DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-114-121
УДК 004.03/.05:519.7

Ю.Б. Бродський, к.т.н., доц.
О.В. Маєвський, к.т.н., доц.
М.О. Хохлов, асистент
Державний університет «Житомирська політехніка»

Імітаційне моделювання стохастичного процесу на прикладі обчислювальної системи

Метою статті є розроблення методики оцінювання стохастичних процесів у складних системах на прикладі трипроцесорної обчислювальної системи, що дасть змогу підвищити ефективність контролю функціонування та управління такими об'єктами. Під час проведення дослідження було застосовано методи системного підходу, аналізу і синтезу, стохастичного та імітаційного моделювання, на основі яких було відтворено поведінку трипроцесорної обчислювальної системи за різних умов; симуляції дозволили розкрити механізм роботи системи та провести верифікацію стохастичної моделі; ланцюги Маркова дали можливість змоделювати переходи обчислювальної системи зі стану в стан та оцінити ймовірності станів системи як функцій часу чисельними методами. У статті запропоновано імітаційну модель, яка дозволяє визначити стани процесорів, розрахувати періоди їх завантаженості залежно від загального часу функціонування та визначити момент часу, з якого завершуються перехідні процеси і обчислювальна система досягає стійкого, збалансованого режиму роботи. Теоретична та практична значущість дослідження полягає в поглибленні наявних і розробленні нових теоретико-методичних положень щодо підвищення ефективності аналізу та оцінювання стохастичних процесів у складних системах.

Ключові слова: *складна система; стохастичне моделювання; імітаційна модель; обчислювальна система; випадковий процес; ланцюг Маркова.*

Актуальність. Будь-яка технічна система, яка становить собою складну систему, характеризується великою кількістю елементів, множиною зав'язків між ними, наявністю показників якості компонентів та певними критеріями, яким має відповідати система. Складність самої системи часто зв'язують зі стохастичними процесами, що в ній відбуваються. Це призводить до виникнення певних проблем контроля функціонування та управління такими об'єктами. Оскільки стан складної системи визначається великою кількістю різноманітних факторів, змінюванням параметрів за часом та не завжди відомим законом розподілу, тому виникає проблема перебору всіх комбінацій за обмежений період часу, що впливає на ефективність управління.

До означеного класу складних систем належать і багатопроцесорні обчислювальні системи, які містять велику кількість апаратних компонентів і програмне забезпечення. Процес опрацювання даних (запитів) у таких системах відбувається загалом за стохастичною схемою і його можна інтерпретувати як потік однорідних подій, що виникають через нерегулярні проміжки часу.

Отже, поведінку складної системи з випадковими переходами можна описувати та досліджувати за допомогою стохастичних матриць, матриць перехідних імовірностей, на основі теорії марковських випадкових процесів (ланцюгів Маркова).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задачі оптимізації роботи багатопроцесорних обчислювальних систем розглядалися в дослідженнях науковців із Shanxi University, China (Peng Wu, Zhi Li та інші) [1], які описують методи розподілу навантаження трипроцесорної системи, планування продуктивності асиметричних мультипроцесорів із урахуванням нелінійного навантаження та обсягів даних, які піддаються обробці. Показано, що алгоритм найкращої швидкості на шляху до завершення задачі може планувати більше наборів завдань, ніж інші стратегії розподілу навантаження процесорів, проте алгоритм найкоротшого шляху може бути оптимальним під час використання наявної обчислювальної потужності процесорів, оскільки він зменшує кількість операторів переходу, відповідно вільні від задач процесори можуть бути задіяні в інших обчислювальних операціях.

Iwo Błądek та Maciej Drozdowski з Poznań University of Technology [2] досліджували методи суміжного та несуміжного паралельного планування завдань. Детально представлено порівняння двох методів планування задач за допомогою графіків та матриць використання процесорного часу. Наведені теореми та обчислення доводять, що метод несуміжного розподілу завдань у системі процесорів витрачає менше загального часу, оскільки завдання можуть виконуватися паралельно на вільних від роботи процесорах, розподілятися на окремі частини на етапах обчислювальних операцій із урахуванням навантаження на процесори. Проте наведене вище дослідження не враховує модель станів процесорів, яка дозволяє обчислювальній системі досягти стійкого та збалансованого режиму роботи.

