

АНОТАЦІЯ

Кіндзерський О.В. Ідентифікація інтервальних моделей систем програмними агентами бджолоїної колонії у середовищі NVIDIA CUDA. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

У дисертаційній роботі розглянуто науково-технічне розроблення методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем програмними агентами метаевристичного алгоритму бджолоїної колонії у середовищі NVIDIA CUDA. Метою дисертаційної роботи є зниження часової складності методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем програмними агентами метаевристичного алгоритму бджолоїної колонії у середовищі NVIDIA CUDA.

У вступі, наведено актуальність теми дисертаційного дослідження, мета та основні завдання, а також наукова новизна та практична значущість.

У першому розділі проведено детальний огляд проблематики ідентифікацією інтервальних моделей систем. В першому підрозділі розглянуто особливості побудови інтервальних моделей систем. Досліджено, що інтервальні моделі систем забезпечують явне й математично коректне представлення невизначеності у параметрах і входних впливах, надають можливість оцінювати стійкість і працездатність системи щодо збурень і похибок. В наступній частині розділу розглянуто методи параметричної та структурної ідентифікації інтервальних моделей систем. Виявлено обмеження існуючих методів ідентифікації у випадку дискретних моделей. Показано, що такого типу задачі мають NP-складність. Обґрунтовано доцільність застосування метаевристичних методів колективного інтелекту як інструменту глобальної оптимізації для

ідентифікації інтервальних моделей систем. Зокрема, обґрунтовано вибір алгоритму бджолоїної колонії, як базового для подальшої реалізації завдяки його здатності підтримувати множину перспективних рішень, балансувати між пошуком нових областей і локальним уточненням та інтерпретуватися як система агентів, придатних до подальшої програмної реалізації. У заключній частині розділу описано прикладні задачі, що будуть використовуватися для апробації розроблених методів ідентифікації інтервальних моделей систем, та сформульовано науково-технічне завдання, мету та завдання дисертаційного дослідження і наведено висновки на підставі проведеного огляду літературних джерел. Зважаючи на проведений аналіз методів структурної та параметричної ідентифікації моделей систем і виявлені обмеження класичних методів ідентифікації було обґрунтовано доцільність застосування метаевристичних методів колективного інтелекту як інструменту глобальної оптимізації для ідентифікації інтервальних моделей.

У другому розділі проведено аналіз формального представлення задач параметричної і структурної ідентифікації інтервальних моделей систем. Обґрунтовано вибір технології NVIDIA CUDA для організації мультиагентної системи ідентифікації за рахунок масово паралельних обчислень на графічних процесорах. Описано метод паралельних обчислень ідентифікації з застосуванням алгоритму бджолоїної колонії і сформовано гібридну схему CPU–GPU обчислень, де усі керувально-логічні фази АБК виконуються на CPU, а GPU відповідає за масово-паралельне обчислення функції мети для наборів кандидатів. Представлено універсальний шаблон ядра оцінки функції мети з динамічною спеціалізацією та компіляцією під конкретну прикладну модель. У цьому ж розділі, спираючись на розроблений метод паралельних обчислень ідентифікації з застосуванням алгоритму бджолоїної колонії і гібридної схеми CPU–GPU обчислень представлено алгоритмічне забезпечення параметричної та структурної ідентифікації інтервальних моделей систем програмними агентами бджолоїної колонії у середовищі NVIDIA CUDA.

У третьому розділі обґрунтовано архітектурні рішення програмної системи ідентифікації інтервальних моделей на основі алгоритму бджолиної колонії. Описано трирівневу організацію програмної системи – інтерфейс користувача, алгоритмічна бібліотека та обчислювальний CUDA бекенд. В продовженні розділу описано UML-діаграми, що формалізують як статичну структуру, так і динаміку системи. Компонентні та класові моделі відображають межі відповідальності модулів і ключові колаборації; діаграми станів описують життєві цикли контролера АБК і CUDA-виконавця з явними точками відновлення після збоїв; діаграма послідовностей показує конвеєр пакетного оцінювання та місця накладання операцій. Комп'ютерне середовище реалізоване з графічним інтерфейсом, що підтримує керування проєктами, імпорт/експорт CSV/JSON, валідацію параметрів, візуалізацію перебігу пошуку та результатів у реальному часі, профілювання. Відокремлення графічного інтерфейсу від обчислювальної бібліотеки спростило супровід і забезпечило можливість подальшого переходу до кросплатформних інтерфейсів без змін алгоритмічної частини. В завершальній частині розділу описано результати дослідження часової складності розроблених методів і програмних засобів. Показано, що в залежності від складності моделі і розмірності експериментальних даних, GPU-реалізація забезпечує скорочення часу ітерації алгоритму бджолиної колонії порівняно з CPU-реалізацією. Запропоновано та обґрунтовано вибір оптимального параметра чисельності бджолиної колонії залежно від розмірності задачі. На прикладах побудови інтервальних моделей для екологічного моніторингу встановлено закономірність, що для моделей малої розмірності (2-3 коефіцієнти) застосування запропонованої технології та обчислювальних методів є нераціональним. При зростанні розмірності інтервальної моделі до 10 коефіцієнтів та при виборі оптимального параметра чисельності бджолиної колонії – 4096 – спостерігається зменшення часової складності застосування запропонованої технології та обчислювальних методів в понад 45 разів. Встановлено, що чим вища розмірність задачі, тим вища ефективність застосування запропонованої технології та обчислювальних методів.

В четвертому розділі наведено результати апробації розробленої комп'ютерного середовища ідентифікації інтервальних моделей систем для прикладних задач екологічного моніторингу, оцінювання достовірності контенту та реабілітації пацієнтів з порушенням рухливості верхніх кінцівок. Спершу розглянуто прикладні задачі екологічного моделювання шкідливих викидів автотранспорту, а саме побудова одновимірної моделі поширення концентрації окису вуглецю перпендикулярно до дорожнього полотна і побудова двовимірної моделі розподілу концентрації діоксиду азоту, без урахування його поширення на квадратній ділянці на висоті 1,5 над дорожнім полотном. Далі розглянуто моделювання портрету користувача соціальної новинної мережі. Резонансні теми можуть викликати вибухові сплески активності. У такому випадку зростає ризик поширення фейків чи маніпулятивного контенту через підвищену емоційність. У підсумку, особливістю таких спільнот є те, що їхній «портрет» сильно змінюється залежно від характеру новин і контексту, в якому вони з'являються. На основі даної особливості побудовано інтервальну модель, яка надає можливість оцінювання достовірності контенту, який розміщується в зазначеній мережі. Також розглянуто процес реабілітації пацієнтів з порушенням рухливості верхніх кінцівок. Пацієнт, в якого є проблеми з рухами верхніх кінцівок, проходить реабілітацію, під час якої фізіотерапевти вимірюють ключові кути згину суглобів верхніх кінцівок. На основі цих даних побудована моделі динаміки відновлення кутів рухливості суглобів верхніх кінцівок. Дана математична модель дає змогу терапевтам відстежувати відхилення від прогнозу та корегувати сеанси для персоналізації лікування, що допомагає планувати курс реабілітації та зменшувати загальну тривалість на 15-20%.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці комп'ютерного середовища для математичного моделювання систем на основі аналізу інтервальних даних, яке на відміну від існуючих, імплементує інтерпретатор базисних функцій для побудови моделей та об'єднує паралельне функціонування програмних агентів і їх динамічну компіляцію, що у сукупності

спрощує доступ користувача до модулів інтервального моделювання та знижує часову складність побудови моделей.

Ключові слова: інтервальні моделі систем, математична модель, параметрична ідентифікація, структурна ідентифікація, поведінкова модель бджолоїної колонії, інтервальний аналіз даних, GPU, паралельні обчислення, NVIDIA CUDA, обчислювальне моделювання, методи оптимізації, індуктивне моделювання, алгоритми ройового інтелекту.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. М. Dyvak, P. Tyande, O. Kindzerskyi “Mathematical Model of a Social Network User Profile Based on Interval Data Analysis,” International Journal of Computing, vol. 24, no. 3, pp. 452-459, Oct. 2025. ISSN: 2312-538, (0,6 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: побудова математичної моделі профіля користувача соціальної мережі за допомогою алгоритму бджолоїної колонії). doi:10.47839/ijc.24.3.4182

Url: <https://computingonline.net/computing/article/view/4182>

2. М. Дивак, О. Кіндзерський “Архітектура програмного забезпечення структурної та параметричної ідентифікації на основі алгоритму штучної бджолоїної колонії з використанням технології NVIDIA CUDA,” НаукПраці ВНТУ, вип. 2, Чер 2025, ISSN: 2307-5376, (0,7 д.а. / 0,4 д.а.; особистий внесок: спроектовано мультиагентну архітектуру програмного забезпечення ідентифікації інтервальних моделей систем на основі агентів алгоритму бджолоїної колонії). doi:10.31649/2307-5376-2025-2-41-50

Url:

<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/837>

3. М. Дивак, О. Кіндзерський “Дослідження ефективності паралельної обчислювальної схеми ідентифікації інтервальних дискретних моделей на основі ройового інтелекту” Том 331 № 1 (2024): Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, с.29-37 (0,8 д.а. / 0,5 д.а.; особистий внесок: побудова математичних моделей шкідливих викидів автотранспорту, дослідження часової складності послідовної та паралельно реалізації методів параметричної ідентифікації), doi:10.31891/2307-5732-2024-331-3, ISSN: 2307-5732 Url:

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. M. Dyvak, O. Kindzerskyi "Implementation of the structural identification for interval models based on the behavioral model of an artificial bee colony," 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Sibenik, Croatia, 2025, pp.98-101, (0,45 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: реалізовано метод структурної ідентифікації з використанням розробленого раніше CUDA рішення параметричної ідентифікації), doi:10.1109/ACIT65614.2025.11185828, ISSN: 2770-5218
5. M. Dyvak, N. Petryshyn, O. Kindzerskyi, O. Papa, Y. Franko and O. Opalko, "Modeling of the Efficiency of Electricity Generation Processes by a Solar Power Plant Research Using the Example of a 570 W Model," 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Sibenik, Croatia, 2025, pp. 92-97, (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: побудова математичної моделі процесів генерації електроенергії), doi: 10.1109/ACIT65614.2025.11185608, ISSN: 2770-5218
6. M. Dyvak, O. Kindzerskyi "Implementation of Parallel Computation for Identification of Interval Models based on Multi-core Parallelism and CUDA Technology," 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2024, pp.72-76, (0,5 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: реалізовано паралельно обчислювальну схему ідентифікації для паралельних CPU потоків та для CUDA технології), doi: 10.1109/ACIT62333.2024.10712545. ISSN: 2770-5218
7. M. Dyvak, I. Spivak, T. Dyvak, O. Kindzerskyi "Modeling the Interaction of Unmanned Aerial Vehicles in a Swarm as an Object with Distributed Parameters," 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2024, pp.60-66., (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: побудовано математичну модель розміщення рою БПЛА), doi:10.1109/ACIT62333.2024.10712502. ISSN: 2770-5218
8. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, L. Dostalek, M. Stetsko and J. Nowak "Parallel Computations in the Problem of Identification of Interval Discrete Models based on

Swarm Intelligence of a Bee Colony,” 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2023, pp. 23-28, (0,6 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: запропоновано паралельно обчислювальну схему ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії), doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275695, ISSN: 2770-5218

ANOTATION

Kindzerskyi O.V. Identification of Interval System Models by Bee Colony Software Agents in the NVIDIA CUDA Environment. – . Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 – Software Engineering – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The research was carried out at the Department of Computer Sciences of the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation addresses the scientific and technical problem of development of methods for structural and parametric identification of interval system models using software agents of the metaheuristic Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the NVIDIA CUDA environment. The aim of the dissertation is to reduce the time complexity of structural and parametric identification methods for interval system models by employing software agents of the metaheuristic ABC algorithm in the NVIDIA CUDA environment.

In the introduction, the relevance of the dissertation topic is substantiated, the purpose and main objectives are stated, and the scientific novelty and practical significance are outlined.

The first chapter provides a detailed review of the issues related to identifying interval system models. The first subsection discusses the specifics of constructing interval system models. It is shown that interval models ensure an explicit and mathematically correct representation of uncertainty in parameters and input influences and enable assessment of a system's stability and operability under disturbances and errors. In the next part of the chapter, methods for parametric and structural identification of interval system models are considered. The limitations of existing identification methods for discrete models are identified. It is shown that problems of this type are NP-complex. The expediency of applying swarm-intelligence-based metaheuristic methods as instruments of global optimization for identifying interval system models is substantiated. In particular, the Artificial Bee Colony algorithm is justified as the baseline for further implementation due to its ability to maintain a set of promising solutions,

balance exploration of new regions with local refinement, and be interpreted as an agent-based system suitable for subsequent software implementation. In the concluding part of the chapter, application problems to be used for validating the developed methods for identifying interval system models are described, and the scientific and technical task, the purpose, and the objectives of the dissertation research are formulated, together with conclusions based on the literature review. Given the analysis of structural and parametric identification methods and the identified limitations of classical identification techniques, the expediency of applying swarm-intelligence metaheuristic methods as tools for global optimization in interval model identification is justified.

