УДК 004.942

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-04-12

Барабаш О.В., *д.т.н.,проф. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. bar64@ukr.net*

Колумбет В.П. *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. kvplinux@gmail.com*

Анотація: *Запропоновано предметно-орієнтований підхід до дослідження систем масового обслуговування (СМО). Прийняті рішення спрямовані на підвищення якості дій систем, поліпшення їх організації відповідно до прийнятого критерію якості роботи системи. У рамках цього підходу розробляються нові інтелектуальні моделі, алгоритми, методи та інструментарії, призначені для підтримки прийняття рішень у процесі управління системами масового обслуговування на базі структурного та параметричного аналізу їх характеристик, властивостей та процесів роботи. Це дозволить розширити діапазон досліджуваних умов функціонування інфраструктурних об'єктів, більш точно оцінити досягнуту ефективність функціонування СМО, заощадити ресурси, мінімізувати ризики помилок та збоїв.*

Ключові слова*: системи масового обслуговування, моделювання, інфраструктурні об'єкти, високопродуктивні обчислення*

RESEARCH OF MASS SERVICE SYSTEMS ON THE BASE OF SIMULATION MODELING TAKING INTO ACCOUNT THE MULTI-AGENT APPROACH

Oleg Barabash, *Dr. habil., Prof. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. bar64@ukr.net*

Vadym Kolumbet. *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. kvplinux@gmail.com*

Abstract*: Increasing the efficiency of managing complex objects is most often achieved by intellectualizing their control systems. In this regard, the article proposes a subject-oriented approach to the study of mass service systems (MSS). The number of questions that can be solved with the help of MSS analysis is endless and affects almost all areas of computer science and information technology. Being able to do this kind of analysis with this toolkit is important for those involved in these industries. The study of MSS provides an opportunity to obtain the necessary information and, thus, to prepare grounds for making decisions regarding the mode of operation of the system, improving its organization, etc. The adopted decisions are aimed at improving the quality of the systems' actions, improving their organization in accordance with the accepted criterion of the quality of the system's work. As part of this approach, new intelligent models, algorithms, methods and tools are developed, designed to support decision-making in the process of managing mass service systems based on structural and parametric analysis of their characteristics, properties and work processes. The listed developments are combined into a new specialized decision-making technology. The developed methods and tools for modeling mass service systems can be used in the process of researching various infrastructure objects. For this purpose, digital duplicates of infrastructure objects are being developed. They make it possible to expand the range of studied operating conditions of infrastructure objects. Their use makes it possible to more accurately assess the achieved efficiency of their creation and operation, save resources, minimize the risks of errors and equipment failures, extend the period of stable operation of these objects*

Key words: *mass service systems, modeling, infrastructure objects, high-performance computing.*

Вступ

В даний час дослідження поведінки складно організованих технічних систем масового обслуговування (СМО) на різних етапах їх проектування та функціонування є однією з важливих проблем імітаційного моделювання. Складність динамічної структури СМО обумовлена великою кількістю важливих характеристик функціонування СМО та зв'язків між ними, представлених

функціональними, статистичними, неоднозначними чи іншими відображеннями; існуванням широкого спектра випадкових подій та законів їх розподілу; наявністю обмежень різних видів [1].

СМО використовуються для моделювання процесів обслуговування клієнтів, виробництва, транспортування, зв'язку, обробки інформації, функціонування інфраструктурних об'єктів та інших процесів [2]. Застосування імітаційного моделювання дозволяє суттєво спростити розробку оптимальних режимів їх роботи, а також знаходження та вибір керуючих параметрів. У рамках такого моделювання розробляється імітаційна програма, що відтворює процеси роботи досліджуваної системи, визначаються її вхідні та вихідні параметри, задаються зовнішні дії. Підготовка багатоваріантних розрахунків здійснюється шляхом перебору значень вхідних змінних заданих діапазонах. До кожного варіанта вхідних змінних розраховуються відповідні вихідні змінні. Отримані результати розрахунків оптимізуються. Отже, оптимальні параметри процесів роботи системи обчислюються на основі методу грубої сили. Якість отриманих результатів моделювання багато в чому обумовлена ступенем повноти знань про предметну область досліджуваної системи, а також алгоритмів використовуваних під час вирішення завдань.

