

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПОТОКОВОЇ АРХІТЕКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ЗАСОБАМИ ANYLOGIC

Анотація. Розглянута можливість та особливості використання інструменту імітаційного моделювання бізнес процесів AnyLogic для дослідження комп'ютерних систем. Побудована та досліджена імітаційна модель багатопотокових обчислень в мультипроцесорній комп'ютерній системі, що працює в режимі поділу часу.

Ключові слова: імітаційне моделювання, комп'ютерна система, багатопотоковість.

Постановка проблеми. Сучасні комп'ютерні системи представляють собою обширний клас технічних засобів, які дуже непросто аналізувати, досліджувати та проектувати завдяки їх підвищеній складності. При моделюванні та дослідженні таких систем, як, власне кажучи, і будь яких інших систем, не зосереджуються на визначенні точного характеру роботи кожного з їх елементів. Натомість досліджують логіку та характер взаємодії цих елементів при розв'язанні покладених на систему задач, маючи на меті визначення таких загальних характеристик комп'ютерної системи, які забезпечать найвищу продуктивність її роботи. Це дозволяє досліджувати комп'ютерні системи застосовуючи добре розроблені методи та підходи до моделювання систем загального призначення, наприклад, методи імітаційного моделювання систем [1,2].

Імітаційне моделювання в останній час стає найбільш поширеним способом дослідження процесів обробки інформації в комп'ютерних системах. Успіху імітаційного моделювання комп'ютерних систем сприяє те, що вони добре формалізуються у вигляді систем масового обслуговування [3]. Будь яку комп'ютерну систему можна розглядати в термінах теорії систем масового обслуговування як взаємопов'язану сукупність запитів на обслуговування (транзактів), ресурсів (каналів обслуговування), черг до ресурсів (накопичувачів) та алгоритму (правил) обслуговування.

Метою досліджень в теорії систем масового обслуговування є визначення таких характеристик та параметрів системи, при яких забезпечується її найбільш ефективне функціонування. Оцінити ефективність роботи системи мож-

на визначивши в процесі моделювання інтенсивність вхідного потоку транзакцій, коефіцієнти завантаження каналів обслуговування, середню та максимальну довжину черг в накопичувачах, час знаходження транзакцій в системі, кількість відмов на обслуговування, тощо. Для розв'язання цієї задачі найчастіше застосовують програмні засоби імітаційного моделювання систем, що дозволяють виробити рекомендації щодо оптимальної побудови системи та організації її роботи. Одним з найперших засобів моделювання систем загального призначення був GPSS World [4], який і дотепер не тільки не втратив своєї актуальності, але і серед інших, більш сучасних програмних засобів моделювання систем демонструє найбільш достовірні результати. Натомість, такі сучасні програмні пакети як Arena [5] та AnyLogic [6] використовують найбільш зручний для користувача візуальний підхід до створення моделей і є наразі безперечними лідерами в галузі програмних засобів моделювання систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Програмні інструменти імітаційного моделювання створювались як універсальні засоби дослідження систем загального призначення. Вони стали використовуватися для моделювання комп'ютерних систем одразу як тільки в цьому з'явилася потреба. Традиційно для моделювання комп'ютерних систем застосовували GPSS World [7], однак цей інструмент вже не відповідає сучасним підходам до імітаційного моделювання і повинен бути замінений іншим, більш досконалим засобом моделювання, наприклад, таким як AnyLogic. Проблема в тому, що AnyLogic теж розроблявся як універсальний засіб, який потім пристосовувався до певних галузей використання додаванням спеціалізованих бібліотек. Так, наприклад, для полегшення створення моделей систем в бізнесовій галузі, в певних галузях виробництва, в логістиці, на транспорті, тощо, є відповідні бібліотеки зі спеціалізованими наборами інструментів моделювання. Однак, для дослідження комп'ютерних систем не існує а ні спеціалізованих бібліотек, а ні окремих інструментів моделювання. Тому, моделювання комп'ютерних систем засобами AnyLogic з використанням стандартних бібліотек, наприклад, бібліотеки моделювання процесів, є актуальною задачею.

