

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОФАЗНОЇ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗІ ЗЛИТТЯМ ПОТОКІВ: ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА ОЦІНКА ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ВУЗЛІВ

Любименко О. М., Штепа А. О., Маслова Н.О.

*У статті розглянуто побудову та дослідження подієвої імітаційної моделі багатофазної системи масового обслуговування зі злиттям двох вхідних пуассонівських потоків у середовищі Scilab/Xcos. Метою є виявлення режимів стійкості та перевантаження вузлів за різних співвідношень інтенсивностей надходження ( $\lambda$ ) і обслуговування ( $\mu$ ). Методика включає модульне конструювання підсистем «потік–черга–канал», генерування експоненційних міжприходних і сервісних інтервалів, аналіз часових реалізацій довжин черг та порівняння з аналітичним критерієм завантаження ( $\psi$ ). Отримано, що після злиття потоків формуються «вузькі місця», що підтверджено короткими й довгими прогонами; зменшення  $\lambda$  або збільшення  $\mu$  послаблює накопичення. Практична цінність результатів полягає у швидкій діагностиці перевантаження та обґрунтуванні параметричних змін і ресурсних рішень для сервісних та ІТ-систем.*

**Ключові слова:** система масового обслуговування, імітаційне моделювання, Scilab/Xcos, подієва модель, пуассонівський потік, черга, стійкість, вузьке місце.

### Вступ.

Системи масового обслуговування (СМО) є базовими моделями для опису та проектування широкого кола технічних, інформаційних і сервісних процесів, у яких потоки заявок конкурують за обмежені ресурси обслуговування. Для практичних застосувань особливе значення мають багатофазні структури зі злиттям потоків, оскільки саме на спільних етапах обслуговування часто формуються «вузькі місця», що призводить до накопичення черг, зростання затримок і втрати стійкості системи. Аналітичні методи дають можливість отримувати критерії працездатності (наприклад, через коефіцієнт завантаження), однак для складених конфігурацій із подієвою динамікою та взаємодією підсистем суттєво зростає роль імітаційного моделювання як інструмента перевірки та деталізації теоретичних висновків.

Імітаційне моделювання СМО є актуальним тоді, коли аналітичні формули або надто складні, або вимагають жорстких припущень (ідеальні потоки, прості закони розподілу, відсутність пріоритетів тощо). У практичних системах часто присутні кілька вхідних потоків, багатофазне обслуговування,

об'єднання потоків, різні дисципліни черги, обмежені ресурси та часові обмеження. У таких умовах імітація дозволяє оцінити показники якості обслуговування (час очікування, довжину черги, завантаженість каналів, імовірність відмови/затримки), перевірити поведінку системи в різних режимах і сценаріях навантаження та обґрунтувати вибір параметрів (кількість каналів, швидкості обслуговування) та виявити «вузькі місця» ще до впровадження рішення.

У цьому дослідженні розглядається багатофазна СМО з двома незалежними вхідними пуассонівськими потоками, двома первинними вузлами обслуговування та подальшим об'єднанням потоків у спільну двофазну частину системи.

Предметом дослідження є динаміка черг і прояви стійкості/перевантаження у вузлах такої СМО за різних співвідношень інтенсивностей надходження та обслуговування, а також узгодженість результатів імітаційного моделювання з аналітичними оцінками.

Актуальність роботи зумовлена потребою у швидкій діагностиці перевантаження та обґрунтуванні параметричних змін у системах із

паралельними вхідними гілками та спільними етапами обробки (зокрема в ІТ-сервісах, мережних вузлах, виробничих лініях і системах обробки запитів), де помилки у виборі параметрів або ресурсів призводять до нелінійного зростання черг.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

У сучасній літературі з теорії черг базовим інструментарієм для інженерних оцінок залишаються марківські моделі та мережі СМО, що дають аналітичні вирази для стаціонарних характеристик і дозволяють швидко перевірити працездатність вузлів через коефіцієнт завантаження [1]. Водночас сучасний розвиток теорії СМО суттєво підсилюється методами статистичного оцінювання параметрів і станів чергових систем за даними спостережень (у т. ч. за неповних або часткових спостережень), що важливо для практичних задач калібрування моделей та узгодження результатів моделювання із реальними даними. Огляд таких підходів подано в роботі Asanjarani, Nazarathy та Taylor, де систематизовано парадигми оцінювання у СМО та споріднених стохастичних моделях.

Разом з тим, для систем проводять дослідження на стійкість мереж черг через наближення «fluid model / fluid limits», які дозволяють переводити стохастичну задачу в аналіз детермінованих еволюційних рівнянь і перевіряти стійкість для складних політик обслуговування [2]. В роботах [2–3] підкреслюється роль fluid-моделей як інструменту доказу стійкості мереж. Сильна сторона такого напряму – теоретична строгість і застосовність до широких класів мереж. Слабка сторона для інженерної практики – складність реалізації та інтерпретації, особливо коли потрібна «швидка відповідь» для конкретної конфігурації та конкретних параметрів.

У сучасних дослідженнях [4–6] мережі черг розглядають як універсальний інструмент для аналізу й оптимізації багатостадійних систем (логістика, матеріальні потоки, сервісні процеси тощо). Мережі черг активно застосовують для порівняння політик, ідентифікації вузьких місць та постановки задач оптимізації. В роботах [5–8] аналізують послідовні мережі та їх варіації (пріоритети, кілька серверів на етапі тощо), що є близьким до двофазної частини після злиття, тому імітаційне моделювання

вважається стандартним інструментом, коли потрібно відобразити подієву природу системи (прихід/початок обслуговування/завершення/перекидання на наступний вузол), вивчати часові реалізації і перехідні режими та порівнювати сценарії “що буде, якщо...” при варіюванні параметрів [9–10].

Крім того, прикладні симуляційні дослідження, виконані на матеріалі технічних систем, підтверджують універсальність підходу імітаційного аналізу для оцінювання ефекту параметричних змін і вибору раціональних налаштувань системи. Зокрема, у роботі [12] симуляційні методи застосовано для порівняльної оцінки ефективності підвищення точності сенсорної системи, що методологічно узгоджується з задачами оцінювання «режимів» і чутливості до параметрів, характерних і для СМО (варіювання інтенсивностей надходження та обслуговування).

Поряд із подієвим імітаційним моделюванням мереж СМО, альтернативним і взаємодоповнювальним підходом є багаторівневе агентне моделювання, яке дозволяє описувати системи на різних рівнях абстракції та досліджувати emergent-ефекти у взаємодіях компонентів. У роботі [13] показано інструментарій побудови багаторівневих агентних моделей, що доцільно враховувати як суміжну методологію для моделювання складних сервісних та інформаційних систем із неоднорідною структурою потоків та керуючих впливів.

Отже, поєднання аналітичної первинної оцінки з реалізацією в Xcos — це методологічно коректна й сучасна траєкторія: аналітика дає швидку діагностику перевантаження, моделювання — часову картину та уточнення висновків на різних горизонтах.

**Мета.** Побудувати та дослідити імітаційну модель системи масового обслуговування (СМО) у середовищі Scilab/Xcos з використанням подієвого підходу, а також оцінити вплив інтенсивностей надходження заявок та обслуговування, отримати та проаналізувати показники ефективності.

#### **Матеріали та методи.**

Дослідження виконувалося за допомогою імітаційного моделювання системи масового обслуговування (СМО) в

середовищі Scilab/Xcos. Об'єктом моделювання була багатофазна СМО з двома вхідними потоками, двома первинними вузлами обслуговування та подальшим об'єднанням потоків у спільну двофазну частину системи (рис.1).

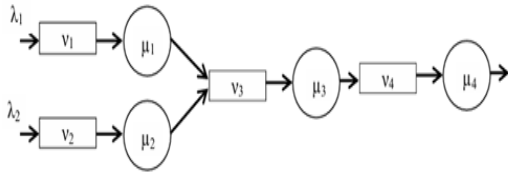


Рис. 1 – Експериментальна СМО

Після обслуговування в каналах  $\mu_1$  та  $\mu_2$  обидва потоки об'єднуються в один сумарний потік, який надходить на наступний етап системи. Сумарний потік надходить у спільну чергу  $V_3$ , далі обслуговується каналом  $\mu_3$ . Після  $\mu_3$  заявки переходять у чергу  $V_4$ , потім обслуговуються каналом  $\mu_4$  і виходять із системи.

Робота складалася з трьох частин: відтворення базових моделей із теоретичних відомостей; складання складнішої СМО відповідно; аналітичний розрахунок характеристик і порівняння з імітаційними результатами.

#### Методи дослідження.

##### 1) Побудова базових модулів СМО

Спочатку було відтворено базові підсистеми, з яких надалі компонувалась складніша СМО: генератор потоку, модель черги та модель обслуговування. Цей етап відповідав вимозі «створити моделі з теоретичних відомостей і дослідити їх».

2) Генерування пуассонівських потоків заявок. Вхідні потоки заявок формувались як пуассонівські (тобто міжприходні інтервали – експоненційні). У Xcos реалізація здійснювалась через ланцюжок Random generator  $\rightarrow$  LOG  $\rightarrow$  перетворення (події між приходами)  $\rightarrow$  Event delay. Застосовано два незалежні генератори з параметрами  $\lambda_1$ , та  $\lambda_2$ .

