixth Youth Science Conference, Singapore Ministry of Education, Singapore, 2000, pp. 1–5.

Kałuski J. Symulatory komputerowe systemów obsługi masowej / Poznań : Wydawnictwo Wyższej Szkoły Bankowej, 2017.

Kempa W.M. Queueing models with limited access to server / Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.

Kempa W.M. Queueing models with limited access to server. Publisher: Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.

Kempa W.M. Queueing systems with batch arrivals / Gliwice : Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2012.

Kendall D.G. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain, The Annals of Mathematical Statistics 1, 1953, 338–354.

Kiesling T., Krieger T. Efficient parallel queuing system simulation, in: The 38th Conference on Winter Simulation, Winter Simulation Conference, 2006, pp. 1020–1027.

Klimow G.P. Procesy obsługi masowej / Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1979.

König D., Stoyan D. Metody teorii obsługi masowej / Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, cop. 1979.

Koning D., Stoyan D. Metody teorii masowej obsługi. WN-T Warszawa, 1979.

Kopociński B. Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa, 1973.

Koźniewska I., Włodarczyk M. Modele odnowy, niezawodności i masowej obsługi. PWN Warszawa, 1978.

Kurowski W.: Modelowanie i symulacja systemów technicznych. Wydawnictwo WSA. Łomża 2002.

Lee A.M. Applied Queueing Theory. Publisher: London : Macmillan Education, Limited, 2016.

Lee A.M. Applied Queueing Theory. Publisher: London : Macmillan Education, Limited, 2016.

Minkevičius S. On the law of the iterated logarithm in multi-phase queueing systems, Informatica II, 1997, 367–376.

Minkevičius S., Dolgopolas V., Analysis of the law of the iterated logarithm for the idle time of a customer in multiphase queues, Int. J. Pure Appl. Math. 66, 2011, 183–190.

Newell G.F. Applications of Queueing Theory. Springer Science+Business Media B.V. 1982.

Nilsen F.B. Queueing systems: Modeling, analysis and simulation, Department of Informatics, University of Oslo, Oslo, 1998.

Obretenov A., Dimitrov B., Rudzki W. Teoria masowej obsługi : poradnik. Publisher: Warszawa : Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1989.

Obretenow A. Dimitrow B. Teoria masowej obsługi. Poradnik. PWN Warszawa, 1989.

Oniszczyk W. Modele, algorytmy kolejkowe i strategie obsługi w sieciach komputerowych / Białystok : Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2005.

Oniszczyk W.: Metody modelowania. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej 1995. Podlaska Biblioteka Cyfrowa.



Palaniammal S. Probability and queueing theory. Publisher: New Delhi : PHI Learning, 2012.

Palaniammal S. Probability and queueing theory. Publisher: New Delhi : PHI Learning, 2012.

Prabhu N.U. Foundations of queueing theory. Publisher: Boston Kluwer 2002

Pugalarasu R. Probability and Queueing Theory. Publisher: Tata McGraw-Hill, 2011.

Queueing theory. Publisher: [Place of publication not identified] : Book On Demand, 2012.

Richard J. Mathar. A Java Math.BigDecimal Implementation of Core Mathematical Functions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0908.3030v3> (Дата обращения: 01.12.2019).

Robertazzi T.G. Computer networks and systems : queueing theory and performance evaluation. Publisher: New York : Springer, 2000.

Rozenberg W., Prochorow A. Teoria masowej obsługi. PWE Warszawa, 1972.

Rozenberg W., Prochorow A. Teoria masowej obsługi / Warszawa : Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1965.

Rusek K. Router interface as a queuing system with correlated service times / AGH University of Science and Technology. Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications. Kraków, 2016.

Saaty T.L Elements of queueing theory : with applications. Publisher: New York [etc.] : McGraw-Hill Book Company, 1961.

Shortle J.F., Thompson J.M., Gross D., Harris C.M. Fundamentals of queueing theory Publisher: Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2018.

Sztrik J. Finite-source queueing systems and their applications, Formal Methods in Computing 1 (2001), 7–10.

Tikhonenko O. Elementy teorii obsługi masowej / Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Częstochowie. Częstochowa : Wydaw. WSP, 2003.

Tikhonenko O. Modele obsługi masowej w systemach informacyjnych / Warszawa : Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2003.

Tikhonenko O. Modele obsługi masowej w systemach informacyjnych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa, 2003.