Метою дослідження є моделювання багатопотокових обчислень в комп'ютерній системі з використанням стандартних засобів програмного пакету AnyLogic. Модель побудовано на основі використання діаграми станів, запропонованої в роботі [8], але доповненої та ускладненої для реалізації роботи багатопроцесорної системи в режимі поділу часу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Задачею будь-якої комп'ютерної системи є ефективно та надійно виконання завдань користувачів, для чого треба раціонально розподіляти між завданнями наявні ресурси системи – час процесорних елементів та обсяг пам'яті запам'ятовуючих пристроїв. З точки зору операційної системи кожне завдання користувача є процесом, який потребує використання ресурсів комп'ютерної системи і конкурує за ресурси з іншими процесами, що знаходяться в системі в той же момент часу. Для забезпечення виконання процесу операційна система створює один або певну кількість існуючих одночасно потоків, яким вже безпосередньо виділяється час процесорних елементів, необхідний для виконання фрагментів програмного коду.

Потік як динамічний елемент системи вводиться до системи при його створенні, переходить під час знаходження в системі від одного стану до іншого і виводиться з системи при завершенні своєї роботи. Після створення потік в стані готовності до виконання стає у чергу до процесорного елемента разом з іншими потоками у відповідності до його пріоритету. Коли підходить черга, потік захоплює процесорний елемент і починає виконуватися, що імітується затримкою потоку в процесорному елементі на деякий проміжок часу. При цьому, на зміну потоків (перемикання контексту) теж втрачається певний час. На виконання потоку виділяється квант часу, після завершення якого потік залишає процесорний елемент і знову стає до черги у стані готовності. Це повторюється раз за разом, поки не вийде повний час, потрібний для виконання програмного коду потоку. Процес виконання потоку не є неперервним, оскільки потік оперує даними, по які треба звертатися до пам'яті, здійснювати операції введення/виведення із залученням зовнішніх пристроїв, тощо. Якщо виконання такої операції потребує значного часу, потік звільняє процесорний елемент до завершення виділеного для нього кванту часу, поступаючи наступному у черзі, і після завершення операції займає останнє місце (в залежності від пріоритету) у черзі потоків у стані готовності.

Побудуємо засобами AnyLogic модель комп'ютерної системи з одним процесорним елементом, на якому виконуються два потоки. Відповідна діаграма комп'ютерної системи показана на рис. 1.

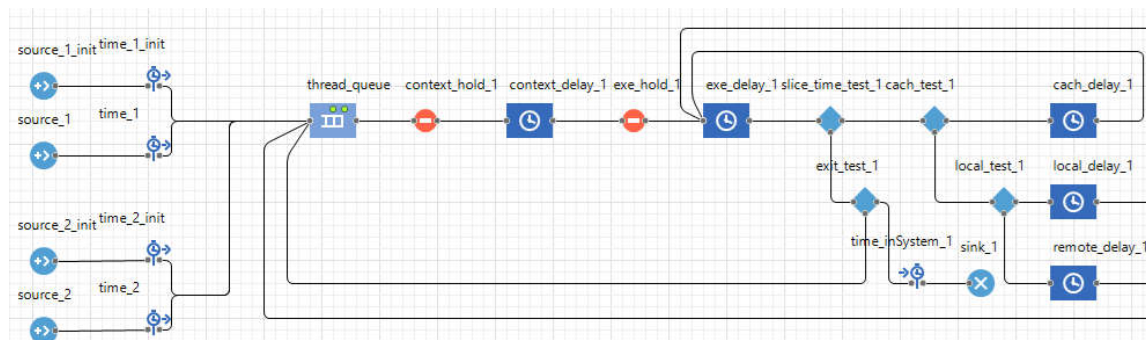


Рисунок 1 – Діаграма виконання двох потоків на одному процесорі

Бібліотека моделювання процесів AnyLogic використовує дискретно-подієвий підхід до моделювання, але кожен динамічний елемент системи, тобто потік є не простим транзактом, а агентом, що має певні властивості, наприклад, номер потоку, рівень пріоритету, час виконання, тощо, та методи, які задають дії над агентом. Припустимо для спрощення, що всі потоки потребують однакового часу на виконання, не потребують взаємодії, а після завершення виконання кожного потоку він видаляється з системи з одночасним введенням у систему такого ж потоку з певного джерела. Тобто в такій системі постійно виконуються два незалежні потоки. Для забезпечення постійної присутності потоку в системі в діаграмі на рис. 1 використано два джерела агентів – блоки source_init для створення самого першого потоку та source для введення до системи наступних потоків за викликом функції inject() при завершенні виконання чергового потоку.

Чергу потоків в стані готовності до виконання моделює блок діаграми thread_queue, а для врахування витрат часу на перемикання контексту при виборі з черги наступного потоку за правилом FIFO (або згідно з пріоритетом агентів) призначений блок context_delay. Для імітації виконання потоку процесорним елементом використовується блок діаграми exe_delay, що затримує потік на певний проміжок часу між послідовними зверненнями до пам'яті.