In the second chapter, an analysis of the formal representation of the problems of parametric and structural identification of interval system models is carried out. The choice of NVIDIA CUDA technology for organizing a multi-agent identification system through massively parallel computations on graphics processors is substantiated. A method for parallel identification computations using the Artificial Bee Colony algorithm is described and a hybrid CPU–GPU computation scheme is developed, in which all control-and-logic phases of the ABC algorithm are executed on the CPU, while the GPU is responsible for massively parallel evaluation of the objective function for sets (batches) of candidates. A universal objective-function evaluation kernel template is presented, with dynamic specialization and compilation for a specific applied model. Based on the proposed parallel computation method and the hybrid CPU–GPU scheme, the algorithmic support for parametric and structural identification of interval system models by bee-colony software agents in the NVIDIA CUDA environment is provided.

The third chapter substantiates the architectural decisions of the software system for identifying interval system models based on the Artificial Bee Colony algorithm. A three-tier organization of the software system is described, consisting of the user interface, the algorithmic library, and the CUDA computational backend. The chapter further describes UML diagrams that formalize both the static structure and the dynamic behavior of the system. Component and class models reflect module responsibilities and key collaborations; state diagrams describe the life cycles of the ABC controller and the CUDA executor with explicit recovery points after failures; the sequence diagram

illustrates the batched evaluation pipeline and the places where operations overlap. The computer environment is implemented with a graphical user interface that supports project management, CSV/JSON import/export, parameter validation, real-time visualization of the search process and results, and profiling. Separating the graphical interface from the computational library simplified maintenance and enabled a future transition to cross-platform interfaces without changes to the algorithmic part. The final part of the chapter presents the results of studying the time complexity of the developed methods and software tools. It is shown that, depending on model complexity and the dimensionality of experimental data, the GPU implementation reduces the iteration time of the Artificial Bee Colony algorithm compared to the CPU implementation. The choice of the optimal bee-colony population size parameter is proposed and justified depending on the problem dimension. Using examples of constructing interval models for environmental monitoring, it is established that for low-dimensional models (2–3 coefficients) the application of the proposed technology and computational methods is irrational. When the dimensionality of the interval model increases to 10 coefficients and the optimal bee-colony population size of 4096 is selected, the time complexity of applying the proposed technology and computational methods decreases by more than 45 times. It is found that the higher the problem dimension, the higher the efficiency of the proposed technology and computational methods.

The fourth chapter presents the results of validating the developed computer environment for identifying interval system models on applied problems of environmental monitoring, content credibility assessment, and rehabilitation of patients with impaired upper-limb mobility. First, applied problems of environmental modelling of harmful vehicle emissions are considered, namely, constructing a one-dimensional model of carbon monoxide concentration propagation perpendicular to the roadway and constructing a two-dimensional model of nitrogen dioxide concentration distribution without accounting for its dispersion over a square area at a height of 1.5 m above the roadway. Next, modelling of a social news network user profile is discussed. Resonant topics can cause explosive spikes in activity; in such cases, the risk of spreading fakes or manipulative content increases due to heightened emotionality. As a result, a feature of

such communities is that their “profile” changes substantially depending on the nature of news and the context in which it appears. Based on this feature, an interval model is constructed that enables assessment of the credibility of content posted in the network. Finally, the rehabilitation process of patients with impaired upper-limb mobility is considered. During rehabilitation, physiotherapists measure key joint flexion angles of the upper limbs. Based on these data, a dynamic model of recovery of upper-limb joint mobility angles is built. This mathematical model allows therapists to track deviations from the forecast and adjust sessions to personalize treatment, helping plan the rehabilitation course and reduce the overall duration by 15–20%.

The practical significance of the obtained results lies in the development of a computer environment for mathematical modeling of systems based on interval data analysis which, unlike existing solutions, implements an interpreter of basis functions for model construction and combines parallel operation of software agents with their dynamic compilation. Taken together, this simplifies user access to interval modeling modules and reduces the time complexity of model development.