3) Реалізація черг ( $V_1$ – $V_4$ ). Черги моделювались як дискретний стан, що змінюється подіями: збільшення при надходженні заявки та зменшення при завершенні обслуговування. Для цього застосовано блок збереження стану  $1/z$  і логіку інкремента/декремента за подіями.

4) Реалізація каналів обслуговування ( $\mu_1$ – $\mu_4$ ) і механізму перезапуску. Процес обслуговування будувався для кожного

каналу як генерування часу обслуговування (експоненційний інтервал) і формування події завершення. Додатково реалізовано механізм перезапуску, який активує наступний цикл обслуговування лише тоді, коли в черзі є заявки (тобто, виключає «фіктивні» завершення при порожній черзі).

5) Складніша система була побудована комбінацією простих підмоделей: два первинні вузли (потік–черга–канал) після обслуговування зливаються в один потік, який послідовно проходить ще два вузли обслуговування. Такий підхід прямо відповідає вимозі скласти складнішу СМО з декількох найпростіших моделей (рис.2). Червоні з'єднання у Xcos відповідають подієвим сигналам, а сині/чорні – інформаційним сигналам (значенням стану, довжині черги тощо).

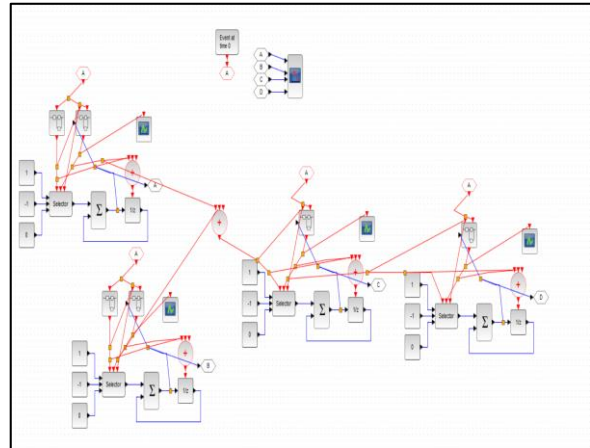


Рис.2 – Імітаційна Xcos-модель СМО зі злиттям двох потоків та двома послідовними фазами обслуговування

Черги  $V_1$ – $V_4$  у моделі реалізовані як дискретний стан  $Q(t)$ , що оновлюється подіями. Типовий підмодуль черги містить суматор ( $\Sigma$ ) і блок пам'яті  $1/z$ :  $\Sigma$  формує зміну черги (інкремент/декремент), а  $1/z$  зберігає поточну довжину черги. Логіка вибору приросту реалізована через Selector і набір констант (1, -1, 0): при надходженні заявки додається +1, при завершенні обслуговування віднімається 1, за відсутності події додається 0. Канали обслуговування  $\mu_1$ – $\mu_4$  реалізують запуск обслуговування лише за умови  $Q(t) > 0$  та вільного каналу. Після старту формується подія завершення обслуговування із затримкою, що відповідає часу обслуговування. Подія завершення одночасно (1) зменшує відповідну чергу та (2) ініціює

подію надходження на наступний вузол (A/B → злиття → C → D → вихід).

Злиття потоків після вузлів 1 і 2 реалізовано об'єднанням подієвих сигналів виходу з  $\mu_1$  та  $\mu_2$  в одну подієву лінію. У результаті вузли 3–4 обслуговують сумарний потік заявок.

б) Налаштування параметрів моделі та запуск симуляції. Під час кожного прогону аналізувалися графіки еволюції черг та робились висновки щодо стабільності або перевантаження системи.

### Результати та їх обговорення.

Початкові умови моделювання: початкова довжина черги 0, усі канали вільні, запис подій увімкнений. Вхідні параметри:  $\lambda_1 = 0.6$ ;  $\lambda_2 = 0.9$ ;  $\mu_1 = 0.63$ ;  $\mu_2 = 0.73$ ;  $\mu_3 = 0.83$ ;  $\mu_4 = 0.93$ . Параметри інтенсивності надходження ( $\lambda = 0.15$ ; 0.20; 0.25; 0.30) та інтенсивності обслуговування ( $\mu = 0.20$ ; 0.25; 0.30.) вводилися як контекстні змінні моделі, після чого виконувалась симуляція для базового набору параметрів, із записом журналів подій та побудовою графіків еволюції черг. Експериментальна частина включала порівняння короткого і довгого прогонів:  $T_{sim}=120$  хв та  $T_{sim}=1440$  хв (для перевірки стабільності оцінок).