Нехай потік при виконанні в системі повинен звертатися по необхідні дані до пристроїв пам'яті трьох видів – кеш-пам'яті, локальної пам'яті процесорного елемента та віддаленої пам'яті, яка може використовуватися спільно з іншими процесорними елементами системи. За затримки пам'яті відповідають блоки діаграми cach_delay, local_delay та remote_delay. В разі успіху пошуку даних в кеш- або в локальній пам'яті, потік продовжує виконання в процесорному елементі, а в разі промаху потік звільняє процесорний елемент і після затримки звернення до віддаленої пам'яті стає в чергу до процесорного елемента

у стані готовності до виконання. Потік також звільняє процесорний елемент після закінчення виділеного для потоку кванту часу, або після закінчення повного часу виконання потоку. В першому випадку потік повертається до черги готових до виконання потоків, а в другому – видаляється з системи блоком sink. Логіку роботи процесорного елемента визначають блоки діаграми slice_time_test, exit_test, cach_test та local_test, які змушують агент змінити маршрут проходження системи за ймовірністю або за логічною умовою використовуючи оператори алгоритмічної мови Java.

В разі моделювання системи з великою кількістю потоків та процесорних елементів діаграма, подібна зображеної на рис. 1 стає надто громіздкою. AnyLogic дозволяє об'єднати зв'язані блоки діаграми створивши новий нестандартний блок, що значно спрощує вигляд діаграми системи зберігаючи логіку її функціонування. Створивши нові блоки моделі для джерела потоків та процесорного елемента одержимо спрощену діаграму, зображену на рис. 2.

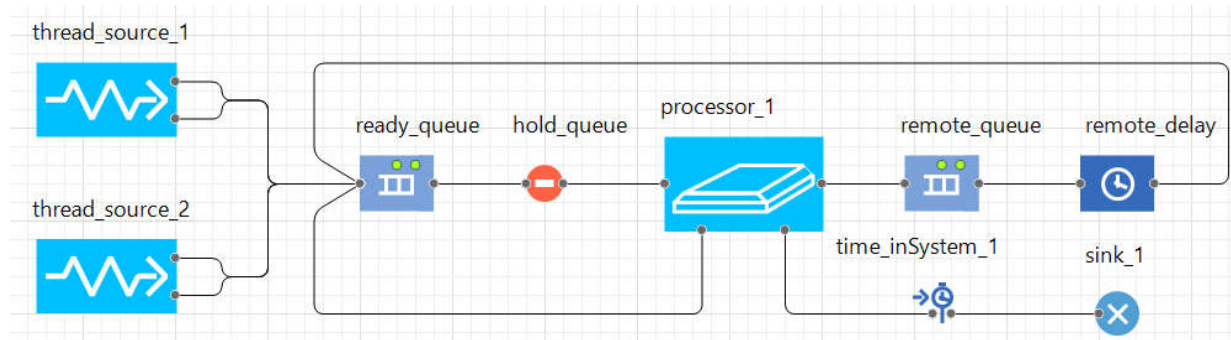
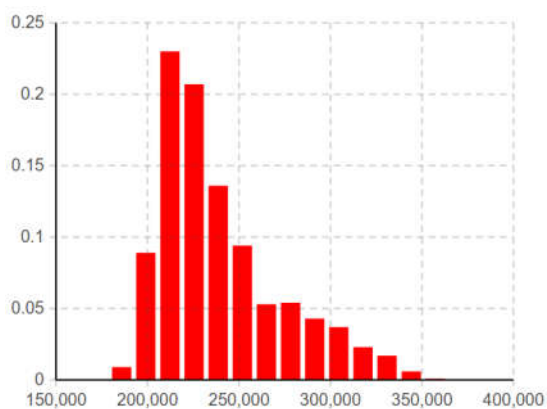