Імітаційне моделювання з урахуванням багатоваріантних розрахунків характеризується високою комбінаторною складністю. Це, у свою чергу, призводить до великих витрат оперативної пам'яті та дискового простору, а також значного навантаження на мережу. Тому для отримання якісних результатів моделювання СМО найчастіше потрібне застосування засобів високопродуктивних обчислень. Зазвичай такі кошти надаються центрами колективного використання (ЦКВ). В іншому випадку, необхідно спрощення моделі СМО, що зумовлює зниження якості результатів розв'язання задачі. Використання паралельних чи розподілених обчислень забезпечує підтримку проведення великомасштабних імітаційних експериментів, обробку вихідних даних більшого обсягу та розширення класу розв'язуваних завдань.

Необхідність урахування специфіки роботи СМО та аналізу інформаційних потоків даних актуалізує перехід від традиційної математичної моделі системи до її якісно нового вигляду – цифрового двійника, що містить актуальні дані про весь її життєвий цикл. В даний час такий перехід можливий завдяки стрімкому розвитку інформаційних технологій, збільшенню розмірів систем зберігання даних та суттєвому зростанню продуктивності обчислювальних систем, необхідному для обробки великих даних та ефективного отримання знань.

Цій тематиці було присвячено ряд сучасних робіт зарубіжних та вітчизняних вчених. Серед них зокрема варто виділити таких дослідників: Адамцев Д.Ю., Помазун О.М., Ланде Д.В., Страшной Л., Балагура І.В., Скулиш М.А. Аналіз наукових праць з імітаційного моделювання, методів підтримки прийняття рішень, мультиагентних підходів пов'язаних з темою дослідження, дозволяє зробити висновок, що користувачі можуть вибирати з доступних інструментів моделювання, які відрізняються точністю уявлення реального світу і ефективністю.

В роботі [3] розглядаються інструментальних засобів автоматизованого проектування комплексу технічних засобів інформаційної системи. Розкривається комплекс проблем, які виникають під час проектування комплексних систем захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах. Здійснено огляд загальних підходів до створення комплексних систем захисту інформації. Запропоновано загальний методологічний підхід до проектування систем захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах. Але, дані засоби та методи не враховують специфіку предметних областей досліджуваних систем.

В роботі [4] запропоновано методику формування, кластеризації, ранжирування та подальшої візуалізації спрямованих кореляційних мереж, зв’язки яких визначаються на основі рядів динаміки, що відповідають цим поняттям. Розглянуто часові ряди динаміки вживання термінів, що формуються сервісом Google Books Ngram Viewer для формування кореляційної мережі наукових понять, і часові ряди динаміки захворюваності на коронавірус у різних країнах для формування та кластеризації мережі країн за ознакою подібності відповідних статистичних рядів. Але, ця методика не повною мірою вирішує поставлене завдання та запропоновані інструментарії не повною мірою використовують доступні потужності обчислювального середовища.

В роботі [5] досліджувались процеси підтримки прийняття рішень у системі управління виробничо-збутовим процесом. Для багатокритеріальної оцінки варіантів з використанням апарату нечітких множин обрано вид функцій загальної корисності та корисності локальних критеріїв. Данна методика не повною мірою вирішує поставлене завдання, є

вузькоспеціалізованою та не має усіх необхідних функціональних можливостей для вирішення поставлених питань.

В статті [6] запропоновано систему підтримки прийняття рішень щодо підвищення рівня інформаційної безпеки. Розроблено систему підтримки прийняття рішень, що дозволяє засобами системного підходу та ER-моделювання суттєво підвищити рівень інформаційної безпеки. Данна система не враховує специфіку предметних областей досліджуваних систем та запропоновані інструментарії не повною мірою використовують доступні потужності обчислювального середовища.

Отже, на підставі проведеного аналізу виявлено, що існуючі методи не повною мірою вирішують поставлене завдання та більшість інструментів не використовують доступні потужності обчислювального середовища та не враховують специфіку предметних областей досліджуваних систем, а також не забезпечують сервіс-орієнтований інтерфейс, що є важливим компонентом сучасних засобів моделювання.

Найчастіше відомі в даний час засоби імітаційного моделювання СМО у високопродуктивному обчислювальному середовищі або є вузькоспеціалізованими, які не мають усіх необхідних функціональних можливостей для вирішення зазначених вище проблем, або входять до складу дорогого програмного забезпечення і через це недоступні широкому колу кінцевих користувачів.

Виконання досліджень

Метою статті є запропонувати новий підхід до дослідження СМО, що базується на комплексному застосуванні методів концептуального програмування, інженерії знань, штучного інтелекту, багатокритеріальної оптимізації, паралельних та розподілених обчислень, віртуалізації ресурсів, а також мультиагентних та сервіс-орієнтованих технологій. Проаналізувати особливості зазначеного підходу та розробити практичні рекомендації щодо його застосування. Розглянуто архітектуру та принципи функціонування системи специфікації та моделювання процесів функціонування СМО.

