

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗАСОБАМИ МЕРЕЖ ПЕТРІ З БАГАТОКАНАЛЬНИМИ ПЕРЕХОДАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто теоретичні основи та практичні застосування мереж Петрі з багатоканальними переходами для моделювання паралельних обчислювальних систем. Проаналізовано архітектурні особливості сучасних паралельних обчислювальних платформ та специфіку їх моделювання. Досліджено динаміку багатоканальних переходів, методи аналізу продуктивності та ефективності використання ресурсів у контексті багатоядерних процесорів, графічних прискорювачів та розподілених обчислювальних середовищ.

Ключові слова: мережі Петрі, багатоканальні переходи, паралельні обчислення, моделювання систем, продуктивність

Abstract

Theoretical foundations and practical applications of Petri nets with multi-channel transitions for modeling parallel computing systems are considered. The architectural features of modern parallel computing platforms and the specifics of their modeling are analyzed. The dynamics of multi-channel transitions, methods for analyzing performance and resource utilization efficiency in the context of multi-core processors, graphics accelerators and distributed computing environments are investigated.

Keywords: Petri nets, multi-channel transitions, parallel computing, system modeling, performance

Вступ

Розвиток комп'ютерних технологій характеризується постійним зростанням потреби в паралельній обробці даних, що зумовлено широким впровадженням багатоядерних процесорів, графічних прискорювачів та розподілених обчислювальних систем у всіх сферах комп'ютерної інженерії. Як зазначають українські дослідники в галузі комп'ютерних систем [1], традиційні мережі Петрі, вперше запропоновані німецьким математиком Карлом Адамом Петрі в 1962 році [2], незважаючи на свої потужні можливості для моделювання паралельних процесів, демонструють суттєві обмеження при роботі з системами високого ступеня паралелізму. Саме тому виникла необхідність у розробці модифікованих версій цього формалізму, серед яких особливе місце займають мережі Петрі з багатоканальними переходами, що розширюють класичну модель можливістю одночасної обробки кількох наборів вхідних міток [3].

Основна частина

Паралельні обчислювальні системи характеризуються складною ієрархічною архітектурою, що включає різні рівні паралелізму: від векторних обчислювальних блоків на рівні процесорних ядер до розподілених кластерів з тисячами вузлів. Багатоядерні процесори реалізують паралелізм на рівні потоків виконання, використовуючи спільну пам'ять та складні механізми когерентності кешів. Графічні процесори забезпечують масивний паралелізм через велику кількість простих обчислювальних ядер, оптимізованих для виконання однотипних операцій над різними наборами даних. Розподілені системи поширюють паралелізм на рівень мережевої взаємодії, де окремі вузли обмінюються повідомленнями для координації обчислень. Моделювання таких багаторівневих архітектур вимагає формалізмів, здатних адекватно відобразити як локальний паралелізм всередині окремих компонентів, так і глобальну координацію між ними.

Саме для розв'язання цієї проблеми концептуально розроблено багатоканальні переходи у мережах Петрі, які представляють собою розширення традиційного переходу можливістю паралельної обробки декількох наборів вхідних міток одночасно. Математично така мережа формалізується як кортеж $N = (P, T, F, W, M_0, C)$, де функція $C: T \rightarrow N \cup \{\infty\}$ визначає максимальну кількість каналів для кожного переходу [4]. Центральним у цій моделі є поняття ступеня активації переходу, що характеризує максимальну кількість паралельних спрацювань, дозволує поточним маркуванням системи.

Фундаментальні дослідження Мурати встановили, що ступінь активації переходу t при заданому маркуванні M визначається як найбільше значення k , для якого виконується умова $M(p) \geq k \times W(p, t)$ щодо всіх вхідних позицій p [2]. При цьому реальна ступінь спрацювання обмежується мінімумом між ступенем активації та максимальною кількістю каналів: $\min(d(t, M), C(t))$, де $d(t, M)$ позначає ступінь активації. Така архітектура дозволяє реалізувати два основні режими функціонування: синхронний, при якому всі канали активуються одночасно (що ідеально відповідає SIMD-архітектурі графічних процесорів), та асинхронний, де канали працюють незалежно, моделюючи поведінку багатоядерних процесорів з незалежними потоками виконання [5].

Практична цінність такого підходу проявляється в можливості точного моделювання різних типів паралельних архітектур. Для багатоядерних процесорів багатоканальні переходи дозволяють моделювати конкуренцію за спільні ресурси та синхронізацію потоків [6]. У контексті графічних прискорювачів та GPGPU-систем кількість каналів переходу може досягати тисяч, відображаючи масивний паралелізм таких архітектур [7]. Для розподілених систем ці мережі забезпечують моделювання як локальних обчислень на окремих вузлах, так і міжвузлової комунікації, що є критичним для аналізу масштабованості та ефективності розподілу навантаження в кластерних конфігураціях.

Висновки

Проведений аналіз демонструє, що мережі Петрі з багатоканальними переходами становлять ефективний та універсальний інструментарій для моделювання і аналізу складних паралельних обчислювальних систем. Їх унікальна здатність природним чином відображати різні рівні паралелізму – від локальних обчислювальних ядер до глобальних розподілених кластерів – робить їх незамінними в арсеналі сучасної комп'ютерної інженерії.

Практичне значення таких моделей полягає в можливості комплексного аналізу ефективності використання обчислювальних ресурсів, оптимізації процесів передачі даних та раннього виявлення потенційних вузьких місць системи, що є критично важливим для забезпечення високої продуктивності сучасних паралельних обчислювальних платформ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов О.С., Корнейчук В.І. Комп'ютерні системи та мережі: моделювання та аналіз. — Вінниця: ВНТУ, 2020. — 156 с.
2. Peterson J.L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981. — 290 p.
3. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. — Berlin: Springer, 2009. — 384 p.
4. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications // Proceedings of the IEEE. — 1989. — Vol. 77, No. 4. — P. 541-580.
5. David R., Alla H. Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets. — Berlin: Springer, 2010. — 550 p.
6. Марсан М.А., Бальбо Г. Узагальнені стохастичні мережі Петрі в моделюванні систем / пер. з англ. — К.: Техніка, 2003. — 287 с.
7. Wang J. Timed Petri Nets: Theory and Application. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. — 281 p.

Науковий керівник: **Добровольська Наталія Вікторівна** — доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, dobr_n_v@vntu.edu.ua.

Тушинський Віталій Едуардович — студент групи 1KI-24м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, vitaliytushinskiy03@gmail.com.

Scientific supervisor: **Dobrovolska Nataliia Viktorivna** — Associate Professor Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Tushynskiy Vitaliy Eduardovich — student of group 1KI-24m, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia.