

І.О. Калініна, О.П. Гожий, В.В. Нечахін, С.І. Шиян

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ
ЗІ СКЛАДНИМ СТОХАСТИЧНИМ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДАНИХ
ЗА ДОПОМОГОЮ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ**

Анотація. В статті розглядається процес побудови імітаційних моделей систем з стохастичним процесом обробки даних на основі кольорових мереж Петрі. Представлено формальний опис моделей на основі кольорових мереж Петрі. Для імітаційного моделювання задач обробки даних обґрунтовано використання часових мереж Петрі, що дозволяє визначити і детально описати часові проміжки процесу, який моделюється. Приведено алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі. Визначено особливості застосування часових мереж Петрі при побудові імітаційних моделей зі складними стохастичними процесами обробки даних. Для завдання випадкових величин використані спеціальні функції. Наведено перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів. В якості прикладу розглянуто побудова імітаційної моделі процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Модель була побудована в середовищі CPN Tools. Визначені та досліджені параметри системи, змінні, функції та параметри моделі. Для накопичення статистики про результати роботи моделей було застосовано метод накопичення інформації в позиціях. Представлено аналіз результатів імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми.

Ключові слова: Моделювання, імітаційна модель, кольорові мережі Петрі, стохастичний процес, CPN Tools, центр обробки заявок.

Вступ

Моделювання систем є найбільш ефективним способом дослідження складних систем різного призначення, – технічних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних, на різних етапах їх життєвого циклу, проектування, а також в процесі експлуатації [1]. Сучасні технології моделювання не тільки значно полегшили і прискорили процес побудови та дослідження моделей складних систем, але й значно підвищили ефективність моделювання. Можливості систем моделювання постійно розширюються, тому що постійно з'являються найновіші методи та технології моделювання. Це сприяє, широко-

му розповсюдженню різноманітних методів та підходів моделювання. Потреба у розв'язанні задач моделювання систем виникає не тільки у дослідників та науковців, але й у проектувальників та виробників під час проектування та моделювання складних систем. Математичні моделі та методи моделювання використовуються при створенні інформаційних систем різного типу: систем прийняття рішень, систем автоматизованого керування, систем штучного інтелекту та інш..

Одним з сучасних методів побудови моделей складних систем є візуальне моделювання на основі кольорових мереж Петрі. Використання мереж Петрі, як інструмента графічного і математичного моделювання складних систем та процесів останнім часом отримало широке розповсюдження. Мережа Петрі (PN) це орієнтований дводольний граф з двома типами вузлів: позиціями (представлені колами), та переходами (представлені прямокутниками). Позиції в мережах Петрі містять довільну кількість маркерів (*токенів*). Розподіл маркерів над місцями називається *маркуванням*. Існують різні типи мереж Петрі: стохастичні мережі Петрі (SPN), часові мережі Петрі (TPN), кольорові мережі Петрі (CPN), нечіткі мережі Петрі та інші [2-5].

Кольорові мережі Петрі є одним з ефективних інструментів імітаційного моделювання. Кольори призначені для врахування змінних різних типів. Таким чином при моделюванні можливо враховувати особливості даних різних дискретних систем. В поєднанні з можливостями імітаційного моделювання кольорові мережі Петрі надають потужний інструмент для дослідження складних дискретних систем.

Постановка проблеми

Метою даної роботи є дослідження процесу імітаційного моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних за допомогою кольорових мереж Петрі.

Аналіз останніх досліджень

Застосування мереж Петрі, як інструмента графічного і математичного моделювання складних систем та процесів засновано на використанні орієнтованого дводольного графу з двома типами вузлів: позиціями та переходами. Дуги графа з'єднують позиції і переходи таким чином, що позиції можуть бути пов'язані тільки з переходами і навпаки. Позиції в мережі Петрі можуть містити дискретне число маркерів. Розподіл маркерів над місцями називається *маркуванням* [6]. Спочатку мережі Петрі служили для опису паралельних систем з точки зору причинно-наслідкових зв'язків без обліку часу [7]. Потім розвиток

теорії мереж Петрі дозволив розширити та доповнити формальний апарат мереж Петрі часовими концепціями [8]. Для моделювання складних систем та процесів різної природи використовуються різні модифікації [9-11]. В роботах [12-14] мережі Петрі різних типів були використані для побудови систем різного призначення. Задача моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних є актуальною, тому що велика кількість складних технічних систем обробляють стохастичні дані і потребують коректного представлення та моделювання. Для вирішення задач розробки імітаційних моделей із складним процесом обробки даних необхідно розробити метод побудови моделей на основі кольорових мереж Петрі [15-17].

Результати дослідження та їх обговорення

При побудові імітаційних моделей для систем з складним стохастичним процесом обробки заявок доцільно використовувати кольорові мережі Петрі.

Модель на основі кольорової мережі Петрі має наступний вигляд:

$$PN_{col} = \{S, T, F, M_0, Type, Type(T, Type(" M, In\}$$

де $S = \{S_1, S_2, \dots, S_g\}$ – множина станів; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_v\}$ – множина переходів; F – множина дуг, яка включає підмножини вхідних та вихідних дуг по відношенню до переходу; M_0 – множина, в якій задається початкове маркування мережі Петрі, $Type$ – множина типів даних; $Type_T$ – множина, яка відображає доступну множину типів даних у позиціях мережі; $Type_M$ – множина типів маркерів, що ініціюють перехід; In – множина умов ініціації переходів.

Для моделювання задач обробки даних також можливе використання часових мереж Петрі, що є вдосконаленням мережі Петрі і пов'язано з додаванням до кожного з переходів інформації про часові межі. Це дозволяє визначити і детально описати часові проміжки процесу, який моделюється. Часова мережа описується за допомогою наступного виразу:

$$N_{time} = \{S, T, F, Eft, Lft, M_0\},$$

де Eft, Lft – функції, що ставляться у відповідність кожному з переходів і визначають нижню (Eft) та верхню (Lft) часові межі, які задовольняють наступним умовам: $Eft \leq Lft$. Модель, яка враховує пріоритети, включає множину пріоритетів для кожного з переходів і має наступний вигляд:

$$PN_{pr}(time) = \{S, T, F, Eft, Lft, PR, M_0\},$$

де $PR = \{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_v\}$ – множина пріоритетів, а Pr_{1-v} – величини пріоритетів.

Алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі складається з наступних кроків:

1. Визначається множина станів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_g\}$, та множина переходів $T = \{t_1, t_2, \dots, t_v\}$, які відповідають процесу, що моделюється.
2. Визначається F , та задається початкове маркування мережі M_0 .
3. Визначаються можливі зміни ситуації, та відображаються у $Type_T$ множині типів у позиціях мережі.
4. Визначаються маркери, які ініціюють переходи, і умови ініціалізації переходів In (часові).
5. Остаточна формується структура мережі.

На основі кольорових мереж Петрі доцільно розробляти імітаційні моделі нелінійних та нестационарних процесів генерації та обробки даних, приймати рішення на підставі моделювання, а також перевіряти результати моделювання.

При побудові моделей реальних систем потрібно дослідження динаміки процесу і визначення часових характеристик роботи моделі. Реальні процеси розвиваються в часі, тому і математичний апарат, призначений для їх моделювання, повинен мати можливість подання подій у часі. Тому моделі, що описує тільки внутрішню структуру та логіку, часто буває недостатньо. Для моделювання процесів у часі, мережі Петрі розширюються введенням часових міток в маркерах. Часова мітка показує, з якого моменту часу маркер буде доступний в позиції. При визначенні активності переходів в часовій мережі Петрі враховуються тільки ті маркери, у яких значення часу менше або дорівнює поточному часу моделі [1].

При побудові моделі реальної системи часові інтервали не завжди можуть бути представлені у вигляді певного числа, замість цього в моделях час майже завжди задається в вигляді випадкової величини, що розподілена по деякому закону. Для завдання випадкових величин можуть бути використані спеціальні функції. Перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів представлений в таблиці 1.

Приклад. Необхідно побудувати модель, що дозволяє аналізувати роботу центру обробки заявок комерційної фірми з багатоканальним зв'язком. Існує багатоканальний телефонний номер, на який надходять дзвінки користувачів з питаннями. Так як дзвінків багато, деяким користувачам доводиться чекати, поки один з операторів звільниться. Користувачі розділені на групи за пріоритетами (N груп), для кожної групи реалізована окрема черга. У центрі обробки заявок працюють кілька операторів (M людей). Вільний оператор повинен вибрати користувача з найбільшим пріоритетом у черзі. Кожен користувач зверта-

ється в центр обробки заявок з однією з K проблем. Кожній проблемі відповідає час, за яке оператор може знайти рішення $KMin$ і $KMax$ для рівномірного розподілу часу відповіді та KN і KV для нормально розподіленого часу відповіді. У разі, якщо кількість користувачів, які одночасно очікують дзвінка, досягло величини $UMax$, то всім наступним користувачам буде відмовлено в обробці заявок [1].

Змодельовати роботу центру обробки заявок комерційної фірми з обслуговування 1000 клієнтів. Можлива структура моделі представлена на рисунку 1.

Таблиця 1

Функції CPN ML для генерації випадкових величин

Функція зі списком параметрів	Опис функції
$bernoulli(p:real) : int$	Розподіл Бернуллі. Діапазон допустимих значень для параметра p : $0.0 \leq p \leq 1.0$. Тип значення, що повертається ціле число, зазначений в оголошенні функції після двокрапки. У цій та інших функціях, в разі виходу значень параметра за межі допустимих границь буде згенеровано виняток та моделювання припиниться.
$binomial(n:int, p:real) : int$	Біноміальний розподіл. Діапазон значень параметрів: $n \geq 1$ та $0.0 \leq p \leq 1.0$
$chisq(n:int) : real$	Розподіл ксі-квадрат. Діапазон значень параметра: $n \geq 1$.
$discrete(a:int, b:int) : int$	Дискретний рівномірний розподіл. Параметр a менше або дорівнює параметру b , $a \leq b$.
$erlang(n:int, r:real) : real$	Гамма розподіл з цілим параметром n (розподіл Ерланга). Діапазон значень параметрів: $n \geq 1$ та $r > 0.0$
$exponential(r:real) : real$	Експоненціальне розподіл. Діапазон значень параметра $r > 0.0$
$normal(n:real, v:real) : real$	Нормальний розподіл. Діапазон значень параметра $v \geq 0.0$
$poisson(m:real) : int$	Розподіл Пуассона. Діапазон значень параметра $m > 0.0$
$student(n:int) : real$	Розподіл Стюдента. Діапазон значень параметра $n \geq 1$.

$uniform(a:real, b:real) : real$	Рівномірний розподіл. Параметр a менше або дорівнює параметру b , $a \leq b$.
$rayleigh(s:real) : real$	Розподіл Рейлі. Діапазон значень параметра $s \geq 0.0$
$gamma(l:real, k:real) : real$	Гамма розподіл. Діапазон значень параметрів $l, k \geq 0.0$
$beta(a:real, b:real) : real$	Бета розподіл. Діапазон значень параметрів $a, b \geq 0.0$

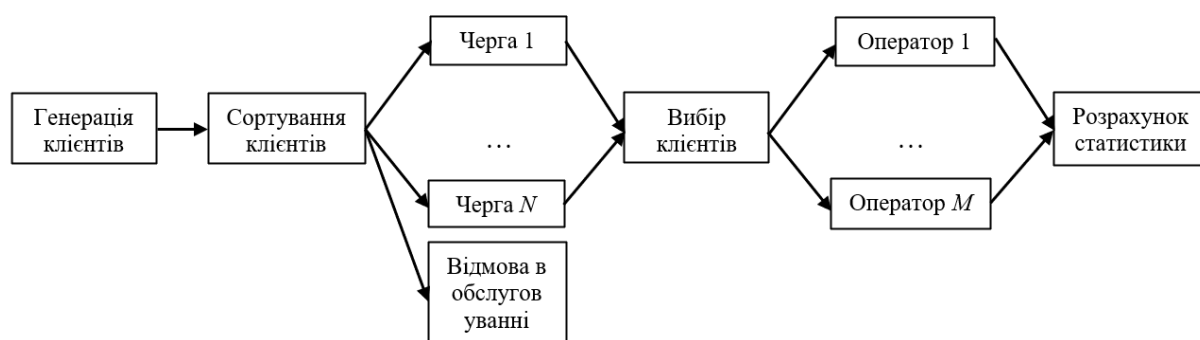


Рисунок 1 – Схема моделі

Побудова моделі. Загальна модель процесу роботи центру обробки заявок має 7 функціональних блоків (див. рис. 2). Блок генерації клієнтів представлено 4 позиціями (*Group* – має набір міток, що вказують групи клієнтів за пріоритетами (N груп); *Problem* – містить мітки, що вказують на проблеми (K), з якими звертаються клієнти; *MaxGen* містить загальну кількість клієнтів, яка обслуговується в процесі моделювання; *GenDelay* – необхідна для формування часової мітки при кожному зверненні «нового» клієнта) та переходом *Generate*, якій безпосереднє виконує функцію генерації клієнтів. Блок сортування клієнтів представлено позицією *Client*, в яку потрапляє інформація про поточного клієнта, та 2 переходами *SortQ1*, *SortQ2*, які сортують клієнтів по пріоритетах. Відсортовані клієнти накопичуються в чергах – це позиції *Queue1*, *Queue2*. Контроль за кількістю надходження клієнтів виконується за допомогою позиції *SumQ*. Блок відбору клієнтів з черг до операторів представлено 2 переходами *GetCQ1*, *GetCQ2* та 2 позиціями *PriorClient*, *Limit*, в яких потрапляє інформація про поточного клієнта з черг та контролюється кількість надходження клієнтів до операторів для обслуговування. Затримка на час обслуговування кожним оператором моделюється за допомогою переходів *Op(i)* та *Exit(i)*, які починають та закінчують процес обслуговування, та 3 позиціями: *TimeO(i)* – містить часові мітки про час обслуговування, *Op(i)* – містить запис інформації про клієнта.

ента, $LimitO(i)$ – контролює обслуговування оператором по одному клієнту за раз, де $i = \overline{1,5}$. Розрахунок статистики виконується переходами *Prior1*, *Prior2*. Попередньо в позицію *Statistics* потрапляє інформація про поточного клієнта, якій був обслуговано одним з операторів. Результати по кількості клієнтів по пріоритетах (по групам) збираються в позиції *NumP1*, *NumP2*. Загальний час обслуговування клієнтів кожної групи накопичується в позиціях *TimeSumP1*, *TimeSumP2*. Середній час обслуговування клієнтів кожної групи накопичується в позиціях *AvrTimeP1*, *AvrTimeP2*. Загальна кількість усіх клієнтів, яких обслуговано збирається в позиції *TotalNum*.

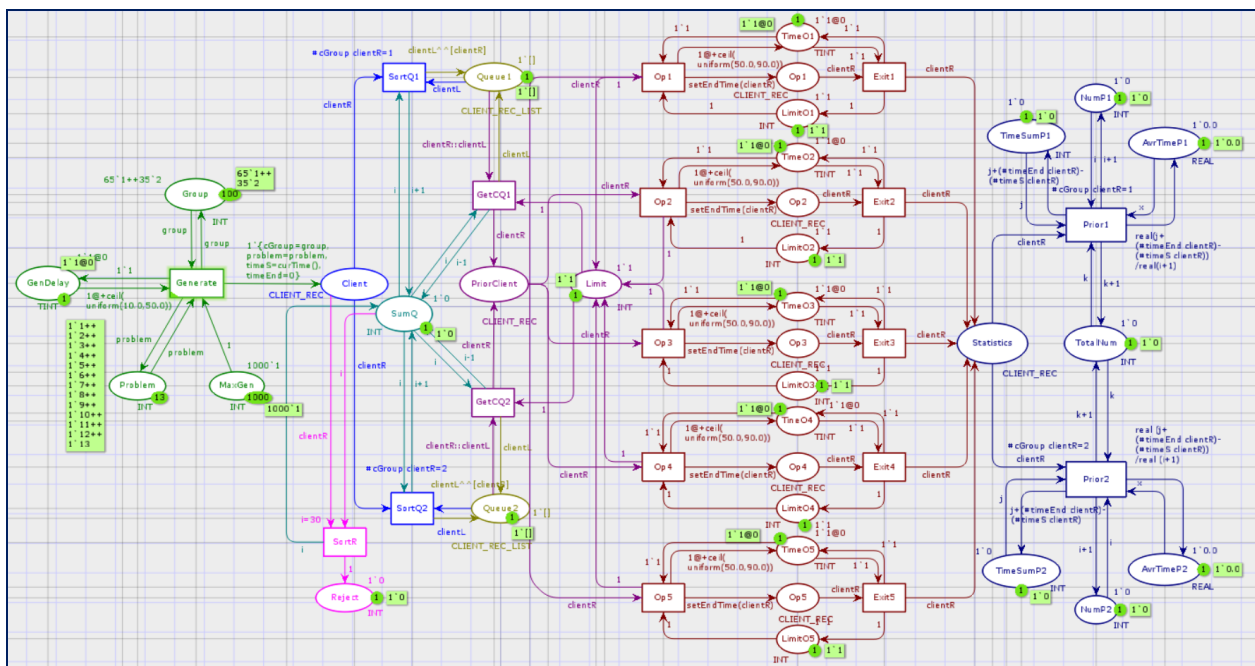


Рисунок 2 – Імітаційна модель процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми

Завдання декларації системи. Визначаються параметри системи, яка моделюється. Для кольорових мереж Петрі, це *множина кольорів системи (colorset)*, які мають наступні значення:

- фішки типу *TINT* – визначають множину цілих чисел з часовими мітками;
- кортеж *CLIENT_REC* має 4 ціле чисельні поля, які відповідають за *cGroup* – тип групи клієнта за пріоритетом, *problem* – тип проблеми, з якою звернувся клієнт, *timeS*, *timeEnd* – модельні часи початку та закінчення обслуговування клієнта;

- фішки типу *CLIENT_REC_LIST* – це список інформації про клієнтів центру обробки заявок.

Змінні моделі:

- *group* – визначає значення групи, до якої відноситься клієнт;
- *problem* – визначає номер проблеми, з якою звертається клієнт;
- *clientR* – визначає повну інформацію про клієнта.
- *clientL* – визначає надходження інформації про клієнта в чергу;
- *i, j, k* – визначають значення ціле чисельних змінних;
- *x* – визначає значення дійсної змінної.

Визначимо функції системи:

- функція *curTime()* необхідна в моделі для здобуття поточного значення модельного часу;
- функція *setEndTime()* розраховує час закінчення обслуговування клієнта і формує повний пакет запису інформації про поточного клієнта.

Після визначення основних декларацій системи задаються параметри моделі на графах мережі. На модельному аркуші представлено загальні параметри моделі (див. рис. 2):

- у позиції *Group* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування $65 \cdot 1 \div 35 \cdot 2$ визначає відсоткове відношення між двома групами клієнтів (кількість груп в прикладі $N=2$);
- у позиції *Problem* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування $1 \cdot 1 \div 1 \cdot 2 \div 1 \cdot 3 \div 1 \cdot 4 \div 1 \cdot 5 \div 1 \cdot 6 \div 1 \cdot 7 \div 1 \cdot 8 \div 1 \cdot 9 \div 1 \cdot 10 \div 1 \cdot 11 \div 1 \cdot 12 \div 1 \cdot 13$ встановлює нумерацію проблем, з якими звертається клієнт;
- у позиції *MaxGen* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування $1000 \cdot 1$ визначає максимальну кількість клієнтів для обслуговування в процесі моделювання;
- у позиціях *GenDelay*, *TimeO1*, *TimeO2*, *TimeO3*, *TimeO4*, *Time5* множина кольорів фішок – *TINT*; початкове маркування $1 \cdot 1 @ 0$ встановлює часові мітки;
- у позиціях *Client*, *PriorClient*, *Op1*, *Op2*, *Op3*, *Op4*, *Op5*, *Statistics* множина кольорів фішок – *CLIENT_REC*;
- у позиціях *Queue1*, *Queue2* множина кольорів фішок – *CLIENT_REC_LIST*; початкове маркування $1 \cdot []$ визначає, що спочатку моделювання черги порожні;
- у позиціях *LimitO1*, *LimitO2*, *LimitO3*, *LimitO4*, *LimitO5*, *Limit*, *NumP1*, *NumP2*, *TimeSumP1*, *TimeSumP2*, *TotalNum*, *SumQ*, *Reject* множина кольорів фішок – *INT*;
- у позиціях *AvrTimeP1*, *AvrTimeP2* множина кольорів фішок – *REAL*;

- на дузі від позиції *GenDelay* до переходу *Generate* вираз $1@+ceil(uniform(10.0,50.0))$ формує значення модельного часу звертання клієнта, як округлене до найближчого цілого в більшу сторону значенні випадкової величини рівномірно розподіленої на проміжку [10, 50];
- на дузі від переходу *Generate* до позиції *Client* вираз $1\{cGroup=group, problem=problem, imeS=curTime(),timeEnd=0\}$ формує набір даних про «нового» клієнта;
- на дугах від переходу *SortQ1* до позиції *Queue1* та від переходу *SortQ2* до позиції *Queue2* вираз $clientL \wedge [clientR]$ задає надходження заявок в черги;
- на дугах від позиції *Queue1* до переходу *SortQ1* та від позиції *Queue2* до переходу *SortQ2* вираз $clientL$ задає зворотній зв'язок;
- на дугах від позиції *Queue1* до переходу *GetCQ1* та від позиції *Queue2* до переходу *GetCQ2* вираз $clientR:: clientL$ визначає, що блок вибору клієнта може почати обробку заявки, якщо в чергах є хоча б один клієнт;
- на дугах від переходу *GetCQ1* до позиції *Queue1* та від переходу *GetCQ2* до позиції *Queue2* вираз $clientL$ повертає в черги списки клієнтів;
- на дугах від переходів $Op(i)$ до позицій $TimeO(i)$ (де $i = \overline{1,5}$) вираз $1@+ceil(uniform(50.0,90.0))$ формує значення модельного часу обслуговування клієнта i -м оператором, як округлене до найближчого цілого в більшу сторону значенні випадкової величини рівномірно розподіленої на проміжку [50, 90];
- на дугах від переходів $Op(i)$ до $Op(i)$ (де $i = \overline{1,5}$) вираз $setEndTime(clientR)$ підраховує модельний час кінця обслуговування для клієнта та формує повний набір даних про клієнта;
- на дугах від переходів $Exit(i)$ до позицій *Statistics* вираз $clientR$ задає надходження запису про клієнта, який був обслуговано i -м оператором;
- на дугах від переходу *Prior1* до позиції *TimeSumP1* та від переходу *Prior2* до позиції *TimeSumP2* вираз $j+(\#timeEnd\ clientR)-(\#timeS\ clientR)$ підраховує загальний час обслуговування клієнтів відповідної групи;
- на дугах від переходу *Prior1* до позиції *AvrTimeP1* та від переходу *Prior2* до позиції *AvrTimeP2* вираз $real(j+(\#timeEnd\ clientR)-(\#timeS\ clientR))/real(i+1)$ підраховує середнє значення часу обслуговування клієнтів відповідної групи.

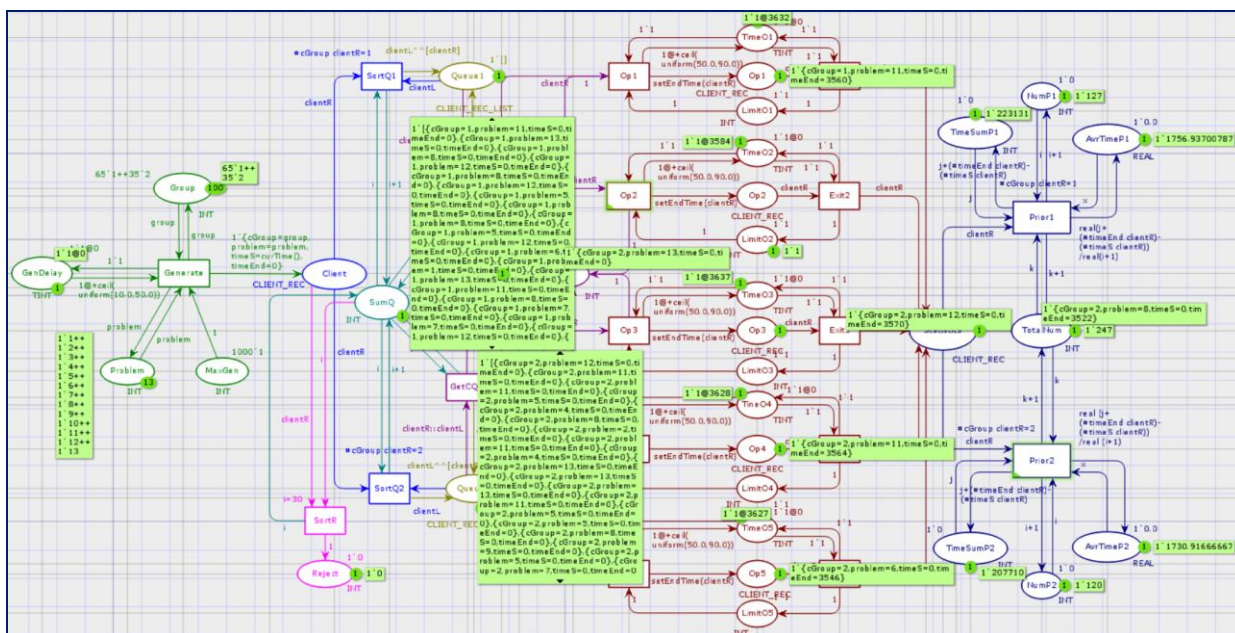


Рисунок 3 – Результати імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми

Аналіз результатів моделювання. Для накопичення статистики про результати роботи моделей можуть бути використані різні методи. У даній роботі розглянуто метод *накопичення інформації в позиціях*.

На рисунку 3 представлено результати імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. В таблиці 2 представлено результати імітаційного моделювання процесу обслуговування 1000 клієнтів центру. Користувачі звертаються у центр випадковим чином в проміжку часу від 1 до 5 секунд. Відсоткове співвідношення кількості клієнтів в кожній групі пріоритетів: 65%, 35%.

Таблиця 2

Результати моделювання

Параметри моделі	Група 1	Група 2
Кількість обслужених клієнтів	127	120
Середній час обслуговування клієнтів	2,93 хвил.	2,88 хвил.
Загальний час обслуговування клієнтів	6,2 год.	5,77 год.
Загальна кількість обслужених клієнтів	247	
Кількість клієнтів яким було відмовлено в обслуговуванні	1	

Накопичення статистики є важливим елементом процесу моделювання. Деякі характеристики моделі можуть бути обчислені в реальному часу, в про-

цесі моделювання, для інших можуть знадобитися додаткові розрахунки в спеціалізованих математичних додатках [1].