У [3] розглядається визначення оптимального розподілу елементів матриці на трьох абстрактних гетерогенних процесорах. Досліджується знаходження оптимального розподілу даних між процесорами, використовуючи чотири класи алгоритмів послідовного або паралельного множення матриць із перекриттям.

У своїй праці Dai та Jiang [4] виокремили важливість створення оптимальної системи планування та розподілу запитів на основі метаевристичного алгоритму для досягнення балансу середнього розрахункового часу обчислень процесорів.

Ricardo Q. та інші [5] досліджували питання багатопроцесорних підходів до аналізу часових рядів. Спираючись на особливості побудови мультипроцесорних систем, науковці пропонують нові підходи для прискорення роботи системи за послідовним та базовим алгоритмом. З погляду апаратної складової наведене дослідження надає доволі перспективні показники для подальшої оптимізації обчислювальних систем на рівні розробки процесорів, але також варто не забувати і про програмну частину, яка через свою можливу неоптимальну реалізацію може призвести до суттєвих апаратних навантажень, тим самим зменшуючи ефективність запропонованих підходів до вирішення глобального питання балансування задач.

Lin G., та Rajaraman R. [6] проводили дослідження алгоритмів апроксимації мультипроцесорного планування в умовах невизначеності. Хоча наведені пропозиції та теореми є достатньо описаними, автори статті наголошують на подальшому детальному вивченні поставлених проблем, зокрема на дослідженні планування задач процесорних обчислень у режимі реального часу.

Отже, на наш погляд, проблемними питаннями оптимізації роботи багатопроцесорних обчислювальних систем в цілому складних технічних систем є:

- недостатнє вивчення впливу існуючих алгоритмів на процесори з різним рівнем обчислювальних можливостей;
- брак наукових досліджень у проєктуванні асиметричних багатопроцесорних обчислювальних систем із урахуванням балансування навантаження;
- зосередження досліджень на оптимальних несумісних плануваннях задач без урахування можливих додаткових факторів впливу, таких як затримки та середній час перебування у певному стані системи;
- необхідність дослідження проблематики неоптимізованих програмних застосунків, які можуть впливати на ефективність запропонованих підходів у глобальному питанні балансування задач;
- планування задач багатопроцесорних обчислювальних систем у режимі реального часу потребують зміни існуючих або побудови нових алгоритмів балансування станів та навантаження.

Метою статті є розроблення методики оцінювання стохастичних процесів у складних системах на прикладі трипроцесорної обчислювальної системи, що дасть змогу підвищити ефективність контролю функціонування та управління такими об’єктами.

Викладення основного матеріалу.

Методика досліджень.

Аналіз функціональності трипроцесорної обчислювальної системи передбачає визначення ймовірності її станів як функцій часу та встановлення граничних ймовірностей станів системи, що досліджується.

Одночасно з’ясовується необхідна кількість переходів в обчислювальній системі для досягнення стабільного (стійкого) стану разом із середньою тривалістю перебування у відповідних станах.

Врахування стохастичного характеру процесів у системі передбачає застосування системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова для ергодичних ланцюгів Маркова [7].

Потенційну складність аналітичного розв’язання таких систем рівнянь у поєднанні зі змінними векторами вхідних даних пропонується подолати використанням чисельного методу Рунге – Кутта [8] з фіксованим розміром кроку. Обчислювальний експеримент буде реалізовано в середовищах програмування Python [9] та Mathcad [10].

Організація обчислювального експерименту та результати досліджень.

Розглянемо прямий потік запитів, який обробляється трипроцесорною обчислювальною системою з інтенсивністю φ [час$^{-1}$], який розподілений за експоненціальним законом (1):

$$\varphi(t)=\varphi\cdot e^{-\varphi\cdot t} \tag{1}$$

де t – проміжок часу між послідовними запитами.

Інтенсивність обробки запитів кожним із процесорів позначимо через λi [час$^{-1}$], i = 1, 2, 3. Припустимо, що

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3. \tag{2}$$

Тобто перший процесор забезпечує найбільшу інтенсивність і відповідно має першочерговий пріоритет обробки запитів. Якщо всі три процесори зайняті, запит очікує своєї черги. Загальний час роботи комп’ютерної системи позначимо через T.

Процес дослідження режиму роботи багатопроцесорної системи передбачає визначення ймовірностей станів системи як функцій часу і граничних ймовірностей, оцінювання часу знаходження системи в тому чи іншому можливому стані з відповідними ймовірностями та часового періоду досягнення обчислювальної системи заданого стаціонарного режиму роботи (стійкого стану).