Розробники програмного забезпечення для дослідження складних систем шляхом їх імітації відзначають такі його необхідні властивості, як підтримка часткової автоматизації складання моделей, їх верифікація та валідація, налаштування моделі на конкретну предметну область, реалізація комбінованого моделювання або гібридного моделювання, збір та обробка слабоструктурованих даних, їх реформування у структури, які використовуються моделлю, оптимізаційний аналіз результатів розрахунків.

Крім того, оскільки імітаційне моделювання веде до великих тимчасових та ресурсних витрат, потрібне використання високопродуктивної обчислювальної техніки, доступ до якої з боку користувачів має бути зручним та гнучким. Сервіс-орієнтована парадигма програмування дозволяє успішно реалізувати такий доступ.

Слід зазначити, що для ефективного проведення експериментів з імітаційними моделями у високопродуктивному обчислювальному середовищі має бути складена відповідна методика виконання досліджень.

Розглянута у статті технологія та моделювання процесів функціонування СМО повною мірою враховують вищезазначені вимоги. Дана методика виконання досліджень базується на спільному та узгодженому використанні методів автоматизації конструювання та застосування імітаційних моделей мовою GPSS на основі парадигм концептуального, модульного, каркасного та сервіс-орієнтованого програмування, інженерії знань, високопродуктивних обчислень та мультиагентних систем, а також методів аналізу експериментальних даних на основі дискретної багатокритеріальної оптимізації.

Цифровий двійник досліджуваної СМО базується на імітаційному моделюванні процесів її роботи за сукупністю ретроспективних та поточних даних. Цифрові двійники будуть використовуватись для розробки та налагодження нових стратегій управління СМО на основі оптимізаційного аналізу результатів багатоваріантних розрахунків [7]. Реалізація агентного моделювання у процесі дослідження реальної дозволить здійснювати верифікацію та валідацію імітаційної моделі шляхом напівнатурного моделювання.

В рамках агентного моделювання суб'єкти, пов'язані із забезпеченням експлуатації об'єкта та споживанням ресурсів і послуг наданих їм, делегують агентам свої права та обов'язки. Суб'єкти можуть задавати критерії ефективності функціонування об'єкта, які можуть бути

суперечливими. Агентний підхід дозволить враховувати та на основі багатокритеріальної оптимізації узгоджувати переваги суб'єктів, пов'язаних з об'єктом, у процесі його моделювання.

Багатоваріантні розрахунки виконуватимуться у обчислювальному середовищі, що об'єднує виділені та невиділені ресурси. Для керування виділеними ресурсами обрано програмний комплекс OpenStack, який забезпечує взаємодію з різними гіпервізорами (KVM, Xen, QEMU та ін.), а також із системами керування контейнерами (Docker та ін.). На базі цього комплексу створено новий менеджер віртуальних машин. Цей менеджер підтримує можливість запуску завдань із виконання віртуальних машин із загальних черг (наприклад, PBS, SLURM) на невиділених ресурсах суперкомп'ютерів ЦКВ [9]. Віртуальні машини, запущені на виділених та невиділених ресурсах для прогону екземплярів моделі в паралельному режимі, підключатимуться до єдиного віртуалізованого середовища, організованого на основі технології Virtual Private Network (VPN).

Елементарні функціональні можливості цифрових двійників та агентів будуть представлені у вигляді мікросервісів. Такий підхід дозволить організувати взаємодію між вищезгаданими віртуальними сутностями на базі ефективних мережевих протоколів та спростить процеси додавання нових та модифікацію існуючих двійників та агентів. Залишаються незрозумілими відповіді на конкретні питання, що саме треба зробити - збільшувати кількість каналів або збільшувати їхню пропускну здатність, або збільшувати кількість місць у черзі? Щоб оцінити чутливість кожного показника до зміни значення певного параметра, використовуємо такий підхід: фіксуємо всі параметри крім одного, обраного. Потім знімаємо значення всіх показників при декількох значеннях цього обраного параметра. Звичайно, доводиться повторювати знову й знову процедуру імітації й усереднювати показники при кожнім значенні параметра, оцінювати точність. Але в результаті виходять надійні статистичні залежності показників від параметра [10]. Наприклад, для 6 показників можна одержати 6 залежностей від одного параметра: залежність імовірності відмов $P_{\text{відм.}}$ від кількості місць у черзі (СМО), залежність пропускної здатності A від кількості місць у черзі, і так далі [12]. Залежність показників від параметрів СМО відображено на рис. 1.