Після злиття потоків на вхід вузлів 3–4 надходить сумарний потік:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 = 0.6 + 0.9 = 1.5$$

Для первинної оцінки працездатності та стійкості вузлів використано коефіцієнт завантаження:

$$\psi = \lambda / \mu, \quad (1)$$

де  $\lambda$  — інтенсивність надходження заявок на вузол,  $\mu$  — інтенсивність обслуговування. За критерієм стійкості для вузла з чергою: якщо  $\psi < 1$ , вузол є стійким; якщо  $\psi > 1$ , вузол перевантажений і довжина черги має тенденцію до зростання.

Вузол 1 ( $V_1-\mu_1$ ): Параметри:  $\lambda = 0.6$ ;  $\mu = 0.63$ . Завантаження:  $\psi = 0.6/0.63 = 0.952$ , відповідно  $\psi_1 < 1$ , вузол стійкий, але працює у режимі високого завантаження.

Вузол 2 ( $V_2-\mu_2$ ): параметри:  $\lambda = 0.9$ ;  $\mu = 0.73$ . Завантаження:  $\psi = 0.9/0.73 = 1.23$ , відповідно  $\psi_2 > 1$ , вузол нестійкий; очікується накопичення черги.

Вузол 3 ( $V_3-\mu_3$ ): параметри:  $\lambda = 1.5$ ;  $\mu = 0.83$ . Завантаження:  $\psi = 1.5/0.83 = 1.81$ , відповідно  $\psi_3 > 1$ , вузол сильно перевантажений; черга має зростати без стабілізації.

Вузол 4 ( $V_4-\mu_4$ ): параметри:  $\lambda = 1.5$ ;  $\mu = 0.93$ . Завантаження:  $\psi = 1.5/0.93 = 1.61$ , відповідно  $\psi_4 > 1$ , вузол перевантажений; очікується монотонне зростання черги.

Отже, за аналітичною оцінкою система в цілому є нестійкою для заданих параметрів, оскільки вузли 2–4 працюють у режимі перевантаження ( $\lambda > \mu$ ). Стійкою є лише перша ланка ( $V_1-\mu_1$ ).

Аналіз часових реалізацій черг.

Порівняння виконують за характером часових реалізацій довжин черг. Для вузла зі стійкістю ( $\psi < 1$ ) очікуються коливання черги без довгострокового тренду на необмежене зростання. Для вузлів із  $\psi > 1$  очікується висхідний тренд і накопичення черги. Таким чином, графіки черг  $V_1-V_4$  у моделі мають підтвердити: відносну стабільність вузла 1 та зростання черг у вузлах 2–4 при часовій реалізації довжин черг  $y(t)$  для чотирьох вузлів СМО (0–30 умовних одиниць часу) (рис.3-4).

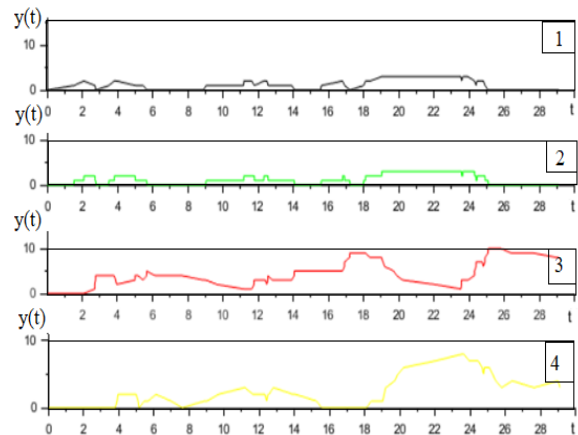


Рис. 3 – Графіки довжин черг ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ , умовно: 1-4) за результатами імітаційного моделювання для короткого прогону.

Узагальнимо серію імітаційних експериментів для багатофазної СМО (рис.3):

1) черга  $V_1$ : значення переважно близькі до нуля, з короткими підйомами на малу величину; є ділянки простою (черга нульова) та невеликі коливання; вузол працює стійко, але із помітним завантаженням (черга інколи формується).

2) черга  $V_2$ : поведінка подібна до  $V_1$ : малі значення, короткі “сходінки” і повернення до нуля, видно повільне накопичення ближче до  $t \approx 20-24$ , але без різкого “вибуху”, проте черга існує, однак зростання не катастрофічне на цьому інтервалі часу.