Граф можливих станів трипроцесорної обчислювальної системи представлено на рисунку 1.

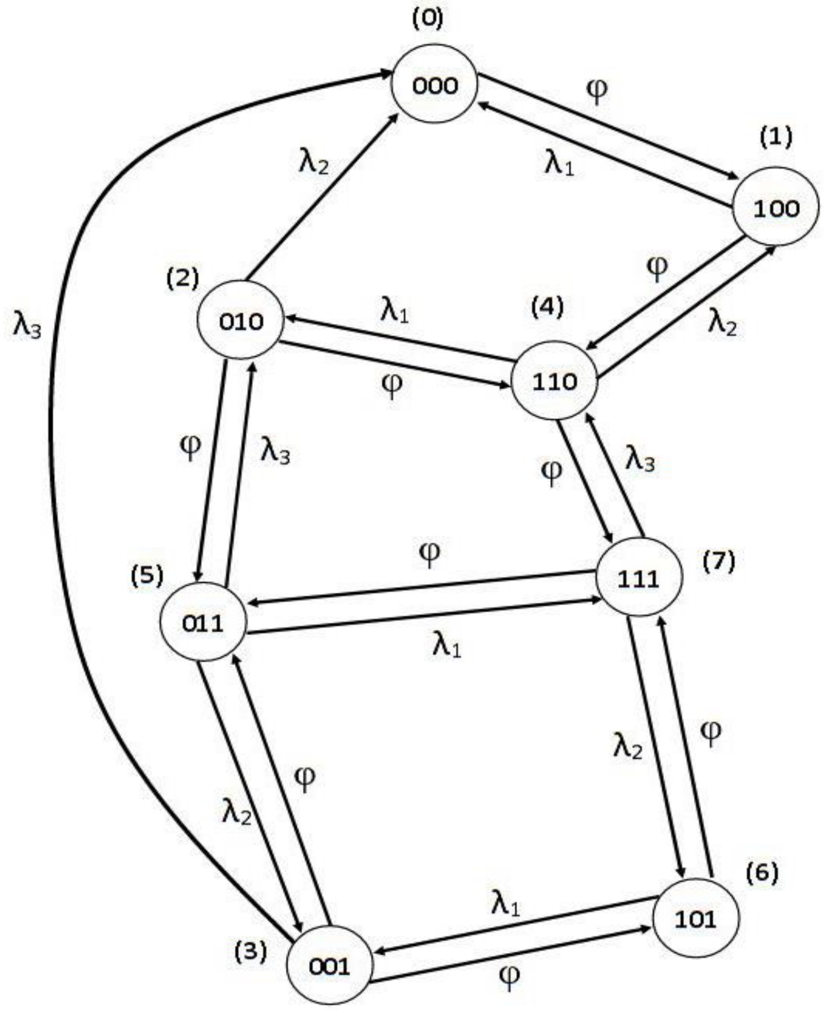


Рис. 1. Граф станів трипроцесорної обчислювальної системи

Позначимо сукупність можливих станів S трипроцесорної обчислювальної системи через множину $M_s = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ та класифікуємо їх за змістом операцій, що виконуються:

0: 000 – три процесори вільні від запитів;

1: 100 – перший процесор опрацьовує запит, другий та третій вільні;

2: 010 – другий процесор виконує обробку запиту, перший та третій вільні;

3: 001 – перший та другий процесори вільні, третій обробляє запит;

4: 110 – перший та другий процесори зайняті обробкою, третій – вільний;

5: 011 – перший процесор вільний, другий та третій процесори відпрацьовують запити;

6: 101 – перший і третій процесори активні, другий процесор в очікуванні;

7: 111 – всі три процесори опрацьовують запити.

