

УДК 004.94(045)

**М.Т. Дехтярук,**  
кандидат фізико - математичних наук,  
доцент

## **АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ**

*В статті розглянуто основні принципи алгоритмізації та побудови імітаційних моделей у транспортних системах, як системах масового обслуговування. Розроблено схему алгоритму, що імітує роботу навантажувально-розвантажувального комплексу, в якому вхідний потік вимог (машин) обслуговується за правилом відносних пріоритетів. Дана система імітаційного моделювання реалізована в системі об'єктно-орієнтованого програмування Delphi. Проведено розрахунок середнього часу очікування вимог в черзі і середньої довжини черги, а також їх дисперсії.*

**Ключові слова:** алгоритмізація, імітаційне моделювання, система масового обслуговування, навантажувально-розвантажувальний комплекс, система об'єктно-орієнтованого програмування.

**ВСТУП.** Транспорт є однією з найважливіших галузей економіки держави і належить до сфери виробництва матеріальних послуг. Головним завданням транспорту є своєчасне, якісне й повне задоволення потреб народного господарства і населення в перевезеннях. Найважливішим елементом розробки технології перевезень вантажів є вибір транспортно-технологічної системи. Кожна транспортно-технологічна система може бути представлена у вигляді набору типових операцій, основними з яких є: вантаж; пункти зосередження вантажу; транспортна мережа; рухомий склад; навантажувально-розвантажувальні засоби; учасники логістичних процесів; тара та пакування [1].

Головними факторами, що визначають вибір транспортно-технологічних систем, є локальні технологічні процеси, що протікають у всіх ланках транспортної логістичної системи, які мають ряд

особливостей і залежать від роду вантажу, виду транспорту і його структури, галузевої характеристики, стану елементів логістичного процесу.

Для успішного функціонування транспортно-технологічної системи перевезення вантажів необхідно, щоб різномірні логістичні технології могли бути з'єднані об'єднуючими моментами в єдиний технологічний процес в якому необхідне дотримання єдиних логістичних принципів і єдиних вимог [1, 2].

Аналіз останніх наукових публікацій показує, що проблемам моделювання та оптимізації транспортних логістичних систем приділяється значна увага [3-8]. В цих роботах використовуються різні аналітичні методи оптимізації режимів роботи транспортних логістичних систем на основі теорії масового обслуговування, нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, або носять узагальнюючий характер.

Однак, складність існуючих задач не завжди дозволяє одержати вичерпні рішення на основі аналітичних методів навіть при чисельній реалізації останніх. У таких ситуаціях доводиться використовувати імітаційне моделювання [9, 10].

**МЕТА СТАТТІ** (постановка завдання). – Метою даної роботи є використання сучасних комп'ютерних інформаційних технологій – системи візуального проектування Borland Delphi – для моделювання й аналізу режимів роботи навантажувально-розвантажувального комплексу (НРК). При цьому НРК розглядається, як система масового обслуговування (СМО), в якій вхідний потік вимог (машин) обслуговується за правилом відносних пріоритетів.

### **ВИКЛАД МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.**

Імітаційне моделювання можна застосовувати для вивчення мереж транспорту і зв'язку, складних технічних комплексів, економічних і виробничих систем, біологічних систем і процесів. Імітаційне моделювання дає можливість дослідження і імітації особливостей функціонування системи в будь-яких умовах. При цьому параметри системи і навколишнього середовища можна варіювати з метою визначення оптимального варіанта структури і одержання залежностей вихідних характеристик від зміни умов.

Модель дозволяє легко реалізувати імітацію роботи системи при наявності випадкових параметрів або умов. Застосування методу імітаційного моделювання корисно у випадку, коли досліджувана система не піддається вивченню аналітичними методами, а пряме експериментування із системою важке або недоцільне.