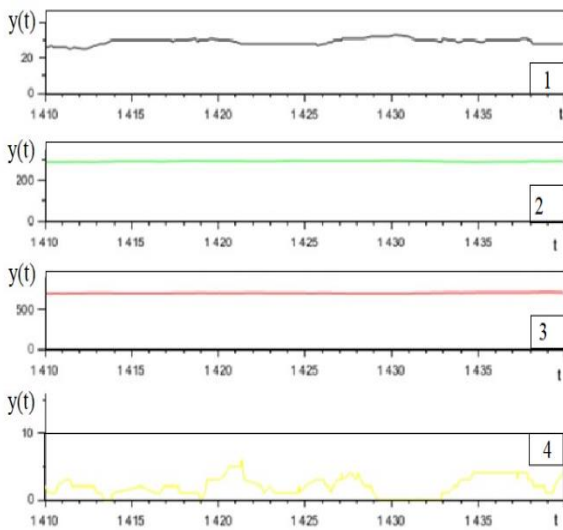


Рис. 4 – Графіки довжин черг ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ , умовно: 1-4) за результатами імітаційного моделювання для довгого прогону.

3) черга  $V_3$ : чітко видно накопичення: черга росте “сходінками”, має помітні максимуми. Є піки приблизно в районі  $t \approx 17-19$  та знову різкий підйом після  $t \approx 24-25$ , до кінця інтервалу черга залишається підвищеною (не повертається до нуля) та вузол після злиття потоків працює у режимі перевантаження, що узгоджується з аналітичним  $\psi_3 > 1$ .

4) черга  $V_4$ : на початку невеликі значення, далі після  $t \approx 19$ , зростання. Максимум приблизно біля  $t \approx 23-24$ , після чого є спад, але черга не “обнуляється” та фінальна фаза також не справляється із сумарним потоком, що відповідає  $\psi_4 > 1$ .

У базовому короткому прогоні ( $T_{sim} = 120$  хв) за параметрів  $\lambda_1 = 0.6$ ;  $\lambda_2 = 0.9$ ;  $\mu_1 = 0.63$ ;  $\mu_2 = 0.73$ ;  $\mu_3 = 0.83$ ;  $\mu_4 = 0.93$  спостерігаються невеликі коливання черги  $V_1$ , водночас для  $V_2$  фіксується тенденція до зростання, а для  $V_3$  та  $V_4$  – стійке накопичення, що підтверджує перевантаження вузлів після злиття потоків.

У базовому довгому прогоні ( $T_{sim} = 1440$  хв) при тих самих параметрах ефект накопичення проявляється виразніше на довшому часовому горизонті, що слугує перевіркою стійкості висновків у часі та підтверджує, що спостережуваний тренд не є випадковим артефактом короткого інтервалу.

Окрема серія експериментів присвячена варіюванню інтенсивності надходження  $\lambda$  у діапазоні (0.15; 0.20; 0.25; 0.30) за фіксованих  $\mu$ . За менших значень  $\lambda$  черги зменшуються або стабілізуються, що інтерпретується як

перехід системи до стійкішого режиму та дає змогу окреслити межі допустимого навантаження. Аналогічно, при варіюванні інтенсивності обслуговування  $\mu$  у діапазоні (0.20; 0.25; 0.30) за фіксованих  $\lambda$  показано, що зі зростанням  $\mu$  накопичення черг послаблюється, тоді як за малих  $\mu$  тенденція до зростання черг посилюється.

Кількісна оцінка показників ефективності.

Для поглиблення аналізу та забезпечення кількісного порівняння режимів роботи досліджуваної системи масового обслуговування доцільно доповнити імітаційні експерименти оцінюванням стандартних показників ефективності СМО, що широко застосовуються у теорії черг і практиці імітаційного моделювання. Такі показники дозволяють не лише якісно зафіксувати факт перевантаження, а й кількісно оцінити його масштаб.

На основі журналів подій та часових реалізацій довжин черг для кожного вузла  $V_i$  можуть бути визначені:

$$V_{ci} = \frac{1}{T} \int_0^T V_i(t) dt,$$

де  $V_{ci}$  — середня довжина черги у вузлі  $i$ ,

$V_i(t)$  - поточна довжина черги,

$T$  — тривалість симуляції.

Середній час очікування заявки у черзі оцінюється за формулою Літтла:

$$W_{ci} = \frac{V_{ci}}{\lambda_i}$$

де  $\lambda_i$  — ефективна інтенсивність надходження заявок на відповідний вузол.

Додатково визначається середній коефіцієнт завантаження каналу обслуговування, що обчислюється як відношення сумарного часу обслуговування до загальної тривалості симуляції, а також пропускна здатність вузла, яка характеризує середню кількість заявок, обслугованих за одиницю часу.