Імовірності P станів M_s обчислювальної трипроцесорної системи (як функції часу) можна подати у вигляді відповідної множини:

$$M_p = \{P_0(t),\ P_1(t),\ P_2(t),\ P_3(t),\ P_4(t),\ P_5(t),\ P_6(t),\ P_7(t)\}. \qquad (3)$$

Для указаних станів обчислювальної системи складемо диференційні рівняння Колмогорова для ергодичного ланцюга Маркова [7]:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\varphi \cdot P_0(t) + \lambda_1 \cdot P_1(t) + \lambda_2 \cdot P_2(t) + \lambda_3 \cdot P_3(t) \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \varphi \cdot P_0(t) - (\lambda_1 + \varphi) \cdot P_1(t) + \lambda_2 \cdot P_4(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = -(2 \cdot \varphi + \lambda_2) \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_4(t) + \lambda_3 \cdot P_5(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_3 + 2 \cdot \varphi) \cdot P_3(t) + \lambda_2 \cdot P_5(t) + \lambda_1 \cdot P_6(t) \\ \dfrac{dP_4(t)}{dt} = \varphi \cdot (P_1(t) + P_2(t)) - (\lambda_2 + \lambda_1 + \varphi) \cdot P_4(t) + \lambda_3 \cdot P_7(t) \\ \dfrac{dP_5(t)}{dt} = \varphi \cdot (P_2(t) + P_3(t) + P_7(t)) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot P_5(t) \\ \dfrac{dP_6(t)}{dt} = \varphi \cdot P_3(t) - (\lambda_1 + \varphi) \cdot P_6(t) + \lambda_2 \cdot P_7(t) \\ \dfrac{dP_7(t)}{dt} = \varphi \cdot (P_4(t) + P_6(t)) - (\varphi + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot P_7(t) + \lambda_1 \cdot P_5(t) \end{cases} . \quad (4)$$

Відповідно матриця переходів між станами системи матиме такий вигляд:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & P_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{10} & 0 & 0 & 0 & P_{14} & 0 & 0 & 0 \\ P_{20} & 0 & 0 & 0 & P_{24} & P_{25} & 0 & 0 \\ P_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{35} & P_{36} & 0 \\ 0 & P_{41} & P_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{47} \\ 0 & 0 & P_{52} & P_{53} & 0 & 0 & 0 & P_{57} \\ 0 & 0 & 0 & P_{63} & 0 & 0 & 0 & P_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{74} & P_{75} & P_{76} & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Припустимо, що потік задач у багатопроцесорній системі розподілений за експоненціальним законом:

$$P_i(t) = e^{-\sum_{j}^{n} \lambda_{ij} t}, \quad (6)$$

де t – інтервал часу до настання події.

Підсумок виконується по індексу *j*. Тобто, при фіксованому рядку матриці переходів формується повна група подій. Тоді із (6) отримаємо вираз для оцінювання часу переходу системи зі стану в стан

$$t = -\frac{\ln(P_i(t))}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_{ij}}; i \neq j \cdot \quad (7)$$

Ймовірності та інтенсивності переходів в кожен із *n* станів визначаються відповідно до рівнянь (8) і (9):

$$p_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_{ij}}; i \neq j, \quad (8)$$

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{p_{ij}(t, \Delta t)}{\Delta t}. \quad (9)$$

Для проведення імітаційного моделювання приймемо інтенсивність вхідного потоку задач та інтенсивності обробки запитів процесорами значеннями, що вказані в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри імітаційного моделювання

Інтенсивність вхідного потоку задач φ [час$^{-1}$]	Інтенсивність обробки потоку задач першим процесором λ_1 [час$^{-1}$]	Інтенсивність обробки потоку задач другим процесором λ_2 [час$^{-1}$]	Інтенсивність обробки потоку задач третім процесором λ_3 [час$^{-1}$]
0,75	0,2	0,15	0,13

Для розв’язання системи диференціальних рівнянь (2) чисельним методом Рунге – Кутта з постійним кроком було застосовано інструментарій середовища Python і системи Mathcad.

Результати імітаційного моделювання подані на рисунках 2 і 3.

На рисунку 2 представлено фрагмент (16×5) розрахункової матриці *U* розміром 500×9, де стовпчики з позначками від 1 до 8 є значеннями ймовірностей станів обчислювальної системи в кожний момент часу.

У процесі обчислювального експерименту вважалося, що система в початковий момент часу знаходилася в стані «000».