Для створення імітаційних моделей використовуються як універсальні системи програмування – Visual C++, Borland C++ Builder, Delphi, Embarcadero RAD Studio, так і спеціалізовані системи, розроблені спеціально для побудови алгоритмів моделювання: GPSS, SIMSCRIPT, SIMULA, SIMPLE++ та ін. [9, 10].

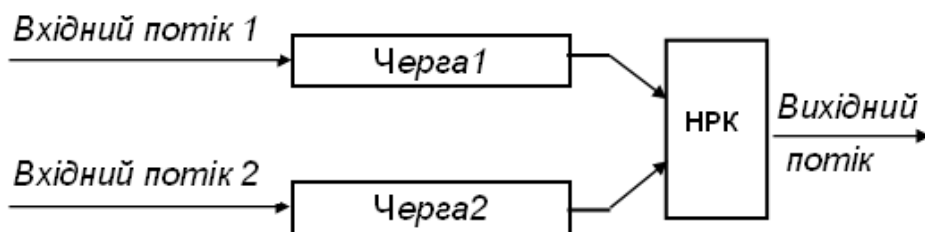
У всіх цих системах передбачаються засоби автоматичного керування послідовністю змін (подій) у моделі, динамічного розподілу даних у пам'яті, необхідного для побудови складних моделей, стандартні програми статистичної обробки результатів моделювання (накопичення і виводу гістограм, середніх значень випадкових величин, їхніх дисперсій і т.п.).

В даній роботі, для розробки комп'ютерної системи, що імітує роботу НРК, в якому вхідний потік вимог (машин) обслуговується за правилом відносних пріоритетів, використовувалась система візуального проектування Borland Delphi [11].

**1. Розробка математичної моделі та алгоритмізація роботи НРК.** Функціонування системи описується в такий спосіб. У навантажувально-розвантажувальний комплекс (НРК) приходять два типи вимог: перший складається з машин, що прибувають на розвантаження (час обслуговування таких вимог становить  $\tau_1$ ; другий — з машин, що прибувають на навантаження (час обслуговування таких вимог дорівнює  $\tau_2$ ). Для простоти викладу будемо вважати, що  $\tau_1$  і  $\tau_2$  - постійні величини (неважко видозмінити модель так, щоб  $\tau_1$  і  $\tau_2$  були випадковими величинами із заданим законом розподілу).

НРК може обслуговувати одночасно тільки одну вимогу. Якщо в момент прибуття нової вимоги НРК зайнятий, те вона стає в одну із двох черг: одна складається з машин, що прибувають на розвантаження, інша - з машин, що прибувають на навантаження. Нехай обслуговування вимог провадиться в такому порядку: у момент звільнення каналу обслуговування починається обслуговування машини, що сто-

їть першою в черзі на розвантаження. Тільки якщо ця черга порожня, то обслуговується перша машина із черги на навантаження (виражаючись мовою теорії черг, можна сказати, що обслуговування вимог (машин) в системі виконуються за правилом відносних пріоритетів). Формалізована схема системи показана на рис. 1.



**Рис. 1. Формалізована схема роботи системи**

Обидва потоки вимог, що приходять у канал обслуговування, можна описати функцією розподілу  $A(t)$  проміжків часу між моментами прибуття їх у чергу (ця функція буде своя для кожного потоку), тобто  $A\{t\} = Pr\{Q < t\}$ .

При моделюванні функція  $A(t)$  уже повинна бути відома (її можна одержати, наприклад, шляхом реєстрації і наступного статистичного аналізу моментів прибуття вимоги в чергу в реальних умовах). Практика дослідження систем масового обслуговування показує, що в багатьох випадках задовільною виявляється апроксимація функції розподілу інтервалів між моментами надходження заявок у систему експонентною функцією:

$$A(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & \text{для } t \geq 0; \\ 0 & \text{для } t < 0, \end{cases}$$

де  $\lambda$  – інтенсивність вхідного потоку (величина, зворотна середньому інтервалу часу між приходом двох суміжних вимог).