Порівняння значень  $V_{ci}$ ,  $W_{ci}$  та коефіцієнтів завантаження для короткого ( $T_{sim} = 120$  хв) і довгого ( $T_{sim} = 1440$  хв) прогонів дозволяє кількісно підтвердити спостережувані на графіках тенденції. Для вузлів із коефіцієнтом завантаження  $\psi < 1$  середні значення стабілізуються зі збільшенням часу моделювання, тоді як для вузлів із  $\psi > 1$  середні довжини черг і часи очікування зростають, що свідчить про втрату стійкості системи. В Таблиці 1 наведено

результати імітаційного моделювання для  
 $T_{sim}=1440$  хв.

Таблиця 1 – Кількісні показники ефективності вузлів СМО

Показник	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
$\lambda_i$	0.60	0.90	1.50	1.50
$\mu_i$	0.63	0.73	0.83	0.93
$\psi$	0.95	1.23	1.81	1.61
$V_{C_i}$	0.42	2.85	9.60	6.75
$W_i$ , хв	0.70	3.17	6.40	4.50
Завантаження каналу	0.93	0.99	$\approx 1.00$	$\approx 1.00$

Середні довжини черг  $V_{C_i}$  та середні часи очікування  $W_{C_i}$  отримано шляхом усереднення часових реалізацій за довгого прогону симуляції. Для вузла  $V_1$  із коефіцієнтом завантаження  $\psi < 1$  спостерігається стабілізація середніх значень, що узгоджується з обмеженими коливаннями черги на графіках. Для вузлів  $V_2-V_4$ , де  $\psi > 1$ , середні довжини черг і часи очікування істотно зростають, що кількісно підтверджує втрату стійкості системи після злиття потоків. Найбільші значення  $V_{C_i}$  та  $W_{C_i}$  спостерігаються у вузлі  $V_3$ , який формує основне «вузьке місце» системи.

Таким чином, використання кількісних показників ефективності доповнює якісний аналіз часових реалізацій, підвищує інтерпретованість результатів і створює основу для обґрунтованого порівняння альтернативних конфігурацій СМО та прийняття інженерних рішень щодо зміни інтенсивностей надходження  $\lambda$ , обслуговування  $\mu$  або структури системи.

Система переходить у стійкий режим за виконання умов  $\lambda_1 < \mu_1$ ,  $\lambda_2 < \mu_2$  та  $\lambda_1 + \lambda_2 < \min(\mu_3, \mu_4)$ ; для базових параметрів  $\mu_1=0.63$ ,  $\mu_2=0.73$ ,  $\mu_3=0.83$ ,  $\mu_4=0.93$ , це задає область  $\lambda_1 < 0.63$ ,  $\lambda_2 < 0.73$ ,  $\lambda_1 + \lambda_2 < 0.83$ .

Отримані результати узгоджено вказують, що досліджувана СМО для заданих параметрів є нестійкою, а основне «вузьке місце» формується після злиття потоків, де сумарне навантаження перевищує можливості обслуговування. Практично це означає, що навіть за відносно прийнятної роботи окремих паралельних гілок на вході, система в цілому втрачає стійкість через недостатню пропускну здатність спільних стадій. Серії експериментів

із варіюванням параметрів підтверджують керованість ситуації: зменшення інтенсивності надходження  $\lambda$  або збільшення інтенсивності обслуговування  $\mu$  та  $\psi$ , відповідно, послаблює (або усуває) тенденцію до накопичення черг.

**Висновки.** У межах роботи побудовано імітаційну подієву модель СМО у Scilab/Xcos, що включає два вхідні пуассонівські потоки, дві первинні черги з окремими каналами обслуговування та дві послідовні фази після об'єднання потоків. Проведення серії експериментів зі зміною  $\lambda$  та  $\mu$  дозволяє встановити режими стійкої роботи, виявити критичні сценарії перевантаження і визначити елементи системи, які формують основні затримки. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів СМО та прийняття інженерних рішень щодо оптимізації ресурсів. Результати імітаційного моделювання якісно підтвердили аналітичні висновки: у вузлах після злиття спостерігається накопичення черг, тоді як на першій ланці — обмежені коливання.

Наукове значення результатів полягає у верифікації імітаційної моделі аналітичними оцінками та демонстрації ролі «вузьких місць» у багатофазних СМО зі злиттям потоків.

Практичне значення – у можливості використання підходу для швидкої діагностики перевантаження та обґрунтування параметричних змін (зменшення  $\lambda$ , збільшення  $\mu$ , додавання каналів обслуговування) в інженерних та ІТ-системах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання показників (середні довжини черг, затримки, пропускну здатність із довірчими інтервалами), а також на пошук умов стабілізації системи шляхом оптимізації параметрів  $\lambda$  і  $\mu$  та аналізу впливу інших законів розподілу й нестационарних потоків. Доцільно розширити кількісний аналіз шляхом побудови узагальнених таблиць показників ефективності та довірчих інтервалів для середніх довжин черг, часів очікування і пропускну здатності вузлів, що дозволить виконувати статистично обґрунтоване порівняння альтернативних конфігурацій системи та параметричних сценаріїв.