U =

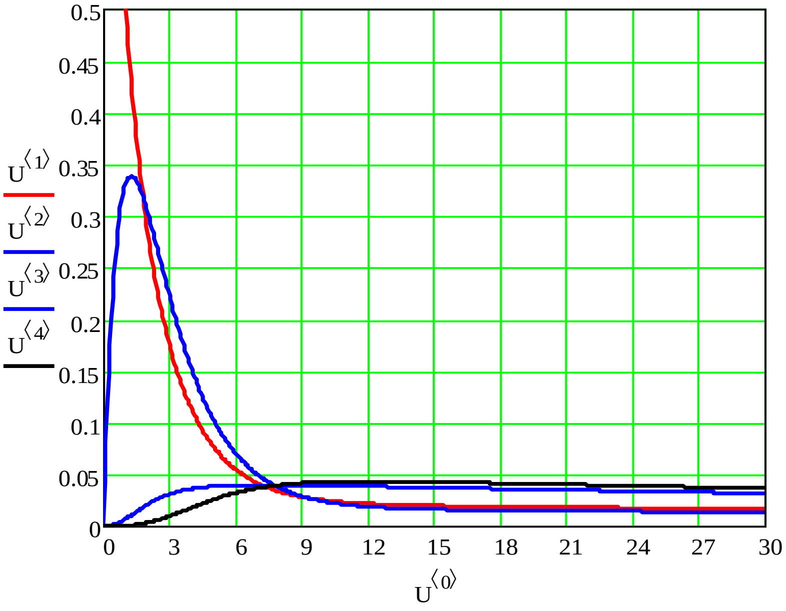
	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0
1	0.06	0.956	0.043	$3.78\cdot10^{-6}$	0
2	0.12	0.915	0.081	$2.836\cdot10^{-5}$	$1.277\cdot10^{-8}$
3	0.18	0.876	0.116	$8.964\cdot10^{-5}$	$9.491\cdot10^{-8}$
4	0.24	0.839	0.147	$1.991\cdot10^{-4}$	$3.783\cdot10^{-7}$
5	0.3	0.804	0.175	$3.644\cdot10^{-4}$	$1.088\cdot10^{-6}$
6	0.36	0.771	0.2	$5.903\cdot10^{-4}$	$2.55\cdot10^{-6}$
7	0.42	0.739	0.221	$8.791\cdot10^{-4}$	$5.192\cdot10^{-6}$
8	0.48	0.709	0.241	$1.231\cdot10^{-3}$	$9.537\cdot10^{-6}$
9	0.54	0.681	0.258	$1.645\cdot10^{-3}$	$1.62\cdot10^{-5}$
10	0.6	0.654	0.273	$2.119\cdot10^{-3}$	$2.586\cdot10^{-5}$
11	0.66	0.629	0.286	$2.65\cdot10^{-3}$	$3.926\cdot10^{-5}$
12	0.72	0.605	0.297	$3.233\cdot10^{-3}$	$5.722\cdot10^{-5}$
13	0.78	0.582	0.306	$3.865\cdot10^{-3}$	$8.054\cdot10^{-5}$
14	0.84	0.56	0.314	$4.54\cdot10^{-3}$	$1.101\cdot10^{-4}$
15	0.9	0.539	0.321	$5.255\cdot10^{-3}$	...

Рис. 2. Фрагмент розрахункової матриці U розміром 500×9. Стовпчики 1–4 є значеннями ймовірностей станів обчислювальної системи в кожний момент часу

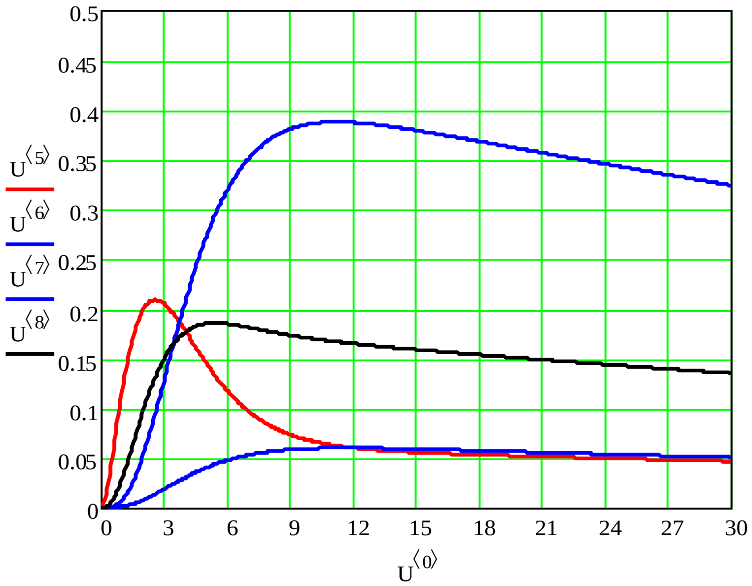
На рисунках 3, *а–б* представлено результати моделювання відповідно перших (1–4) та останніх (5–8) 4-х станів обчислювальної системи як ймовірностей у кожний момент часу (час надано в умовних одиницях).