Припустимо, що нас інтересує середній час очікування вимог у черзі для потоків 1 і 2. Для кожної  $i$ -ої вимоги час очікування  $\omega_i$  в черзі дорівнює різниці між моментом часу, коли вона почала об-

слуговуватися і моментом часу, коли вона прийшла в систему. Середній час очікування становить:

$$\omega_{1cp} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \omega_{1i}; \quad \omega_{2cp} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \omega_{2i}, \quad (1)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  число вимог відповідно потоків 1 і 2, що були обслужені системою за час  $T$ .

Підсумовуючи число вимог у черзі через невеликі проміжки часу і розділивши отриману суму на число підсумовувань, одержимо середнє значення довжини черги:

$$L_{1cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_{1i}; \quad L_{2cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_{2i}, \quad (2)$$

де  $m_{1i}$  і  $m_{2i}$  - кількість вимог у першій і другій чергах у момент спостереження  $i$ ;

$N$  - число моментів спостереження (моментів зняття статистики) за час  $T$ .

Дисперсія величин  $\omega$  і  $L$ :

$$D\omega_1 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (\omega_{1i} - \omega_{1cp})^2; \quad (3)$$

$$D\omega_2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (\omega_{2i} - \omega_{2cp})^2; \quad (4)$$

$$DL_1 = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N (m_{1i} - L_{1cp})^2; \quad (5)$$

$$DL_2 = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N (m_{2i} - L_{2cp})^2. \quad (6)$$

Можна також побудувати і гістограми, що характеризують розподіл величин  $\omega$  і  $L$ .

Для одержання статистичних характеристик роботи системи можна використати метод експериментальної реєстрації і наступного статистичного аналізу моментів прибуття вимоги в чергу в реальних умовах. Однак, спостереження із секундоміром за роботою реальної системи є тривалим і трудомістким процесом, що не дозволяє досліджувати систему в умовах зміни її параметрів. У цьому випадку на допомогу може прийти імітаційна модель системи. Для

її побудови насамперед треба вміти імітувати моменти надходження вимог у чергу кожного потоку.

Для першого потоку  $Q_{i+1} = t_i + Q_i$ , де величини  $Q_i$  розподілені за законом  $A(t)$ . Неважко довести, що якщо є випадкова величина  $R$ , розподілена рівномірно в інтервалі  $(0, 1)$ , то для одержання величини  $Q$ , що має функцію розподілу  $A(t)$ , треба рішити рівняння  $A(Q) = R$  відносно  $Q$ . Зокрема, для  $A(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ,  $t \geq 0$ , треба рішити рівняння  $1 - e^{-\lambda Q} = R$ .

Звідси

$$Q = -(1/\lambda) \ln(1 - R). \quad (7)$$

Таким чином, одержання  $Q$  зводиться до знаходження  $R$ , що підпорядковується рівномірному розподілу, і обчисленню  $Q$  по (7).

У всіх системах програмування є спеціальні стандартні програми, що виробляють так звані псевдовипадкові числа, послідовність яких підпорядковується рівномірному розподілу в інтервалі  $(0, 1)$ . Одержання одного такого числа вимагає одного звертання до цієї стандартної програми.

Таким чином, алгоритм одержання моменту часу приходу наступної вимоги в чергу можна зобразити у вигляді схеми, показаної на рис. 2 для потоку 1, у припущенні, що цей потік пуасонівський.



Рис. 2. Схема алгоритму імітації вхідного потоку 1

Далі необхідно скласти алгоритм, що описує логіку роботи черги (зрозуміло, що алгоритм буде ідентичним для обох черг). Припустимо, що черга має максимальну довжину  $LM$  (число місць для очікування). Одномірний масив  $P$ , що складається з елементів (комірок)  $P_1, P_2, \dots, P_{LM}$ , імітує “місця” цієї черги. Кожна із цих комірок може бути або вільна, або зайнята вимогою. Як еквівалент вимоги зручно брати момент її приходу в чергу - ця інформація знадобиться для визначення часу очікування вимоги у черзі. Комірка  $X$  використовується як робоча комірка при записі чергової вимоги в чергу або при виборі із черги.