Vichr V. Modelowanie procesów masowej obsługi za pomocą teorii kolejek i metody Monte Carlo : zastosowanie metod matematycznych w dziedzinie normowania pracy / Warszawa : Instytut Pracy, 1967.

Wolisz A. Wybrane niekonwencjonalne systemy masowej obsługi / Gliwice : Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, 1982.

Yue. Queueing Theory and Network Applications. Publisher: [Place of publication not identified] Springer International Publishing, 2017.

Żak J. Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz / Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.

Zitek F. Stracony czas : elementy teorii obsługi masowej / Warszawa : Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1974.

Zitek F. Stracony czas. Elementy teorii obsługi masowej. PWN Warszawa, 1973.

Добров Г.М. Наука о науке. - Киев: Наукова думка, 1966. - 270 с.

Киндлер Е. Языки моделирования /пер. с чешского. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 288 с.

Кирпичников А.П. Методы прикладной теории массового обслуживания. Казань, Изд-во Казанского университета, 2011. 200 с.

Кошуняева Н.В., Патронова Н.Н. Теория массового обслуживания (практикум по решению задач). — Архангельск; САФУ, 2013. — 107 с.

Лаврусъ О. Е., Миронов Ф. С. Теория массового обслуживания. Методические указания, учебная программа и задания для контрольных работ № 1, 2 для студентов заочной формы обучения специальности 071900 “Информационные системы в технике и технологиях” [Электронный ресурс]. — Самара: СамГАПС, 2002. — 38 с.

Логинов А.А., Агафонова Д.А., Лухнев С.Н. Программное обеспечение для расчета показателей эффективности функционирования многоканальной системы массового обслуживания // Молодой ученый. — 2019. — №21. — С. 36-43. — URL <https://moluch.ru/archive/259/59358/> (дата обращения: 01.12.2019).

Логинов А.А., Збандут М.О., Ефремов М.С. Разработка ПО, моделирующего многоканальную систему массового обслуживания. «Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем»: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 5. г. Казань, — НН: ИЦРОН, 2018, с. 62–64.

Матвеев В.Ф., Ушаков В.Г. Системы массового обслуживания. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 240 с.

Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование систем массового обслуживания: учеб. пособие. - Л.: ВИККИ им.А.Ф.Можайского, 1991. – 111 с.

Рыжиков Ю.И. Машинные методы расчета систем массового обслуживания: учеб. пособие. - Л.: ВИКИ им.А.Ф.Можайского, 1979. - 177 с.

Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управление запасами: учеб. пособие. – СПб: Питер, 2001. - 376 с.

Рыжиков Ю.И. Эффективность и эксплуатация программного обеспечения ЭЦВМ: учеб. пособие. - МО СССР, 1985. - 263 с.

Саакян Г. Р. Теория массового обслуживания: Текст лекций. — Шахты: ЮРГУЭС, 2006. — 28 с.

Самаров К.Л. Элементы теории массового обслуживания. Учебно-методическое пособие. — 2009. — 18 с.

Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1998. - 320 с.

Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: практикум. - М.: Высшая школа, 1999. - 224 с.

Харин Ю.С. и др. Имитационное и статистическое моделирование: учеб. пособие. - Минск: Белорусский гос. ун-т, 1992. - 176 с.

Шемахин Е.Ю. Моделирование многоканальной открытой системы массового обслуживания с ограничениями. Определение аналитических формул // Молодой ученый. — 2015. — №12. — С. 20-27. — URL <https://moluch.ru/archive/92/20226/> (дата обращения: 01.12.2019).

Шемахин Е.Ю., Кирпичников А.П. Моделирование многоканальных открытых систем массового обслуживания с ограничениями в среде Visual Studio 2010, Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, № 3.

Шемахин Е.Ю., Моделирование СМО открытого типа. ГСЧ, «European research». 2015. № 2(3).

Шемахин Е.Ю., Моделирование СМО открытого типа. Проверка численной модели, «Вестник науки и образования». 2015. № 2(4).

Шмелева А.Г., Ладынин А.И., Бахметьев А.В. Построение взвешенных решений управления сложными производственными системами с применением теории массового обслуживания. Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 6. С. 421–426.

Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1980. - 592 с.

Янбых Г.Ф., Столяров Б.А. Оптимизация информационно-вычислительных сетей. - М.: Радио и связь, 1987. - 232 с.