Результат реалізації методу Рунге – Кутта з фіксованим кроком у середовищі системи Mathcad представлено матрицею, де нульовий стовпчик відображає моменти часу, а номери стовпчиків, починаючи з 1 по 8, відображають значення ймовірностей перебування системи у відповідних станах у конкретні моменти часу.

Представлені на рисунках 3, *а–б* результати обчислювального експерименту демонструють чітко виражені області перехідних процесів і поступовий вихід на стаціонарний режим роботи з граничними ймовірностями відповідно певного стану системи, що наведено в таблиці 2, де нумерація станів починається з «0».



а



б

Рис. 3. Ймовірності обчислювальної системи за часом:
а – перших 4-х станів (1–4); б – останніх 4-х станів (5–8)

Таблиця 2

Результати обчислювального експерименту граничних ймовірностей станів

Гранична ймовірність стану	Значення
«0»	0,024
«1»	0,019
«2»	0,047
«3»	0,055
«4»	0,071
«5»	0,494
«6»	0,077
«7»	0,214

Отримані значення граничних ймовірностей для кожного зі станів обчислювальної системи дозволять оцінити середній час перебування системи в кожному з 8 станів залежно від загального часу функціонування обчислювальної системи та регулювати рівень завантаження процесорів.

Визначимо момент часу та ймовірність переходу обчислювальної системи в певний стан на прикладі оцінювання двох станів системи (для інших станів процедура обчислення аналогічна) внаслідок достатньо великого обсягу розрахункових операцій.

Отже, нехай в момент часу t_0 система знаходилась у стані S_0 «000», тобто в режимі очікування. З'ясуємо час переходу *t*, за який система змінить свій стан з «000» до «100».

Згенеруємо випадкове число $\varepsilon = 0{,}575$, тоді час переходу в стан «100» визначиться так:

$$t = -\frac{\ln(0{,}575)}{\varphi} = 0{,}738 \text{ с.} \tag{10}$$

Розрахуємо час, протягом якого обчислювальна система перейшла зі стану «100» в інший, невідомий стан.

Згенеруємо випадкове число $\varepsilon = 0{,}831$ та аналогічно обрахуємо час переходу зі стану «100» в невідомий поки стан

$$t = -\frac{\ln(0{,}831)}{\lambda_1 + \varphi} = 0{,}195 \text{ с.} \tag{11}$$

Проведемо оцінювання ймовірності переходу обчислювальної системи в інші стани зі стану «100».

Ймовірність переходу в стан «000»:

$$P_{100-000} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \varphi} = 0{,}211. \tag{12}$$

Ймовірність переходу в стан «110»:

$$P_{100-110} = \frac{\varphi}{\lambda_1 + \varphi} = 0{,}789. \tag{13}$$

Для встановлення наступного стану переходу обчислювальної системи згенеруємо випадкове число

$$\varepsilon = 0{,}638. \tag{14}$$

Таким чином, в результаті стохастичного моделювання з'ясовано, що перехід обчислювальної системи в стан «110» відбудеться протягом часу

$$t_1 = 0{,}738 + 0{,}195 = 0{,}933 \text{ с.} \tag{15}$$

Аналогічно можна оцінити ймовірності переходу трипроцесорної обчислювальної системи зі стану в стан та отримати часові характеристики переходів.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Для вирішення проблемних питань оптимізації роботи складних технічних систем, підвищення ефективності контролю функціонування та управління ними запропоновано методику оцінювання стохастичних процесів у багатопроцесорних обчислювальних системах.

За результатами дослідження встановлено залежності ймовірностей від часу для станів, в яких може знаходитись обчислювальна система, що дозволяє визначити момент завершення робочих процесів і перехід системи до стаціонарного режиму роботи.

Визначено граничні ймовірності та середній термін перебування складної системи у певних станах.

Проведено оцінку періодів завантаженості процесорів залежно від загального часу функціонування обчислювальної системи.

Розроблено імітаційну модель, яка дозволяє визначити оптимальні значення критично важливих параметрів обчислювальної системи при опрацюванні потоку задач заданої інтенсивності та фіксованої інтенсивності обробки запитів процесорами.