Комірки  $PER$  і  $POS$  містять інформацію, що дозволяє визначити наявність відповідно першої і останньої вимог у черзі. Цією інформацією є номер (індекс) відповідної комірки масиву  $P$ .

У момент вибору вимоги із черги зміст комірки  $PER$  збільшується на одиницю за правилом вибору із черги в порядку надходження. Зміст комірки  $POS$  збільшується на одиницю при записі в чергу нової вимоги. Максимальне значення змінних  $PER$  і  $POS$  дорівнює  $LM$ , тому їхня зміна відбувається відповідно до формул:

$$PER = \begin{cases} PER + 1, & \text{якщо } PER < LM; \\ PER + 1 - LM, & \text{якщо } PER \geq LM; \end{cases}$$

$$POS = \begin{cases} POS + 1, & \text{якщо } POS < LM; \\ POS + 1 - LM, & \text{якщо } POS \geq LM; \end{cases}$$

Змінна  $NP$  - число вимог в черзі; при виборі із черги  $NP$  зменшується на одиницю, а при записі в чергу - збільшується на одиницю. Змінна  $PUST$  дорівнює одиниці, якщо в черзі немає вимог, і дорівнює нулю, у протилежному випадку. Змінна  $POLN$  дорівнює одиниці, якщо в черзі немає вільних місць (у цьому випадку нова вимога не може бути записана в чергу).

Змінна  $WYB$  повинна приймати значення 1, якщо звертання до алгоритму, що імітує роботу черги, виконується з метою вибірки з останньої. Якщо ж звертання до цього алгоритму виконується для запису, то необхідно встановити  $WYB = 0$ .

Схема алгоритму, що імітує роботу черги 1, наведена на рис. 3 (всі змінні цього алгоритму, на відміну від змінних алгоритму черги 2, мають у своїх назвах цифру 1).

Роботу каналу обслуговування можна описати ознакою “вільно - зайнято”, що змінюється в часі. В якості цієї ознаки можна взяти двійкову змінну  $KSW$  ( $KSW = 1$ , якщо канал обслуговування вільний і  $KSW = 0$ , якщо канал обслуговування зайнятий).

Нехай попередній момент звільнення каналу обслуговування буде  $T_3$ . Тоді відповідно до логіки роботи системи виконується звертання до черги 1, і якщо вона не порожня, то наступний момент звільнення каналу обслуговування буде  $T_3 = T_3 + \tau_1$ .

Якщо ж черга 1 порожня, то відбувається звертання до черги 2. При цьому можливі два варіанти:

1) якщо ця черга не порожня то наступний момент звільнення каналу обслуговування буде  $T_3 = T_3 + \tau_2$  ;

2) якщо черга 2 порожня, то встановлюється значення  $KSW = 1$ .

У моменти вибору вимог із черги на обслуговування можна підраховувати час очікування в черзі по формулі  $W = T_3 - X$ . Для визначення середнього часу очікування і дисперсії цієї величини необхідно виконувати накопичення підсумовування) часу очікування і квадрата цієї величини:  $SW = SW + W$ ;  $SW^2 = SW^2 + W^2$ ;  $N = N + 1$ . Схема алгоритму, що імітує логіку роботи каналу обслуговування і одночасно виконує накопичення статистичних даних, наведена на рис. 4.

У певні моменти часу (з періодом  $DT$ ) треба робити обчислення і друкування наступних статистичних характеристик:  $WSR = SW/N$ ;  $DW = SW^2/(N - 1) - N/(N - 1) WSR^2$ .

Залишається скласти алгоритм, що забезпечує правильну послідовність чергування подій у моделі системи. Такими подіями є прихід у систему вимоги першого або другого потоку, звільнення каналу обслуговування, друкування статистичних характеристик. Робота цього алгоритму заснована на введенні поняття *системного часу*, що використовується для подання впорядкованих у часі подій.

