

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 519.876.5:658.512

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.7

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ  
ТА ВИКОНАННЯ ПАКЕТІВ РОБІТ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Безкорвайний В. В., Чоломбитько Д. В.  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**Анотація.** Розроблена аналітико-імітаційна модель пакетів робіт у технологічних системах. У ній реалізовано адаптивний алгоритм багатокритеріального розподілу робіт, що дозволяє визначити стохастичний тип потоків робіт та часу, який необхідний для їхнього здійснення, точний стан виконавців під час повторних розподілах робіт, можливу необхідність доопрацювання та зміну пріоритетів робіт.

**Ключові слова:** технологічна система, розподіл робіт, оптимізація, прийняття рішень, моделювання, проектування.

### Вступ

До технологічних систем (ТС), що проєктуються, створюються й експлуатуються в сферах виробництва та обслуговування, висуваються все більш високі вимоги щодо їхньої продуктивності, екологічності, економічності, надійності, терміну використання тощо [1]. На певному етапі зміна вимог до ТС та (або) умов, в яких вони функціонують, призводять до необхідності їхнього реінжинірингу (перепроєктування) [2–4]. Проєкти реінжинірингу об'єктів розглядаються як проблеми, які необхідно вирішити в умовах неповної визначеності вхідних даних множини завдань їхньої структурної, топологічної, параметричної й функціональної оптимізації. Сучасні технології проєктування та реінжинірингу реалізуються на основі методології системного підходу, що передбачає декомпозицію проблеми на комплекси робіт (завдань) і окремі роботи [5]. Водночас як в управлінні проєктами реінжинірингу, так і в процесах проєктування та керування такими об'єктами виникає необхідність оптимізації розподілу стохастичних потоків пакетів робіт між їхніми елементами (відділами, виконавцями, обладнанням тощо) [6]. Залежно від особливостей ТС і завдань їхнього дослідження роботи окремих пакетів можуть здійснюватись незалежно (паралельно), послідовно або з огляду на більш складні зв'язки між ними.

Недетермінованість вхідних потоків та часу здійснення процесу, наявність специфічних бізнес-правил призначення робіт та необхідність врахування множини критеріїв впливу (матеріальних, часових, якісних) на ефективність функціонування актуалізує

завдання моделювання процесів розподілу та створення пакетів робіт під час системного проєктування ТС [7].

Дослідження та впровадження в практичну діяльність проєктування й управління методів розподілу пакетів робіт створюють умови для підвищення ефективності функціонування наявних і створюваних ТС.

### Аналіз публікацій

Завдання розподілу пакетів робіт у ТС подібні до завдань розподілу робіт на станціях технічного обслуговування автомобілів, на будівництві, під час розроблення програмних систем тощо. Вони можуть бути зведені до класичного завдання призначення або модифікованих завдань призначення з додатковими умовами [8].

Подібними до цього є завдання призначення найменшої кількості виконавців, складання розкладів, планів будівництва, календарного планування, планування та управління проєктами, завдання ієрархічного планування.

У класичній задачі про призначення наведено часові, матеріальні чи фінансові витрати на здійснення  $i$ -го процесу  $j$ -м виконавцем  $a_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  (де  $n$  – кількість робіт і кількість виконавців). У цьому випадку кожен з виконавців може здійснювати будь-який процес. Потрібно призначити на кожний етап роботи одного виконавця в такий спосіб, щоб мінімізувати сумарні витрати на здійснення всіх етапів процесу.

Математична модель класичної задачі про призначення за показником витрат може бути

подана так [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_x, \\ a_{ij} > 0, \quad i, j = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $x = [x_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  – матриця призначення (елемент  $x_{ij} = 1$ , якщо  $i$ -ий етап призначений  $j$ -му виконавцю;  $x_{ij} = 0$  – в іншому випадку).

Для розв'язання задач призначення найчастіше використовують угорський алгоритм, метод гілок та границь, симплекс-метод [9].

Особливості деяких ТС як об'єктів проектування, реінжинірингу чи керування не задовольняють вимогам моделі класичної задачі (1) [7]:

- необхідність розподілу не одного, а потоку пакетів робіт;

- метою може бути пошук максимуму цільової функції (прибутку, надійності, якості здійснення робіт)  $f(x) \rightarrow \max$ ;

- можлива наявність декількох цільових функцій; кількість виконавців  $r$  може не дорівнювати кількості робіт  $r \neq n$ ;

- наявність заборон на призначення деяких видів робіт деяким виконавцям;

- витрати на здійснення робіт можуть бути недетермінованими.