Рисунок 2 – Діаграма з нестандартними блоками

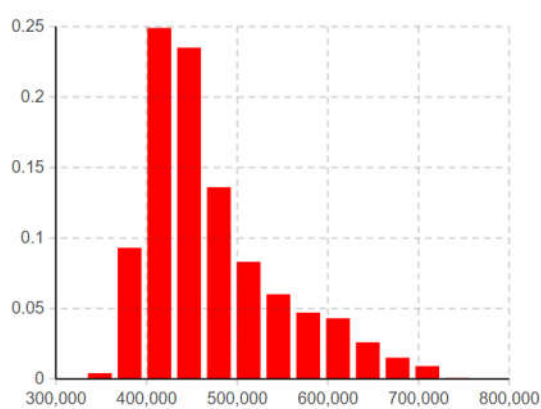
З використанням нових блоків діаграми thread_source та processor можна з легкістю побудувати модель багатопотокової та багатопроцесорної комп'ютерної системи. На рис. 3 показаний розподіл часу на виконання потоку в системі з одним процесорним елементом для різної кількості потоків рівного пріоритету, якщо кожен потік виконується за 100000 тактів. Кожному потоку виділяється для виконання квант часу в 500 тактів, а перемиканню контексту потоків триває 2 такти. Час виконання потоку між двома послідовними зверненнями до пам'яті є випадковою величиною, яка рівномірно розподілена на інтервалі [10, 50] тактів. Затримка звернення до кеш-пам'яті визначається трикутним розподілом випадкової величини на інтервалі [1, 4], затримка локальної пам'яті – трикутним розподілом на інтервалі [8, 32], а затримка віддаленої пам'яті – трикутним розподілом на інтервалі [90, 240] тактів. Частка успішних

звернень до кеш-пам'яті складає 0.85, а частка успішних звернень до локальної пам'яті в разі промаху кеш-пам'яті досягає 0.8.



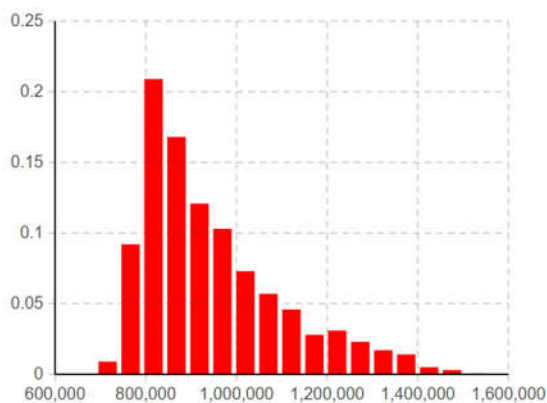
● Розподіл часу виконання потоку в системі 239,577.

а)



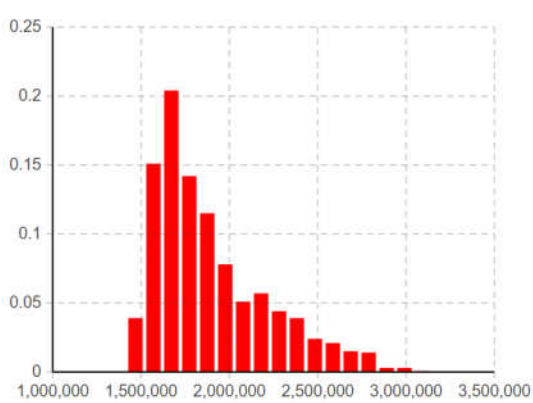
● Розподіл часу виконання потоку в системі 472,592.

б)



● Розподіл часу виконання потоку в системі 945,605

в)



● Розподіл часу виконання потоку в системі 1,892,000

г)

Рисунок 3 –Розподіл часу виконання на одному процесорі:

а) двох, б) чотирьох, в) восьми, г) шістнадцяти потоків

На рис. 4. продемонстровано діаграму моделі системи, в який 16 потоків виконуються на 8-ми процесорних елементах.