Системний час міняється дискретно, проходячи послідовно через всі моменти здійснення подій. Роль алгоритму, що управляє послідовністю подій, полягає тепер у визначенні моменту настання найближчої події й передачі керування тим алгоритмам, які імітують цю подію.

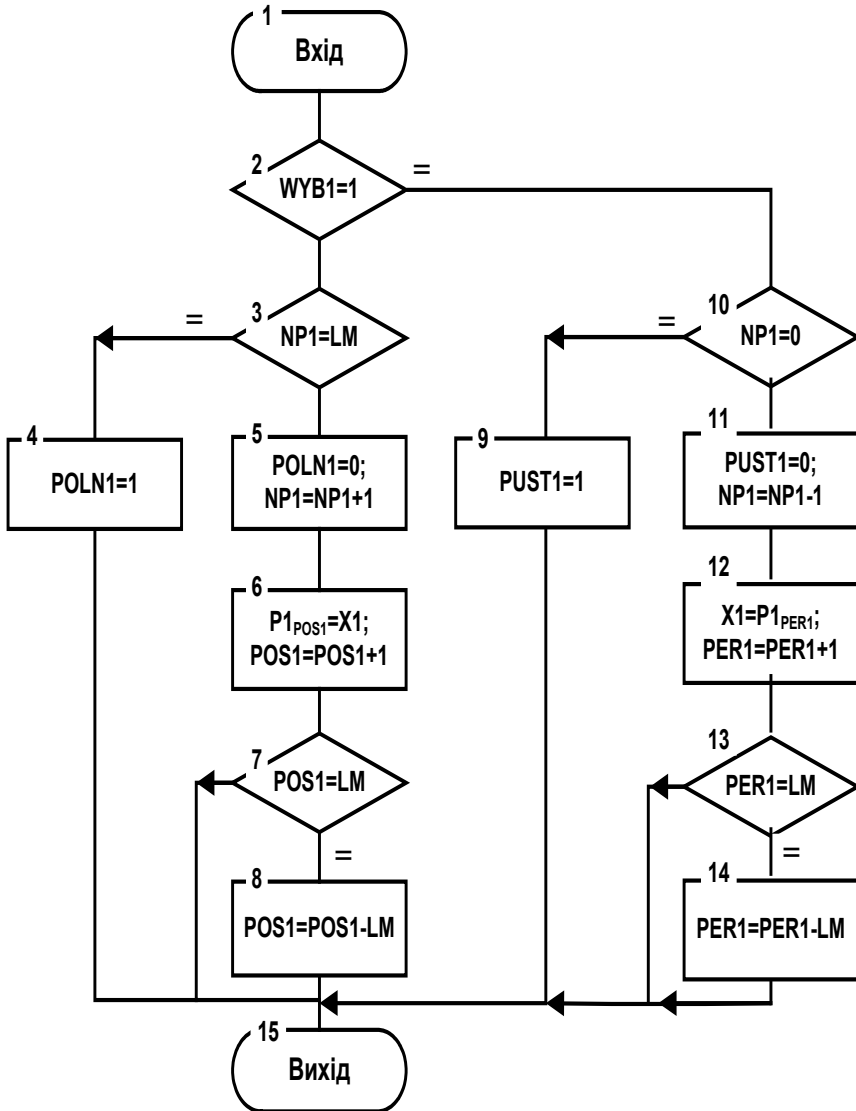
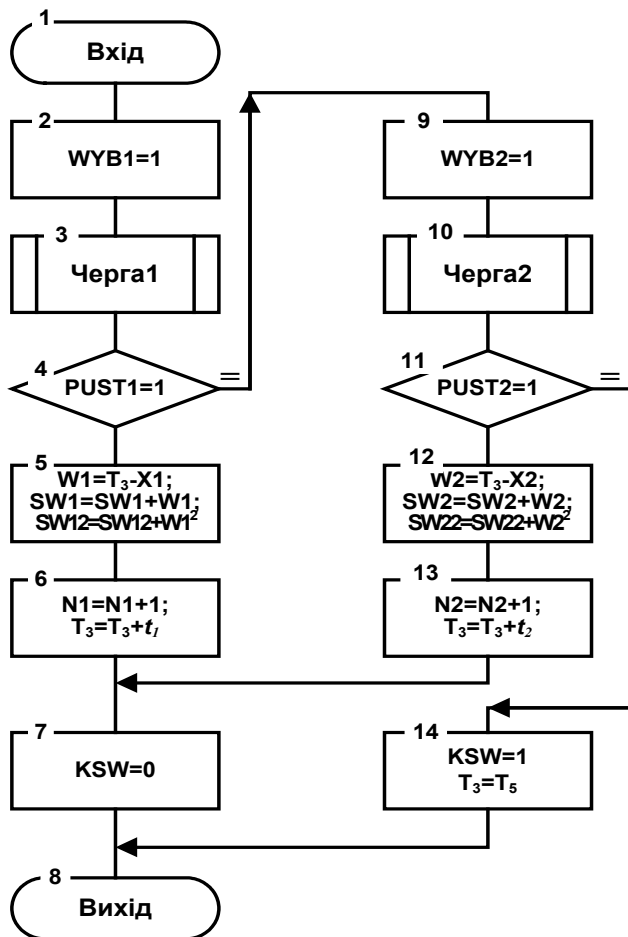