З огляду на динаміку вхідного потоку пакетів, неповну визначеність параметрів процесу функціонування ТС, кваліфікацію та спеціалізацію виконавців необхідно визначити умови звільнення виконавців після здійснення попередніх процесів робіт. З цією метою може бути використане імітаційне статистичне моделювання [11].

Відповідно до вищезазначеного, актуальним є науково-прикладне завдання розроблення аналітико-імітаційної моделі циклічного розподілу пакетів робіт за множиною показників з огляду на завантаженість виконавців і неповну визначеність параметрів процесу.

### Мета та постановка завдання

Під час аналізу сучасного стану проблеми моделювання процесу розподілу та створення пакетів робіт під час системного проекту-

вання технологічних систем визначено, що наявні математичні моделі задач є обмеженими у можливостях та у використанні. Вони ґрунтуються на етапах робіт в умовах повної визначеності, не враховують поточний стан виконавців під час розподілу нового етапу, багатокритеріальний тип цільової функції розподілу, наявність пріоритетів та заборон під час здійснення процесу.

З огляду на це *метою дослідження* є підвищення ефективності технологій системного проектування ТС завдяки розробленню моделі процесу розподілу та здійснення етапів робіт в умовах стохастичного типу вхідного потоку, багатокритеріальності розподілу, наявності пріоритетів та заборон під час процесу розподілу.

*Об'єктом дослідження* є ТС, призначені для здійснення виробничих, будівельних, ремонтних та інших видів потоків з етапів робіт в умовах неповної визначеності.

*Предметом дослідження* є процеси циклічного розподілу потоків з етапів робіт за множиною показників якості та їхнього здійснення з огляду на кваліфікацію та завантаженість виконавців.

У статті розглядається процес етапів робіт у ТС, що можуть здійснюватись у випадкові моменти часу та потребувати для кожного з етапів випадкового обсягу ресурсів (типу обладнання, часу для здійснення, кваліфікації виконавця тощо). З огляду на це ТС пропонується розглядати як трифазну багатоканальну систему масового обслуговування (СМО) [9]. На вхід системи у випадкові моменти часу надходять заявки, кожній з яких відповідає етап з  $n$ -ої кількості процесів. Канал першої фази здійснює розподіл процесів, кількість  $r$  каналів другої фази здійснюють окремі процеси етапу, а канал третьої фази об'єднує результати робіт каналів другої фази.

Розглянемо варіант динамічної задачі про призначення виконавців ТС як каналів СМО.

Задані такі елементи:

- структура ТС (канал першої фази,  $r$  каналів другої фази, кожен з яких здійснює одну з  $n$  робіт, та канал третьої фази);

- вхідний потік заявок на здійснення робіт, що визначаються законом розподілу та його параметрами;

- фінансові (матеріальні) витрати на здійснення робіт кожної спеціалізації кожним з каналів;

- закони розподілу та їхні параметри для часу здійснення робіт кожним з каналів;

– якість здійснення робіт кожної спеціалізації кожним з каналів.

Необхідно для заданого інтервалу роботи ТС циклічно здійснити найкращий розподіл  $n$  робіт для  $r$  каналів другої фази за показниками фінансових (матеріальних) витрат  $k_1 \rightarrow \min$ , витрат часу  $k_2 \rightarrow \min$  та якості здійснення етапів робіт  $k_3 \rightarrow \max$ .

### Основний матеріал дослідження.

#### Аналітична модель задачі розподілу пакетів робіт

Оскільки задача розподілу робіт буде розв'язуватися в процесі комп'ютерного імітаційного моделювання, для автоматичного вибору найкращого рішення необхідно формалізувати локальні критерії оптимізації  $k_l(x)$ ,  $l = \overline{1,3}$ . Скористаємось визначеними позначеннями.

Оскільки сумарні витрати фінансових (матеріальних) ресурсів на першій і третій фазах  $c_\Delta$  не залежать від якості розподілу робіт, цільовою функцією для них може бути така [6]:

$$k_1(x) = c_\Delta + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x \in X}, \quad (2)$$

де  $c_{ij} = (c_{ij}^o + c'_{ij})$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  – загальні витрати на здійснення  $i$ -ї роботи  $j$ -м виконавцем;

$c_{ij}^o$  – витрати на перехід до здійснення поточного етапу процесу після попереднього;

$c'_{ij}$  – номінальні витрати на здійснення  $j$ -м виконавцем  $i$ -ї роботи.