### Література

- [1] J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
- [2] Asanjarani A., Nazarathy Y., Taylor P. A survey of parameter and state estimation in queues // *Queueing Systems: Theory and Applications*. – 2021. – Vol. 97, № 1. – P. 39–80. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-021-09688-W>.
- [3] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [4] A. M. Law, “Statistical analysis of simulation output data: the practical state of the art,” in *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC 2015)*, Huntington Beach, CA, USA, Dec. 6–9, 2015. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, pp. 1810–1819.
- [5] M. Amjath, L. Kerbache, A. Elomri, and J. M. Smith, “Queueing network models for the analysis and optimisation of material handling systems: a systematic literature review,” *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 668–709, 2024, doi: 10.1007/s10696-023-09505-x.
- [6] S. A. Dudin, O. S. Dudina, and A. N. Dudin, “Analysis of Tandem Queue with Multi-Server Stages and Group Service at the Second Stage,” *Axioms*, vol. 13, no. 4, Art. no. 214, 2024, doi: 10.3390/axioms13040214.
- [7] A. Guiguet and D. Pons, “A Validation Framework for Bulk Distribution Logistics Simulation Models,” *Logistics*, vol. 9, no. 1, Art. no. 3, 2025, doi: 10.3390/logistics9010003.
- [8] S. Parisay, “Improving Verification Skills for a Discrete-Event Simulation Model,” in *Proceedings of the 2024 ASEE Annual Conference*, Portland, OR, USA, Jun. 23–26, 2024.
- [9] A. Alshareef and H. S. Sarjoughian, “Simulation, Model Checking, and Execution of Activity Models,” *arXiv preprint arXiv:2105.11851*, 2021.
- [10] S. Arora and M. V. P. Rao, “Probabilistic Model Checking of Incomplete Models,” *arXiv preprint arXiv:1706.05082*, 2017.
- [11] Scilab, “EVTDLY\_c — Event delay,” *Scilab Online Help* [Online]. Available: [https://help.scilab.org/EVTDLY\\_c](https://help.scilab.org/EVTDLY_c).
- [12] Штепа О. А., Любименко О. М. Оцінка ефективності методів підвищення точності сенсора якості повітря MQ-135 // *Simulation and Modelling: Problems, Solutions and Applications* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – 2024. – С.64-68
- [13] Yezhova Y., Maslova N. Using AgentScript to produce multi-level agent-based modelling models // *Scientific Papers of Donetsk National Technical University*. – 2024. – Vol. 2, No. 3 (35). – Art. 319553. – DOI: [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3\(35\).319553](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3(35).319553)

### References

- [1] J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
- [2] Asanjarani A., Nazarathy Y., Taylor P. A survey of parameter and state estimation in queues // *Queueing Systems: Theory and Applications*. – 2021. – Vol. 97, № 1. – P. 39–80. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-021-09688-W>.
- [3] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [4] A. M. Law, “Statistical analysis of simulation output data: the practical state of the art,” in *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC 2015)*, Huntington Beach, CA, USA, Dec. 6–9, 2015. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, pp. 1810–1819.
- [5] M. Amjath, L. Kerbache, A. Elomri, and J. M. Smith, “Queueing network models for the analysis and optimisation of material handling systems: a systematic literature review,” *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 668–709, 2024, doi: 10.1007/s10696-023-09505-x.
- [6] S. A. Dudin, O. S. Dudina, and A. N. Dudin, “Analysis of Tandem Queue with Multi-Server Stages and Group Service at the Second Stage,” *Axioms*, vol. 13, no. 4, Art. no. 214, 2024, doi: 10.3390/axioms13040214.
- [7] A. Guiguet and D. Pons, “A Validation Framework for Bulk Distribution Logistics Simulation Models,” *Logistics*, vol. 9, no. 1, Art. no. 3, 2025, doi: 10.3390/logistics9010003.