У подальшому наукові дослідження будуть спрямовані на розвиток методологічних основ створення та використання інформаційної технології для підвищення ефективності контролю функціонування та підготовки управлінських рішень при аналізі та синтезі моделей складних систем.

References:

1. Wu, P., Li, Z., Yan, T. and Li, Y. (2023), «Three processor allocation approaches towards EDF scheduling for performance asymmetric multiprocessors», *Applied Sciences*, Vol. 13, Issue 9, doi: 10.3390/app13095318.
2. Błądek, I., Drozdowski, M., Guinand, F. and Schepler, X. (2015), «On contiguous and non-contiguous parallel task scheduling», *Journal of Scheduling*, Vol. 18, Issue 5, pp. 487–495, doi: 10.1007/s10951-015-0427-z.

3. Klyuyeva, Y.G., Yavorskij, V.V., Adamov, A.A. and Utepbergenov, I.T. (2020), «Determination of the optimal shape of matrix elements partitioning on three abstract heterogeneous processors», *Cogent Engineering*, Vol. 7, Issue 1, doi: 10.1080/23311916.2020.1769948.
4. Dai, M. and Jiang, Z. (2023), «Multiprocessor fair scheduling based on an improved slime mold algorithm», *Algorithms*, Vol. 16, Issue 10, doi: 10.3390/a16100473.
5. Quislant, R., Gutierrez, E. and Plata, O. (2024), «Exploring multiprocessor approaches to time series analysis», *Journal of Parallel and Distributed Computing*, doi: 10.1016/j.jpdc.2024.104855.
6. Lin, G. and Rajaraman, R. (2010), «Approximation algorithms for multiprocessor scheduling under uncertainty», *Theory of Computing Systems*, Vol. 47, Issue 4, pp. 856–877, doi: 10.1007/s00224-010-9250-2.
7. Feller, W. (1957), «On Boundaries and Lateral Conditions for the Kolmogorov Differential Equations», *The Annals of Mathematics*, Vol. 65, No. 3, pp. 527–570, doi: 10.2307/197006.
8. Roberts, R.C. and Noble, B. (1965), «Numerical Methods», *Mathematics of Computation*, Vol. 19, No. 92, 701 p., doi: 10.2307/2003986.
9. Stewart, J. (2017), *Python for Scientists*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
10. Abukhba, A.M. (2018), «Some features of programming in mathcad prime», *Informatics in school*, Vol. 9, pp. 28–33, doi: 10.32517/2221-1993-2018-17-9-28-33.

Бродський Юрій Борисович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».
https://orcid.org/0000-0002-6843-0192.
Наукові інтереси:
– системологія;
– кібернетика;
– системний аналіз;
– математичне моделювання;
– інформаційні технології.

Маєвський Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».
https://orcid.org/0000-0002-0335-6358.
Наукові інтереси:
– системи штучного інтелекту;
– динаміка суцільних середовищ;
– моделювання стохастичних процесів.

Хохлов Михайло Олегович – асистент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».
https://orcid.org/0009-0008-5420-4267.
Наукові інтереси:
– системи графічного відтворення інформації;
– програмування прикладних пристроїв та додатків;
– безпека комп'ютерних мереж та інформації.

Brodskyi Y.B., Maievskyi O.V., Khokhlov M.O.

Simulation modeling of a stochastic process on the example of a computer system

The purpose of the article is to develop a methodology for evaluating stochastic processes in complex systems using the example of a three-processor computer system, which will make it possible to increase the effectiveness of monitoring the functioning and management of such objects. During the research, the methods of system approach, analysis and synthesis, stochastic and simulation modeling were applied, based on which the behavior of a three-processor computing system was reproduced under different conditions; simulations made it possible to reveal the mechanism of the system and verify the stochastic model; Markov chains made it possible to simulate the transitions of a computer system from state to state and to estimate the probabilities of system states as functions of time using numerical methods. Proposed simulation model in the article allows determining the states of the processors, calculate their load periods depending on the total time of operation, and determine the moment of time at which transient processes are completed and the computer system reaches its balanced mode of operation. The theoretical and practical significance of the research lies in the further studying of the existing and the development of new theoretical and methodological provisions for increasing the efficiency of the analysis and evaluation of stochastic processes in complex systems.

Keywords: complex system; stochastic modeling; simulation model; computing system; random process; Markov chain.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2024.