З огляду на те, що роботи на другій фазі здійснюються незалежно та паралельно, у цільовій функції витрат часу використано його максимальне значення [6]:

$$k_2(x) = \tau_\Delta + \max_i \{ \tau_{ij} x_{ij} \} \rightarrow \min_{x \in X}, \quad (3)$$

де  $\tau_\Delta$  – часові витрати на розподіл та агрегацію робіт етапу;  $\tau_{ij} = (\tau_{ij}^o + \tau'_{ij})$  – сумарні витрати часу на здійснення  $i$ -ї роботи  $j$ -м виконавцем;  $\tau_{ij}^o$  – час на перехід до здійснення поточної роботи після попереднього етапу;  $\tau'_{ij}$  – номінальний час здійснення  $i$ -ї роботи  $j$ -м виконавцем.

Для аналізу якості на другій фазі пропонується використати мінімальне її значення

серед всіх етапів процесу [6]. Тоді цільову функцію якості здійснення етапів робіт можна записати так:

$$k_3(x) = \min_{1 \leq i, j \leq n} \{ q_{ij} x_{ij} \} \rightarrow \max_{x \in X}, \quad (4)$$

де  $q_{ij}$  – якість здійснення  $i$ -ї роботи етапу  $j$ -м виконавцем

Для аналізу варіантів розподілу з множини допустимих  $x \in X$  одночасно за показниками матеріальних (фінансових)  $k_1(x)$ , часових витрат  $k_2(x)$  та якості здійснення етапів робіт  $k_3(x)$  скористаємось їхньою адитивною згортокою [11–12]:

$$P(x) = \sum_{l=1}^3 \lambda_l \xi_l(x) \rightarrow \max_{x \in X}, \quad (5)$$

$$\xi_l(x) = \{ [k_l(x) - k_l^-] / [k_l^+ - k_l^-] \}^{\alpha_l}, \quad l = \overline{1,3}, \quad (6)$$

де  $P(x)$  – функція загальної якості розподілу  $x \in X$ ;  $\lambda_l$  – вагові коефіцієнти локальних

критеріїв,  $\lambda_l \geq 0$ ,  $l = \overline{1,3}$ ,  $\sum_{l=1}^3 \lambda_l = 1$ ;  $\xi_l(s)$  – фу-

нкція корисності локального критерію  $k_l(x)$ ;

$k_l^+$ ,  $k_l^-$  – найкраще та найгірше значення критерію  $k_l(x)$ ;  $\alpha_l$  – параметри, які визначають вид функції корисності локального критерію (лінійна, випукла чи увігнута).

У цьому випадку на вхід ТС надходять елементи, що складаються з  $n$ -ої кількості робіт для розподілу серед  $r \neq n$  виконавців. У таких ситуаціях можна використовувати квадратні матриці розміром  $d \times d$  (де  $d = \max\{n, r\}$ ), що визначають фінансові та часові витрати, а також якість здійснення робіт.

Якщо  $n > r$ , пропонується визначити  $\Delta = n - r$  кількості фіктивних виконавців, а до матриці часових і фінансових витрат та якості потрібно додати відповідну кількість стовбців. Значення цих елементів мають бути гіршими за значення всіх елементів відповідних базових матриць.

Якщо  $n < r$ , пропонується визначити  $\Delta = r - n$  як кількість фіктивних робіт, а до матриці часових і фінансових витрат та якості потрібно додати відповідну кількість рядків. У цьому випадку до матриці часових і фінансових витрат додаються нульові елементи, а до матриці якості – елементи, що мають середні значення елементів базової матриці.

Для циклічного розв'язання задач розподілу робіт етапів (2)–(6) вибрано модифікований угорський алгоритм [13].

### Імітаційна модель процесу розподілу та здійснення етапів робіт

Метою імітації процесу функціонування ТС є визначення стану каналів на момент надходження чергового етапу робіт та загального часу розподілу й здійснення етапів робіт:

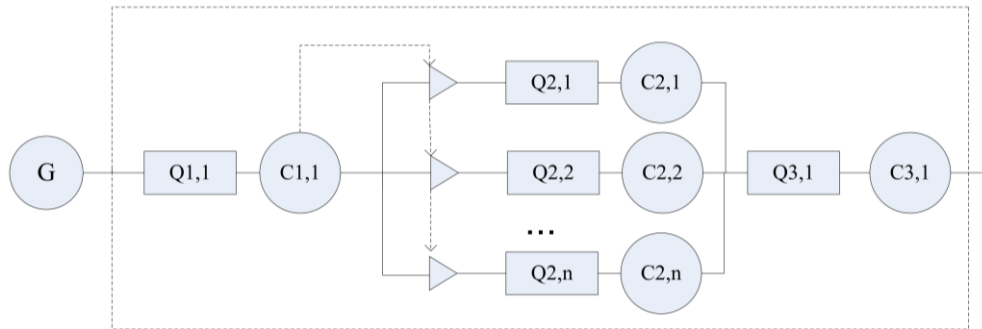


Рис. 1. Схема процесу розподілу та здійснення етапів робіт

Для розв'язання задачі використано метод аналітико-імітаційного статистичного моделювання [7]. Моделювальний алгоритм побудовано за модифікованим подвійним принципом послідовного опрацювання заявок.