Рис. 3. Схема алгоритму імітації роботи черги 1

Момент настання найближчої події можна визначити, якщо знайти мінімальний елемент у так званому *списку майбутніх подій*, що представляє собою найближчі моменти приходу вимог першого або другого потоків, найближчий момент звільнення каналу обслуговування, найближчий момент друкування статистичних характеристик. Цей мінімальний елемент визначить нове значення системного часу і те, яка подія повинна бути в цей момент здійснена.



**Рис. 4.** Схема алгоритму імітації роботи каналу обслуговування

Схема алгоритму всієї моделі системи зображена на рис. 5. У цій схемі в список майбутніх подій  $T_i$  включений також момент закінчення моделювання.

## 2. Комп'ютерна система моделювання та аналіз роботи НРК.

Розглянута система імітаційного моделювання була реалізована в системі об'єктно-орієнтованого програмування. Після здійснення цієї події виконується відновлення списку майбутніх подій шляхом обчислення нового моменту часу, що відповідає типу події, що відбулася. Наприклад, якщо мінімальний елемент списку є моментом приходу вимоги першого потоку, то необхідно звернутися до підпрограми, що реалізує алгоритм роботи черги 1, з метою запису вимоги в цю чергу, а потім виробити значення моменту приходу наступної вимоги першого потоку (нова майбутня подія) відповідно до алгоритму, наведеного на рис 2.



ної в Delphi стандартної програми - генератора псевдовипадкових чисел, послідовність яких підкоряється рівномірному розподілу в інтервалі (0,1).