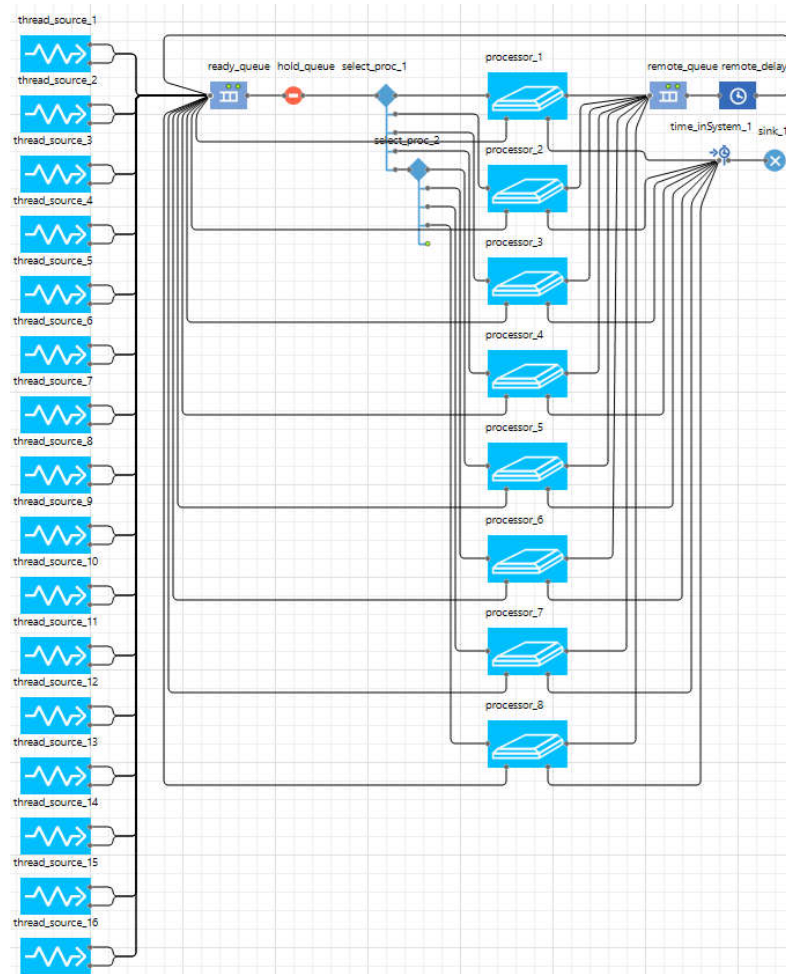
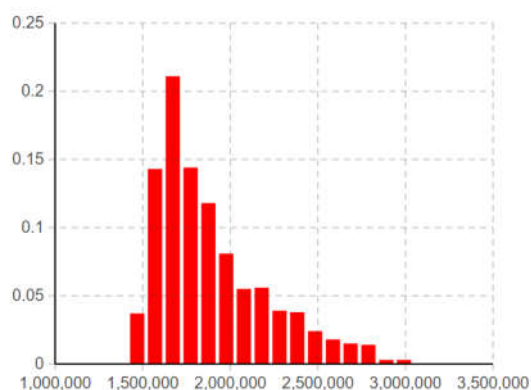
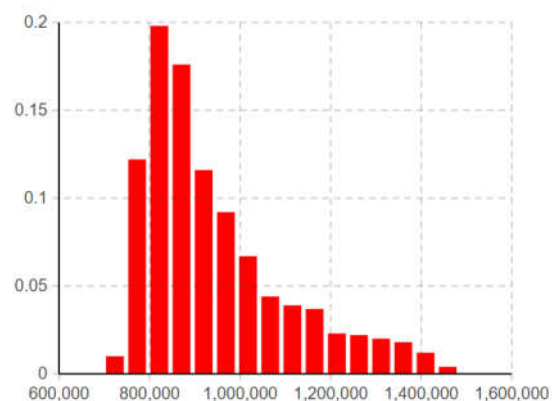


Рисунок 4 – Діаграма виконання 16-ти потоків 8-ми процесорною системою

Розподіл часу на виконання 16 потоків в системі з різною кількістю процесорних елементів показаний на рис. 5.



● Розподіл часу виконання потоку в системі 1,890,000



● Розподіл часу виконання потоку в системі 944,250.

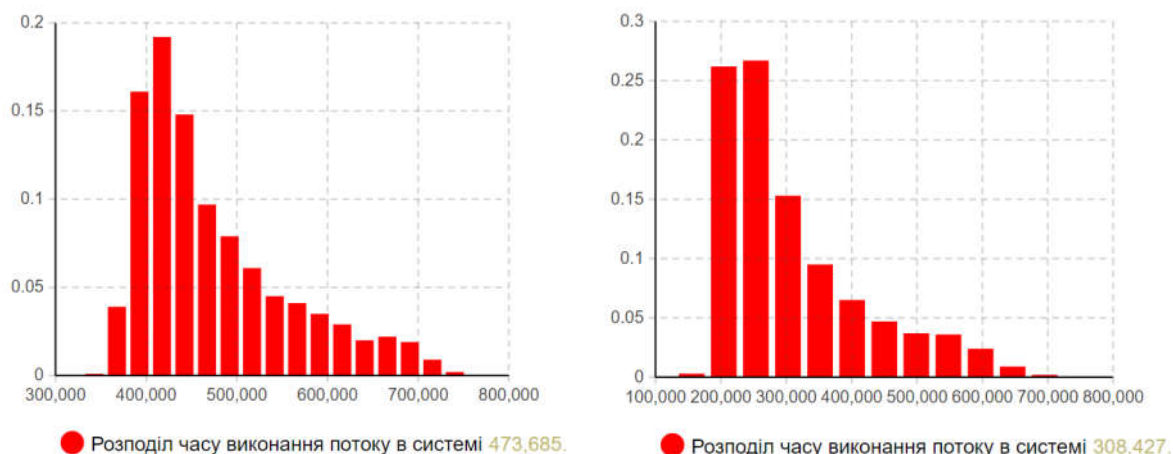


Рисунок 5 –Розподіл часу виконання 16-ти потоків на:

а) одному, б) двох, в) чотирьох, г) восьми процесорах

Висновки. Незважаючи на те, що AnyLogic призначений переважно для моделювання бізнес-процесів, цей програмний інструмент імітаційного моделювання систем загального призначення виявляється дуже корисним при дослідженні комп'ютерних систем. Бібліотека моделювання процесів AnyLogic має всі необхідні елементи для побудови моделей систем обробки інформації, а візуальний підхід до моделювання дозволяє відобразити процес обробки інформації в зручній графічній формі. Діаграма побудованої в роботі моделі комп'ютерної системи достатньо складної архітектури дає наочне уявлення щодо характеру та особливостей процесу обробки інформації, а одержані характеристики комп'ютерної системи – коефіцієнти використання процесорних елементів, динаміка черг, розподіл часу виконання потоків в системі та в окремих її ділянках, тощо, дозволяють визначити найбільш ефективну конфігурацію системи, параметри її елементів та режими її роботи.

REFERENCES

1. Forrier P.J. Computer systems performance evaluation / P.J. Forrier, H.E. Michel. – Elsevier Science, 2003. – P. 541.
2. Jain R. Art of computer systems performance analysis techniques for experimental design measurements simulation and modeling / R. Jain. – Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
3. Harchol-Balter M. Performance modeling and design of computer systems: queueing theory in action / M. Harchol-Balter. – Cambridge Univ. Press, 2013. – P. 574.
4. GPSS World reference manual [Електронний ресурс]: інструкція користувача. – Minuteman Software, 2009. – Режим доступу: <http://www.minutemansoftware.com/reference/>.

5. Arena user guide [Електронний ресурс]: інструкція користувача. – Rockwell Automation Public., 2007. – Режим доступу: <https://www.manualsdir.com/manuals/579995/rockwell-automation-arena-users-guide.html>.
6. Grigoryev I. AnyLogic in three days: modelling and simulation textbook [Електронний ресурс]: підручник. – AnyLogic, 2021. – Режим доступу: <https://www.anylogic.com/resources/books/free-simulation-book-and-modeling-tutorials/>
7. Holland F.C. Simulation of a multiprocessing system using GPSS / F.C. Holland, R.A. Merikallio // IEEE Trans. on Systems and Cybernetics, 1968. – Vol.4, No.4. – P. 395-400.
8. Vlassov V. A queuing model of multithreading: A case study / V. Vlassov, L.-E. Thorelli, A. Kraynikov // KTH Royal Inst. of Technology. – 1996. – P. 1-14.

Received 21.01.2022.

Accepted 24.01.2022.

Simulation modeling of a computer system multithreaded architecture using AnyLogic

The simulation is the most effective way to investigate information processing in computer systems. Computer system simulation is advantageous due to the fact, that such class of systems are well formalized in the form of queuing systems. Any computer system can be considered in terms of queuing system theory as an interconnected set of requests for service, system resources, queues to resources, and rules of service.

The problem with the study of computer systems is that the existing simulation software tools have been developed as universal tools for the study of general purpose systems. There are no specialized libraries or separate modeling tools for the study of computer systems. Therefore, modeling computer systems based on the use of standard libraries of such a modern modeling tool as AnyLogic, and the possible creation of elements of a specialized library is of great importance.

The objective of the paper is to model multithreaded computing in a multiprocessor computer system using AnyLogic software. The designed computer system diagram enables us to have a deep insight into all details of information processing, and the obtained characteristics of the computer system, such as CPU usage coefficients, queue dynamics, distribution of thread execution time in the system, etc., allow us to determine the most effective configuration of the system, the parameters of its elements and operation modes.

Гниленко Олексій Борисович – к.ф.-м.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Gnilenko Alexey Borisovich - Ph.D. Degree in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Dept. of Electronic Computing Machinery, Oles Honchar Dnipro National University.