Джерело  $G$  формує потік заявок (етапів робіт), що надходять у випадкові моменти часу. Перед каналами кожної з фаз можуть виникати черги заявок  $Q_{1,1}$ ,  $Q_{2,1}$ ,  $Q_{2,2}$ , ...,  $Q_{2,n}$  та  $Q_{3,1}$ . Канал  $C_{1,1}$  імітує процес розподілу заявок (етапів робіт), які за допомогою системи клапанів надходять до каналів другої  $C_{2,1}$ ,  $C_{2,2}$ , ...,  $C_{2,n}$  та третьої  $C_{3,1}$  фази.

Спочатку здійснюється багатокритеріальний розподіл каналом  $C_{1,1}$  етапів робіт серед вільних каналів-виконавців  $C_{2,i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Якщо вільних каналів на момент отримання заявок немає, визначається черговість процесів  $Q_{1,1}$ .

Для більш повного завантаження каналів-виконавців канал  $C_{1,1}$  може розподіляти етапи робіт із декількох отриманих одночасно, але роботи етапів, які надійшли раніше, мають більш високий пріоритет.

Після здійснення кожний етап роботи надходить до накопичувача  $Q_{3,1}$  каналу агрегації робіт  $C_{3,1}$ . Перевірка якості процесу та відповідності її визначеним вимогам

$$\tau(x) = \tau_{\Delta} + \max_i \{ \tau_{ij} x_{ij} \}. \quad (7).$$

З огляду на стохастичний тип вхідного потоку етапів робіт та часу для їхнього здійснення пропонується розглядати ТС як багатоканальну багатоканальну СМО [10, 14–16]. Схема процесу розподілу та здійснення етапів робіт у нотації СМО подана на рис. 1.

здійснюється засобами цього каналу. Якщо якість є незадовільною, цей етап надсилається для повторного процесу здійснення робіт до каналу другої фази. Щоб уникнути затримки проведення робіт, для відповідного етапу визначається найвищий пріоритет.

Коли до накопичувача  $Q_{3,1}$  надходять якісно проведені усі етапи процесу, здійснюється їхня агрегація і цей етап залишає систему.

### Програмна реалізація та експерименти

Під час вибору мови моделювання враховувалась необхідність гнучкої взаємодії засобів генерації варіантів побудови ТС і аналіз їхніх функціональних характеристик. Це обумовило вибір для реалізації запропонованої аналітико-імітаційної моделі мов загального призначення. Розроблений моделювальний алгоритм реалізовано мовою Java.

Для отримання результатів необхідної точності, якщо похибка  $\varepsilon$  не перевищує задане значення  $\varepsilon^*$ , вирішено основні завдання тактичного планування комп'ютерних експериментів: визначено початкові умови моделювання; визначено необхідну кількість експериментів; запропоновано вирішення питання зменшення дисперсії отриманого аналізу; визначено умови зупинення експериментів.

Під час вибору початкових умов моделювання за аналітичними співвідношеннями отримано аналіз завантаження каналів  $C_{2,1}$ ,

$C_{2,2}, \dots, C_{2,n}, C_{3,1}$  та довжини відповідних черг  $Q_{1,1}, Q_{2,1}, Q_{2,2}, \dots, Q_{2,n}, Q_{3,1}$ .

Як елемент математичного сподівання часу розподілу та здійснення етапів робіт  $\tau(x)$  використано його середнє значення за

результатами моделювання  $\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i$  (де  $\tau_i$

– час розподілу та здійснення етапів робіт в  $i$ -му експерименті;  $N$  – кількість експериментів). Тоді похибка аналізу дорівнює  $\varepsilon = |\tau(x) - \bar{\tau}|$  (де  $\tau(x)$  – фактичне значення часу розподілу та здійснення етапу робіт).