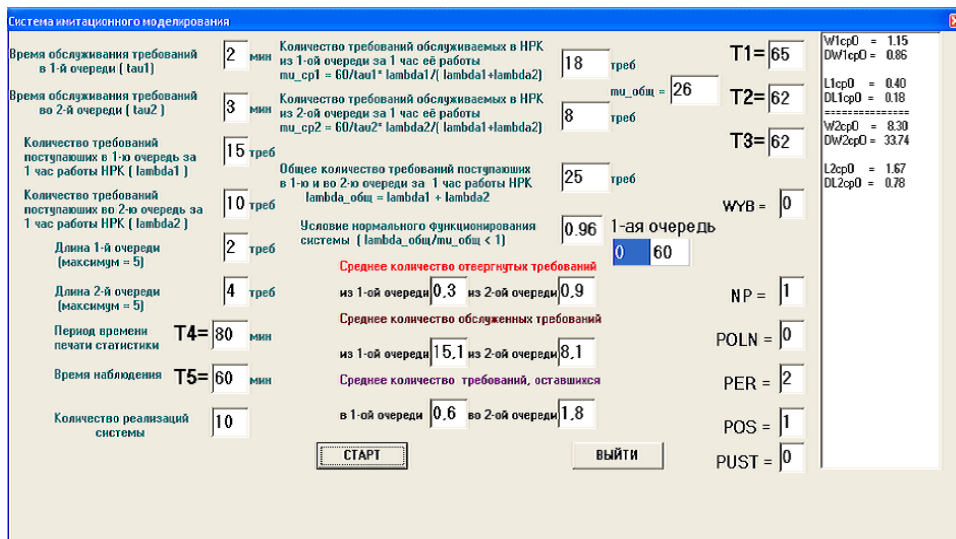


Рис.6. Інтерфейс роботи системи імітаційного моделювання НРК

Моделювання роботи 1-ї і 2-ї черг виконувалось за схемою алгоритму, що показаний на рис. 3. Значення змінних WYB, NP, POLN, PER, POS, PUST можна спостерігати в процесі моделювання роботи системи. При цьому розраховувалась загальна кількість машин, що надходять в 1-у і 2-у черги за 1 годину роботи системи:

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 + \lambda_2.$$

Моделювання роботи каналу обслуговування НРК виконувалось у відповідності зі схемою алгоритму показаного на рис. 4. Одночасно виконувалось підсумовування часу очікування вимог у черзі і квадрата цієї величини для наступного визначення середнього часу очікування і середнього значення довжини черги, а також дисперсії величин  $\omega$  і  $L$ . Розраховувалися, також, наступні параметри роботи системи:

- кількість машин, що обслуговуються в НРК із 1-ї і 2-ї черг за 1 годину її роботи

$$m_{cp1} = 60 / \tau_1 * \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2};$$

$$m_{i\_cp2} = 60 / \tau_{i2} * \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i2}};$$

• загальна кількість машин, що обслуговуються в НРК, які надійшли з 1-ї і 2-ї черг за 1 годину роботи системи

$$m_{i\_общ} = m_{i\_cp1} + m_{i\_cp2}.$$

Крім цього, виконувався також розрахунок наступних параметрів:

- середня кількість машин, що одержали відмову в обслуговуванні з 1-ї і 2-ї черг;

- середня кількість машин, що обслуговуються в НРК із 1-ї і 2-ї черг;

- середня кількість машин, що залишилися в 1-й і 2-й чергах.

Моделювання роботи всієї СМО виконувалося за схемою алгоритму, зображеного на рис. 5, що забезпечує правильну послідовність чергування подій у моделі системи. Такими подіями є:

1. Робота 1-ї черги;
2. Робота 2-ї черги;
3. Робота НРК;
4. Обчислення й друкування статистичних характеристик;
5. Закінчення роботи системи.

Результати розрахунку середнього часу очікування в 1-й ( $\omega_{1cp}$ ) і 2-й ( $\omega_{2cp}$ ) чергах, середнього значення довжини 1-ї ( $L_{1cp}$ ) і 2-ї ( $L_{2cp}$ ) черг і дисперсії величин  $\omega$  і  $L$ , які розраховувалися по формулах (1) - (6), виводилися у вікні компонента ListBox (рис. 6), причому для кожної реалізації системи окремо.

Розглянуті на наведеному вище прикладі елементи моделювання показують, що моделі транспортних систем зручно будувати по блоковому принципу, причому кожний блок підкоряється власній логіці роботи, що імітує певний процес або пристрій системи, яка моделюється. Деякі із цих блоків можуть бути реалізовані як стандартні шляхом включення їх у бібліотеки стандартних програм. Цей же принцип використовується при розробці спеціальних мов моделювання, у яких типові алгоритми реалізуються у вигляді операторів або стандартних процедур.

**ВИСНОВКИ.** В статті розроблено схему алгоритму та імітаційну модель роботи НРК, в якому вхідний потік вимог (машин) обслу-

говується за правилом відносних пріоритетів. За допомогою системи об'єктно-орієнтованого програмування Delphi проведено розрахунок таких характеристик НРК, як середня довжина черги і середній час очікування в черзі залежно від інтенсивності вхідного потоку вимог і продуктивності каналу обслуговування, для одержання рекомендацій про кількість каналів обслуговування або про доцільність автоматизації.

*В статье рассмотрены основные принципы алгоритмизации и построения имитационных моделей в транспортных системах, как системах массового обслуживания. Разработана схема алгоритма, что имитирует работу погрузочно-разгрузочного комплекса, в которой входной поток требований (машин) обслуживается по правилу относительных приоритетов. Данная система имитационного моделирования реализована в системе объектно-ориентированного программирования Delphi. Проведен расчет среднего времени ожидания требований в очереди и средней длины очереди, а также их дисперсии.*

**Ключевые слова:** алгоритмизация, имитационное моделирование, система массового обслуживания, погрузочно-разгрузочный комплекс, система объектно-ориентированного программирования.

*In article main principles of algorithmization and construction of imitating models in transport systems, as systems of mass service are considered. The algorithm scheme that simulates work of a cargo handling complex in which the entrance stream of requirements (cars) is served by a rule of relative priorities is developed. The given system of imitating modelling is realised in system of object-oriented programming Delphi. Calculation of an average waiting time of requirements in turn and average length of turn, and also their dispersion is carried out.*

**Keywords:** algorithmization, imitating modelling, system of mass service, a cargo handling complex, system of object-oriented programming.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов И. Г. Транспортна логістика [Текст]: навч. пос. / И. Г. Смирнов, Т. В. Косарева. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 224 с.

2. Лукинский В. С. Логистика автомобильного транспорта [Текст] / В. С. Лукинский, В. И. Бережной, Е. В. Бережная. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 368 с.
3. Eksioglu B. The vehicle routing problem: A taxonomic review [Text] / B. Eksioglu, A. V. Vural, A. Reisman // Computers & Industrial Engineering. – 2009. – **57**, № 4. – P. 1472-1483.
4. Dabia S. Branch and cut and price for the time dependent vehicle routing problem with time windows [Text] / S. Dabia, S. Ropke, T. Van Woensel // Transportation Science. – 2010. – **361**, № 11. – P. 56-62.
5. Kholodenko A. Supply chain equilibriums under non-linear cost functions of participants [Text] / A. Kholodenko, O. Gorb // Montenegrin journal of economics. – 2010. – № 6. – P. 5-8.
6. Кічка О. І. Моделювання поведінки транспортно-складської системи [Текст] / О. І. Кічка // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: СУНУ. – 2012. – № 6 (177). – Ч. 1. – С. 312-314.
7. Дудукалов Ю. В. Применение методов нечеткого моделирования для оптимизации транспортных систем [Текст] / Ю. В. Дудукалов // Вісник СевНТУ: Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь. – 2011. – Вип. 122/2011. С. 61-64.
8. Hosny M. I. Investigating genetic algorithms for solving the multiple vehicle pickup and delivery problem with time windows [Text] / M. I. Hosny, C. L. Mumford // Metaheuristic International Conference, MIC-2009. – 2009. – P. 36-39.
9. Томашевский В. Н. Моделювання систем [Текст] / В. Н. Томашевский. – К.: Видавнична група ВНУ, 2007. – 352 с.
10. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии [Текст] / Ю. И. Рыжиков. – М.: Альтекс-А. 2004. – 384 с.
11. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 7 [Текст] / А. Я. Архангельский. – М. : ЗАО «Издательство БИНОМ», 2006. — 218 с.