- [8] S. Parisay, “Improving Verification Skills for a Discrete-Event Simulation Model,” in *Proceedings of the 2024 ASEE Annual Conference*, Portland, OR, USA, Jun. 23–26, 2024.
- [9] A. Alshareef and H. S. Sarjoughian, “Simulation, Model Checking, and Execution of Activity Models,” *arXiv preprint arXiv:2105.11851*, 2021.
- [10] S. Arora and M. V. P. Rao, “Probabilistic Model Checking of Incomplete Models,” *arXiv preprint arXiv:1706.05082*, 2017.
- [11] Scilab, “EVTDLY\_c — Event delay,” *Scilab Online Help* [Online]. Available: [https://help.scilab.org/EVTDLY\\_c](https://help.scilab.org/EVTDLY_c).
- [12] Shtepa O. A., Lyubymenko O. M. Otsinka efektyvnosti metodiv pidvyshchennya tochnosti sensora yakosti povitrya MQ-135 // *Simulation and Modelling: Problems, Solutions and Applications : materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf.* – 2024. – S.64-68
- [13] Yezhova Y., Maslova N. Using AgentScript to produce multi-level agent-based modelling models // *Scientific Papers of Donetsk National Technical University.* – 2024. – Vol. 2, No. 3 (35). – Art. 319553. – DOI: [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3\(35\).319553](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3(35).319553)

Надійшла до редакції 05.01.2026 р.

**Любименко Олена Миколаївна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Донецький національний технічний університет (вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська область, 82100, Україна). E-mail: [olena.liubymenko@donntu.edu.ua](mailto:olena.liubymenko@donntu.edu.ua)

**Штепа Олександр Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний технічний університет (п вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська область, 82100, Україна л. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна). E-mail: [oleksandr.shtepa@donntu.edu.ua](mailto:oleksandr.shtepa@donntu.edu.ua)

**Маслова Наталія Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний технічний університет (вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська область, 82100, Україна), Львівський державний університет безпеки життєдіяльності (вул. Клепарівська, 35, Львів, 79007, Україна). E-mail: [nataliia.maslova@donntu.edu.ua](mailto:nataliia.maslova@donntu.edu.ua)

## SYSTEM ANALYSIS OF A MULTIPHASE QUEUEING SYSTEM WITH FLOW MERGING: SIMULATION MODEL AND NODE OVERLOAD ASSESSMENT

*The article presents an event-based simulation model of a multiphase queueing system with the merging of two independent incoming streams of requests, implemented in the Scilab/Xcos environment. The aim of the study is to identify stable operating regimes and node overload scenarios in a system with two primary service channels and two consecutive phases after flow merging, as well as to reconcile simulation results with analytical criteria of queueing theory. The methodology is based on modular synthesis of the subsystems “flow generator – queue – channel”, where incoming streams are modeled as Poisson processes (with exponential interarrival times) and service times follow an exponential distribution. Queues  $V_1$ – $V_4$  are represented as discrete states  $Q(t)$ , updated by arrival and service completion events; a service restart mechanism is implemented to prevent fictitious completions when the queue is empty and to ensure correct event logic. For each simulation run, event logging and analysis of queue-length time realizations were carried out, and short ( $T_{sim} = 120$  min) and long ( $T_{sim} = 1440$  min) simulation horizons were compared to verify the stability of the conclusions. The initial assessment of node performance was based on the load factor  $\psi = \lambda/\mu$  and the stability criterion  $\psi < 1$ . The results show that under the basic parameter set, limited queue fluctuations without a long-term trend are observed in the primary branch  $V_1$ – $\mu_1$ , whereas after flow merging a bottleneck is formed: in nodes  $V_3$ – $\mu_3$  and  $V_4$ – $\mu_4$ , a stable accumulation of requests occurs, which increases with higher total arrival intensity and decreases with higher service intensity. A series of experiments with varying  $\lambda$  and  $\mu$  made it possible to outline permissible load regions and demonstrate regime controllability: decreasing  $\lambda$  or increasing  $\mu$  shifts the system toward a more stable state. The scientific novelty lies in verifying the Xcos simulation model by analytical estimates and explaining the mechanism of overload formation in shared phases after flow merging based on time realizations. The practical significance of the results consists in enabling rapid overload diagnostics and substantiating parametric and resource decisions (adjusting  $\lambda$ ,  $\mu$ , or adding service channels) for information and service systems.*

**Keywords:** queuing system, simulation modeling, Scilab/Xcos, event-based model, Poisson flow, queue, stability, bottleneck.

**Liubymenko Olena Mykolaivna** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University (str. Sambirska, 76, Drohobych, Lviv region, 82100, Ukraine).

E-mail: olena.liubymenko@donntu.edu.ua

**Stepa Oleksandr Anatoliiovych** - candidate of technical sciences, associate professor, Donetsk National Technical University (str. Sambirska, 76, Drohobych, Lviv region, 82100, Ukraine).

E-mail: oleksandr.shtepa@donntu.edu.ua

**Maslova Nataliya Oleksandrivna** - candidate of technical sciences, associate professor, Donetsk National Technical University (str. Sambirska, 76, Drohobych, Lviv region, 82100, Ukraine), Lviv State University of Life Safety( 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine)

E-mail: nataliia.maslova@donntu.edu.ua