Достовірність аналізу  $\alpha$  визначає ймовірність того, що отримане значення похибки  $\varepsilon$  не перевищує задане значення  $\varepsilon^*$ :

$$P[|\tau(x) - \bar{\tau}| \leq \varepsilon^*] = \alpha.$$

З використанням цих позначень отримаємо співвідношення для визначення похибки та необхідної кількості експериментів:

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sigma / \sqrt{N}, \quad N^* = t_{\alpha}^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (8)$$

де  $t_{\alpha}$  – табличний параметр (квантиль розподілу ймовірностей для визначеного рівня достовірності  $\alpha$ );  $\sigma$  – середньоквадратичні відхилення.

Для зменшення дисперсії отриманого аналізу не використовували початкову статистику, зберігаючи стан каналів і зайнятість відповідних черг.

Для визначення умов автоматичної зупинки експериментів на першому етапі здійснюється  $N$ -а кількість експериментів. За отриманим значенням похибки  $\varepsilon$  (8) визначається їхня необхідна кількість  $N^*$  (8).

Якщо  $N \geq N^*$ , то необхідна точність результатів досягнута, тобто  $\varepsilon < \varepsilon^*$ . Якщо  $N < N^*$ , то на другому етапі необхідно здійснити ще  $\Delta N = N^* - N$  експериментів.

Для моделювання випадкових величин було використано бібліотечні генератори псевдовипадкових чисел із рівномірним законом розподілу.

Експерименти здійснювалися для таких значень тривалості оброблення етапів й окремих видів робіт: тривалість оброблення етапів на фазах 1 і 3 становила 50 умовних часових одиниць (ум. час. од.), тривалість здійснення окремих робіт становила  $550 \pm 450$  ум. час. од.

Значення інших параметрів експериментів наведено в табл. 1

Таблиця 1 – Значення параметрів експерименту

Параметр	Значення
----------	----------

Кількість каналів-виконавців	5
Кількість різноманітних робіт	30
Діапазон кількості етапів	20÷50
Діапазон кількості робіт в 1 етапі	10÷25
Вагові коефіцієнти матеріальних витрат, часу для здійснення та якості	0.5, 0.3, 0.2
Верхня часова межа генерації пакетів робіт, ум. час. од.	100 000
Кількість експериментів, N	300

На рис. 2 наведено приклад розподілу в часі вхідного потоку етапів робіт для одного з експериментів. За умови визначених значень параметрів на вхід системи було надіслано 41 етап, кожен з яких у середньому складався з 18 робіт.

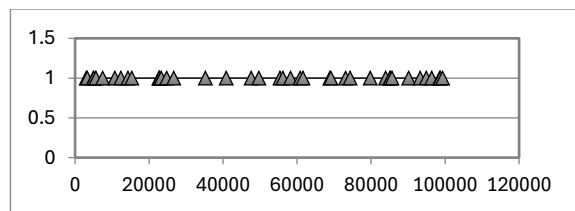


Рис. 2. Графік надходження етапів робіт

У більше ніж 50 % випадків максимальна довжина черги становила не більше ніж 2 пакети, а у більше ніж 75 % – не більше ніж 3 пакети (рис. 3).

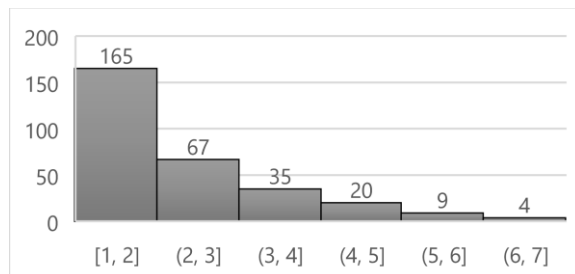


Рис. 3. Розподіл максимальної довжини черги пакетів

Медіанний час здійснення етапів робіт дорівнює від 3000 до 4000 умовних часових одиниць, що еквівалентно здійсненню 8 робіт середньої тривалості (рис. 4). Більше ніж 50 % усіх етапів ніколи не потрапляли до черги (на розподіл, здійснення та агрегацію). Більше ніж 50 % усіх пакетів, які потрапляли до черги, мали менший ніж 2500 ум. час. од. час очікування (рис. 5).