Висновки

В роботі було розглянуто побудова імітаційних моделей систем з стохастичним процесом обробки даних. Представлено формальний опис моделей на основі кольорових мереж Петрі. Наведено алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі. Обґрунтовано використання для імітаційного моделювання складних стохастичних процесів обробки даних використання часових мереж Петрі. Визначено особливості застосування часових мереж Петрі при побудові імітаційних моделей зі складними стохастичними процесами обробки даних. Для завдання випадкових величин використані спеціальні функції. Наведено перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів. В якості прикладу розглянуто побудова імітаційної моделі процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Модель була побудована в середовищі *CPN Tools*. Визначені та досліджені параметри системи, змінні та параметри моделі. Представлено аналіз результатів імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Аналіз результатів імітаційного моделювання дозволяє зробити висновок про ефективність застосування кольорових мереж Петрі для моделювання систем зі складними стохастичними процесами обробки даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калініна І.О., Гожий О.П. Моделювання складних систем на основі кольорових мереж Петрі: навчальний посібник. Херсон: книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2021. – 60 с.
2. Bause, F. Stochastic Petri nets: an introduction to the theory [Text] / F. Bause, Pieter S. Kritzinger. – Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2002. – 223 p.
3. Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets [Text] / M. Ajmone Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, G. Franceschinis. – John Wiley & Sons, 1995. – 324 p.
4. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
5. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем: монография. Днепропетровск: Системные технологии, 2005, 311 с.
6. Murata T. "Petri nets: Properties, analysis and applications," in Proc. of the IEEE, Vol. 77(4), 1989, pp. 541580.

7. Genrich H. J., Lautenbach K., System modeling with high level Petri nets, Theoretical Computer Science, Vol. 13, pp. 109-136, 1981.
8. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Т.И. Алиев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
9. Alcaraz-Mejia M., Campos-Rodriguez R., Caballero-Gutierrez M., Modeling and Simulation of Task Allocation with Colored Petri Nets. Computer Simulation. Open access peer-reviewed chapter, 2017. DOI: 10.5772/67950.
10. Wil M. P. van der Aalst, Stahl Ch., Westergaard M., Strategies for Modeling Complex Processes Using Colored Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science book series (TOPNOC, Vol. 7480), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 6–55. DOI: 10.1007/978-3-642-38143-0_2.
11. Boubeta-Puig J., Díaz G., Macià H., Valero V., Ortiz G., MEdit4CEP-CPN: An approach for complex event processing modeling by prioritized colored petri nets. Information Systems, Vol. 81, 2019, pp. 267-289.
<https://doi.org/10.1016/j.is.2017.11.005>.
12. Bozek A., Rak T., Rzonca D., Timed Colored Petri Net-Based Event Generators for Web Systems Simulation. Department of Computer and Control Engineering, Rzeszow University of Technology, Powstancow Warszawy 12, 2022, pp. 35-959, Rzeszow,. <https://doi.org/10.3390/app122312385>.
13. Souravlas S., Anastasiadou S., Kostoglou I., A Novel Method For General Hierarchical System Modeling via Colored Petri Nets Based on Transition Extractions from Real Datasets. Appl. Sci. 2023, 13, 339. <https://doi.org/10.3390/app13010339>.
14. Grobelna I., Karatkevich A., Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. Electronics 2021, Vol.10, No. 2305, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.
15. Valero V., Diaz G., Boubeta-Puig J., Macia H., Brazalez E., A Compositional Approach for Complex Event Pattern Modeling and Transformation to Colored Petri Nets with Black Sequencing Transitions. IEEE transactions on software engineering, Vol. 48, No. 7, pp. 2584-2605, 2022. DOI: 10.1109/TSE.2021.3065584.
16. Gehlot V., Nigro C., An introduction to systems modeling and simulation with colored petri nets, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hukan, and E. Yücesan, eds. INSPEC Accession Number: 11746242, 2011, pp. 104-117. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679170.
17. Westergaard1 M., Slaats T., CPN Tools 4: A Process Modeling Tool Combining Declarative and Imperative Paradigms. In M. C. Fauvet, & B. F. Dongen, van (Eds.), BPM Demo Sessions 2013 (Co-located with 11th International Conference on

Business Process Management, BPM2013, Beijing, China, August 26-30, 2013) (pp. 1-5). (CEUR Workshop Proceedings; Vol. 1021).