Keywords: interval system models, mathematical model, parametric identification, structural identification, behavioural model of artificial bee colony, interval data analysis, GPU, parallel computing, NVIDIA CUDA, computational modelling, optimization methods, inductive modelling, swarm intelligence algorithms.

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY THE TOPIC OF THESIS

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation were published:

1. M. Dyvak, P. Tyande, O. Kindzerskyi, “Mathematical Model of a Social Network User Profile Based on Interval Data Analysis,” *International Journal of Computing*, vol. 24, no. 3, pp. 452–459, Oct. 2025. ISSN: 2312-538, (0.6 p.s. / 0.2 p.s.; personal contribution: development of a mathematical model of a social network user profile using the artificial bee colony algorithm). doi:10.47839/ijc.24.3.4182
URL: <https://computingonline.net/computing/article/view/4182>
2. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, “Software Architecture for Structural and Parametric Identification Based on the Artificial Bee Colony Algorithm Using NVIDIA CUDA Technology,” *Naukovi Pratsi of VNTU*, issue 2, Jun. 2025. ISSN: 2307-5376, (0.7 p.s. /

0.4 p.s.; personal contribution: design of a multi-agent software architecture for identifying interval system models based on bee colony algorithm agents). doi:10.31649/2307-5376-2025-2-41-50

URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/837>

3. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, “Study of the Efficiency of a Parallel Computational Scheme for Identification of Interval Discrete Models Based on Swarm Intelligence,” Vol. 331, No. 1 (2024): Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences, pp. 29–37, (0.8 p.s. / 0.5 p.s.; personal contribution: development of mathematical models of harmful motor-vehicle emissions; study of the time complexity of sequential and parallel implementations of parametric identification methods). doi:10.31891/2307-5732-2024-331-3. ISSN: 2307-5732

URL: <https://heraldts.khmnmu.edu.ua/index.php/heraldts/issue/view/2>

Scientific works certifying the approval of the dissertation materials:

4. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, “Implementation of the Structural Identification for Interval Models Based on the Behavioral Model of an Artificial Bee Colony,” in 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Šibenik, Croatia, 2025, pp. 98–101, (0.45 p.s. / 0.3 p.s.; personal contribution: implementation of the structural identification method using the previously developed CUDA-based solution for parametric identification). doi:10.1109/ACIT65614.2025.11185828. ISSN: 2770-5218

5. M. Dyvak, N. Petryshyn, O. Kindzerskyi, O. Papa, Y. Franko, and O. Opalko, “Modeling of the Efficiency of Electricity Generation Processes by a Solar Power Plant Research Using the Example of a 570 W Model,” in 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Šibenik, Croatia, 2025, pp. 92–97, (0.5 p.s. / 0.1 p.s.; personal contribution: development of a mathematical model of electricity generation processes). doi:10.1109/ACIT65614.2025.11185608. ISSN: 2770-5218

6. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, “Implementation of Parallel Computation for Identification of Interval Models Based on Multi-core Parallelism and CUDA Technology,” in 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information

Technologies (ACIT), 2024, pp. 72–76, (0.5 p.s. / 0.3 p.s.; personal contribution: implementation of a parallel computational identification scheme for parallel CPU threads and for CUDA technology). doi:10.1109/ACIT62333.2024.10712545. ISSN: 2770-5218

7. M. Dyvak, I. Spivak, T. Dyvak, O. Kindzerskyi, “Modeling the Interaction of Unmanned Aerial Vehicles in a Swarm as an Object with Distributed Parameters,” in 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2024, pp. 60–66, (0.6 p.s. / 0.1 p.s.; personal contribution: development of a mathematical model of UAV swarm deployment). doi:10.1109/ACIT62333.2024.10712502. ISSN: 2770-5218

8. M. Dyvak, O. Kindzerskyi, L. Dostalek, M. Stetsko, and J. Nowak, “Parallel Computations in the Problem of Identification of Interval Discrete Models Based on Swarm Intelligence of a Bee Colony,” in 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2023, pp. 23–28, (0.6 p.s. / 0.3 p.s.; personal contribution: proposal of a parallel computational identification scheme based on the bee colony algorithm). doi:10.1109/ACIT58437.2023.10275695. ISSN: 2770-5218