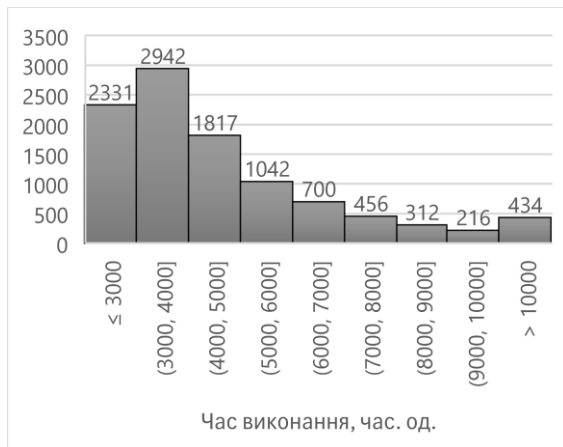


Рис. 4. Гістограма часу для здійснення етапів

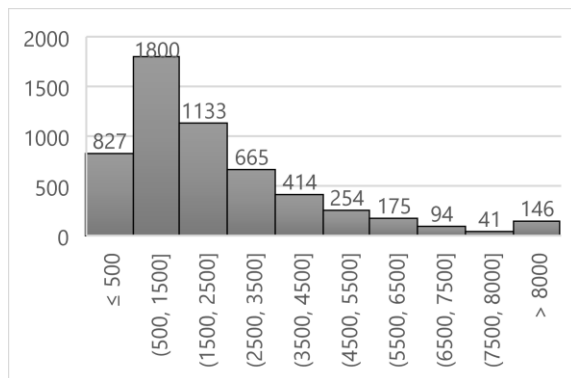


Рис. 5. Гістограма часу перебування етапів робіт у чергах

Отримані значення аналізу характеристик процесу розподілу та здійснення етапів робіт наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення характеристик процесу

Параметр	Значення
Середній час для здійснення етапів, ум. час. од.	4712
Середнє значення максимальної черги	3
Середній час перебування етапів у чергах, ум. час. од.	2267

Розраховані значення похибок математичного сподівання (вибіркового середнього) для здійснення етапів експериментів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення похибок результатів

Параметр	Значення
Похибка середнього часу здійснення етапів, ум. час. од.	205 (4,3 %)
Похибка середнього значення максимальної черги	0.13 (4,3 %)
Похибка середнього часу перебування етапів у чергах, ум. час. од.	177 (7,8 %)

Розроблена аналітико-імітаційна модель дозволяє здійснювати найкращий розподіл етапів робіт за показниками якості, часових і фінансових витрат та визначати функціональні характеристики ТС під час використання такого розподілу.

### Висновки

Під час аналізу сучасного стану проблеми розподілу етапів робіт, які здійснюються ТС, визначено, що модель класичної задачі призначення не дозволяють здійснювати коректний розподіл потоку етапів робіт за множиною показників якості в умовах недетермінованих вхідних даних. Це обумовило актуальність науково-прикладного завдання підвищення ефективності ТС завдяки розробленню моделі циклічного розподілу етапів робіт за множиною показників з огляду на завантаженість виконавців і неповну визначеність параметрів процесу.

Відповідно до цього, визначена та розроблена аналітико-імітаційна модель задачі, яка реалізує адаптивний алгоритм розподілу робіт. Вона дозволяє враховувати стохастичний вид потоків робіт та час для їхнього здійснення, множини показників якості розподілів, поточний стан виконавців під час повторних розподілах робіт, можливу необхідність доопрацювання та зміну пріоритетів робіт.

В аналітичній частині запропонована математична модель розподілу робіт з використанням адитивної функції багатокритеріального оцінювання й вибору. Стохастичний вид потоків робіт та час для їхнього здійснення враховано в імітаційній частині моделі, що визначає процес функціонування ТС як трифазну багатоканальну СМО.

Отримані результати дозволяють підвищити ефективність технологій структурно-технологічної оптимізації ТС у процесах їхнього проектування, реінжинірингу або керування ними. Практичне використання запропонованої моделі сприятиме підвищенню продуктивності ТС завдяки зменшенню часу для здійснення етапів робіт.

Напрямами подальших досліджень можуть бути вдосконалення моделі для визначення залежності між процесами етапів та розроблення методів для розв'язання задач розподілу робіт великої розмірності.

### Література

1. Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications / Editors H. A. Le Thi, H. M. Le, T. Ph. Dinh. Springer International Publishing, 2020. 1152 p. doi:

- <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4>.
2. Tal S. A., Salaimh S. A., Hajiyev N. Information Technology In Business Process Reengineering. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29. No. 7. P. 3653–3657. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342283185\\_Information\\_Technology\\_In\\_Business\\_Process\\_Reengineering](https://www.researchgate.net/publication/342283185_Information_Technology_In_Business_Process_Reengineering) (дата звернення: 06.02.2024).
  3. Enterprise engineering and management at the crossroads / P. Bernus et al. *Computers in industry*. 2016. Vol. 79. P. 87–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.010> (дата звернення: 11.02.2024).
  4. Susanto H., Fang-Yie L., Chen C. K. *Business process reengineering*. Taylor & Francis Group, 2019. 248 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429488573>.
  5. Beskorovainyi V., Imanhulova Z. Technology of large-scale objects system optimization. *ECONTECHMOD*. 2017. Vol. 06. № 4. P. 3–8. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/410841> (дата звернення: 19.09.2023).
  6. Bezkorovainyi V., Bezuhla H., Cholombytko D. Mathematical models of the cyclic work package distribution task. *Innovative integrated computer systems in strategic project management: collective monograph*. European University Press. Riga: ISMA, 2022. P. 7–15.
  7. Bezkorovainyi V., Bezuhla H. Simulation modelling of the process of distribution and execution of work packages. *Information systems in project and program management: Collective monograph*. European University Press. Riga: ISMA, 2023. P. 16–28.
  8. Viltard L. A., Viltard L. Distribution channels (dc) in the technological industry – ideas for improvement in Argentina. *Independent Journal of Management & Production*. 2021. Vol. 12. Is. 4. P. 874–908. doi: 10.14807/ijmp.v12i4.1340.
  9. Graph based twin cost matrices for unbalanced assignment problem with improved ant colony algorithm / L. Wang et al. *Results in applied mathematics*. 2021. Vol. 12. P. 100207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2021.100207> (дата звернення: 11.02.2024).
  10. Барабаш О. В., Колумбет В. П. Дослідження систем масового обслуговування на основі імітаційного моделювання з урахуванням мультиагентного підходу. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2023. Т. 2. № 04. С. 115–121. URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-12> (дата звернення: 11.02.2024).
  11. Beskorovainyi V., Berezovskyi H. Estimating the properties of technological systems based on fuzzy sets. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2017. № 1 (1). P. 14–20. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>.
  12. Beskorovainyi V. Parametric synthesis of models for multicriterial estimation of technological systems. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2017. № 2 (2). P. 5–11.
  13. Bertsekas D. New auction algorithms for the assignment problem and extensions. *Results in control and optimization*. 2024. P. 100383. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100383> (дата звернення: 11.02.2024).
  14. Kelly F., Yudovina E. *Queueing networks. Stochastic networks*. Cambridge. P. 22–48. URL: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139565363.004> (дата звернення: 11.02.2024).
  15. Newell G. F. *Stochastic models. Applications of queueing theory*. Dordrecht, 1982. P. 105–142. URL: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-5970-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5970-5_4) (дата звернення: 11.02.2024).
  16. *Stochastic models in queueing theory*. Elsevier, 2003. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-487462-6.x5000-0> (дата звернення: 11.02.2024).

### References

1. *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications / Editors H. A. Le Thi, H. M. Le, T. Ph. Dinh* (2020). 1152. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4>.
2. Tal S. A., Salaimh S. A., Hajiyev N. (2020) Information Technology In Business Process Reengineering. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 29. 7. 3653–3657. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342283185\\_Information\\_Technology\\_In\\_Business\\_Process\\_Reengineering](https://www.researchgate.net/publication/342283185_Information_Technology_In_Business_Process_Reengineering) (accessed: 06.02.2024).
3. Bernus P., Goranson T., Götze J. etc. (2016). Enterprise engineering and management at the crossroads. *Computers in industry* [online]. 79. 87–102. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.010> (accessed: 11.02.2024).
4. Susanto H., Fang-Yie L., Chen C. K. (2019). *Business process reengineering*. Taylor & Francis Group. 248 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429488573>.
5. Beskorovainyi V., Imanhulova Z. (2017). Technology of large-scale objects system optimization. *ECONTECHMOD*. 06(4). 3–8. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/410841> (accessed: 19.09.2023).
6. Beskorovainyi, V., Bezuhla, H., Cholombytko, D. (2022). Mathematical models of the cyclic work package distribution task. *Innovative integrated computer systems in strategic project management*. Riga: ISMA, 7–15.
7. Bezkorovainyi V., Bezuhla H. (2023). Simulation modelling of the process of distribution and execution of work packages. *Information systems in project and program management*. Riga: ISMA, 16–28.
8. Viltard L. A., Viltard L. (2021). Distribution channels (dc) in the technological industry – ideas for improvement in Argentina. *Independent Journal of Management & Production*. 12(4). 874–908. doi: 10.14807/ijmp.v12i4.1340.
9. Wang, L., He, Z., Liu, C., Chen, Q. (2021). Graph