REFERENCE

1. Kalinina I.O., Hozhyi O.P. Modeliuvannia skladnykh system na osnovi kolorovykh merezh Petri: navchalnyi posibnyk. Kherson: knyzhkove vydavnytstvo FOP Vyshemyrskiy V.S., 2021. – 60 s.
2. Bause, F. Stochastic Petri nets: an introduction to the theory [Text] / F. Bause, Pieter S. Kritzinger. – Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2002. – 223 p.
3. Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets [Text] / M. Ajmone Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, G. Franceschinis. – John Wiley & Sons, 1995. – 324 p.
4. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
5. Bodianskyi E.V., Kucherenko E.Y., Mykhalev A.Y. Neuro-fazzy sety Petry v zadachakh modelyrovannya slozhnykh system: monohrafiya. Dnepropetrovsk: Systemnye tekhnolohyy, 2005, 311 s.
6. Murata T. “Petri nets: Properties, analysis and applications,” in Proc. of the IEEE, Vol. 77(4), 1989, pp. 541580.
7. Genrich H. J., Lautenbach K., System modeling with high level Petri nets, Theoretical Computer Science, Vol. 13, pp. 109-136, 1981.
8. Alyev T.Y. Osnovny modelyrovannya diskretnykh system / T.Y. Alyev. – SPb: SPbHU YTMO, 2009. – 363 s.
9. Alcaraz-Mejia M., Campos-Rodriguez R., Caballero-Gutierrez M., Modeling and Simulation of Task Allocation with Colored Petri Nets. Computer Simulation. Open access peer-reviewed chapter, 2017. DOI: 10.5772/67950.
10. Wil M. P. van der Aalst, Stahl Ch., Westergaard M., Strategies for Modeling Complex Processes Using Colored Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science book series (TOPNOC, Vol. 7480), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 6–55. DOI: 10.1007/978-3-642-38143-0_2.
11. Boubeta-Puig J., Díaz G., Macià H., Valero V., Ortiz G., MEdit4CEP-CPN: An approach for complex event processing modeling by prioritized colored petri nets. Information Systems, Vol. 81, 2019, pp. 267-289.
<https://doi.org/10.1016/j.is.2017.11.005>.
12. Bozek A., Rak T., Rzonca D., Timed Colored Petri Net-Based Event Generators for Web Systems Simulation. Department of Computer and Control Engineering,

Rzeszow University of Technology, Powstancow Warszawy 12, 2022, pp. 35-959, Rzeszow,. <https://doi.org/10.3390/app122312385>.

13. Souravlas S., Anastasiadou S., Kostoglou I., A Novel Method For General Hierarchical System Modeling via Colored Petri Nets Based on Transition Extractions from Real Datasets. Appl. Sci. 2023, 13, 339. <https://doi.org/10.3390/app13010339>.

14. Grobelna I., Karatkevich A., Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. Electronics 2021, Vol.10, No. 2305, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.

15. Valero V., Diaz G., Boubeta-Puig J., Macia H., Brazalez E., A Compositional Approach for Complex Event Pattern Modeling and Transformation to Colored Petri Nets with Black Sequencing Transitions. IEEE transactions on software engineering, Vol. 48, No. 7, pp. 2584-2605, 2022. DOI: 10.1109/TSE.2021.3065584.

16. Gehlot V., Nigro C., An introduction to systems modeling and simulation with colored petri nets, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan, eds. INSPEC Accession Number: 11746242, 2011, pp. 104-117. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679170.

17. Westergaard1 M., Slaats T., CPN Tools 4: A Process Modeling Tool Combining Declarative and Imperative Paradigms. In M. C. Fauvet, & B. F. Dongen, van (Eds.), BPM Demo Sessions 2013 (Co-located with 11th International Conference on Business Process Management, BPM2013, Beijing, China, August 26-30, 2013) (pp. 1-5). (CEUR Workshop Proceedings; Vol. 1021).

Received 18.11.2022.

Accepted 26.11.2022.

Simulation modeling of systems with a complex stochastic data processing process using colored Petri nets

The article considers the process of building simulation models of systems with stochastic data processing based on colored Petri nets. A formal description of models based on colored Petri nets is presented. For simulation modeling of data processing tasks, the use of temporal Petri nets is substantiated, which allows to define and describe in detail the time intervals of the simulated process. The algorithm for building simulation models based on colored Petri nets is presented. The peculiarities of the use of temporal Petri nets in the construction of simulation models with complex stochastic data processing processes are determined. Special functions are used to assign random values. A list of functions with their detailed description and ranges of permissible values for input parameters is provided. As an example, the construction of a simulation model of the work process of the application processing center of a commercial firm is considered. The model was built in the CPN Tools environment. System parameters, variables,

functions and model parameters are defined and investigated. The method of accumulating information in positions was used to accumulate statistics on the results of the models. The analysis of the results of simulation modeling of the work process of the application processing center of a commercial firm is presented.

Калініна Ірина Олександрівна – доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н., доцент.

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор.

Нечахін Владіслав Володимирович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Шиян Сергій Іванович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Associate Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Ph.D., associate professor.

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Doc.of Ing.Sc., professor.

Nechahin Vladislav Volodymyrovych - PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly.

Shiyan Serhii Ivanovych – PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petera Mohyly.