- based twin cost matrices for unbalanced assignment problem with improved ant colony algorithm. *Results in applied mathematics*. 12. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2021.100207> (accessed: 11.02.2024).
10. Barabash, O. V. and Kolumbet, V. P. (2023). Doslidzhennja system masovogo obslugovuvannja na osnovi imitacijnogo modeljuvannja z urahuvannjam mul'tyagentnogo pidhodu. *Infokomunikacijni ta komp'juterni tehnologii* [Research of mass service systems on the base of simulation modeling taking into account the multi-agent approach]. 2(04). 115–121. Retrieved from: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-12> (accessed: 11.02.2024) [in Ukrainian].
  11. Beskorovainyi V., Berezovskyi H. (2017). Estimating the properties of technological systems based on fuzzy sets. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 1(1). 14–20. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>.
  12. Beskorovainyi V. (2017). Parametric synthesis of models for multicriterial estimation of technological systems. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2(2). 5–11. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>.
  13. Bertsekas D. (2024). New auction algorithms for the assignment problem and extensions. *Results in control and optimization*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100383> (accessed: 11.02.2024).
  14. Kelly F., Yudovina E. (2014). Queueing networks. *Stochastic networks*. Cambridge: Cambridge University Press. 22–48. Retrieved from: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139565363.004> (accessed: 11.02.2024).
  15. Newell G. F. (1982). Stochastic models. *Applications of queueing theory*. Dordrecht: Springer Netherlands. Pp. 105–142. Retrieved from: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-5970-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5970-5_4) (accessed: 11.02.2024).
  16. Stochastic models in queueing theory. (2003). Elsevier. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-487462-6.x5000-0> (accessed: 11.02.2024).

**Безкоровайний Володимир Валентинович**, д.т.н., проф., каф. системотехніки, тел.: +38 050-983-03-29, [vladimir.beskorovainyi@nure.ua](mailto:vladimir.beskorovainyi@nure.ua),

**Чоломбитько Дмитро Володимирович**, студент-магістрант, каф. системотехніки, тел. +38 068-602-03-75, [dmytro.cholombytko@nure.ua](mailto:dmytro.cholombytko@nure.ua), Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна.

**Modeling of the process of multi-criteria distribution and execution of work packages in the design of technological systems**

**Abstract. Problem.** Technological systems (TS) that are designed, created and operated are increasingly demanding in terms of their productivity, environmental friendliness and cost-effectiveness. The effectiveness of the TS largely depends on its structure and the optimal distribution of work among performers. Existing mathematical models of assignment problems do not allow correct distribution of the flow of work packages according to multiple quality indicators in conditions of non-deterministic input data. This determined the relevance of the scientific and applied task of developing a model for the cyclical distribution of work packages based on a set of indicators, taking into account the workload of the performers and the incomplete certainty of the process parameters. **Goal.** The goal is to increase the effectiveness of system design technologies of vehicles due to the development of a model of the process of allocation and execution of work packages in the conditions of the stochastic nature of the input flow, multi-criteria decisions, the presence of priorities and prohibitions in the implementation of allocation. **Methodology.** The process of operation of the TS is presented in the form of a mass service system, which includes the phases of distribution of the package of works, execution and aggregation of works. Optimization methods, utility theories, decision-making, schedules, mass service, simulation statistical modeling were used in the development of the model. A modified Hungarian algorithm was used to distribute the work. **Results.** A statement was formulated and a model was developed, which implements an adaptive algorithm for multi-criteria distribution of work and a modeling algorithm for determining the functional characteristics of the process. The ratio for the objective functions of financial, time costs and quality, as well as their additive weighted convolution, is proposed. **Originality.** An analytical-simulation model of multi-criteria distribution and execution of TS work packages has been developed, which takes into account the stochastic nature of incoming flows, their execution time, and the current state of the executors. **Practical value.** The obtained results make it possible to increase the efficiency of structural and technological optimization technologies of TS in the processes of their design, reengineering or management due to the reasonable distribution of work packages taking into account cost, productivity and quality indicators.

**Key words:** technological system, distribution of work, optimization, decision-making, modeling, design.

**Volodymyr Beskorovainyi**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, System Engineering Department, tel.: +38050-983-03-29, [vladimir.beskorovainyi@nure.ua](mailto:vladimir.beskorovainyi@nure.ua),

**Dmytro Cholombytko**, master's student, System Engineering Department, tel.: +38 068-602-03-75, [dmytro.cholombytko@nure.ua](mailto:dmytro.cholombytko@nure.ua), Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave. 14, Kharkiv, 61166, Ukraine.