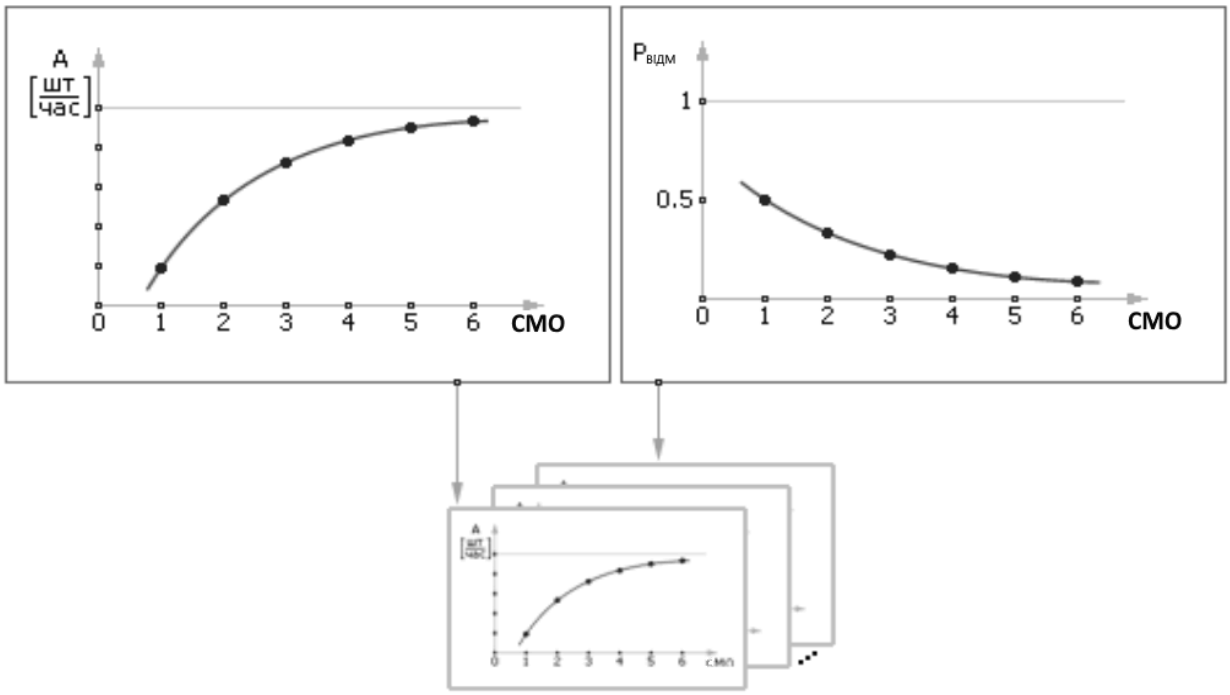

Рис. 1. Залежність показників від параметрів СМО

Потім так само можна зняти ще 6 залежностей показників P від іншого параметра R, зафіксувавши інші параметри і так далі. Утвориться своєрідна матриця залежностей показників P від параметрів R, по якій можна провести додатковий аналіз про перспективи поліпшення показників у ту або іншу сторону. Нахил кривих добре показує чутливість, ефект від руху по

певному показнику. Таку матрицю називають якобіаном J, у якій роль нахилу кривих грають значення похідних $\Delta P_i \,/\Delta R_j$ (рис. 2).

Якщо показників 6, а параметрів, наприклад, 5, то матриця має розмірність 6 х 5. Кожен елемент матриці - крива, залежність $i-$го показника від $j-$го параметра. Кожна крапка кривої - середнє значення показника на досить представницькому відрізку Тн або усереднено по декількох експериментах. Варто розуміти, що криві знімалися в припущенні того, що всі параметри крім одного в процесі їхнього зняття були незмінні. Тому, якщо на підставі розгляду знятих кривих приймається рішення про те, що деякий параметр буде в СМО змінений, те всі криві для нової крапки, у якій знову буде досліджуватися питання про те, який параметр варто змінити, щоб поліпшити показники, варто знімати заново. Так крок за кроком можна спробувати поліпшити якість системи.

$$\|J\| = \begin{vmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & \cdots & J_{1,6} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & \cdots & J_{2,6} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & \cdots & J_{5,6} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\Delta P_1}{\Delta R_1} & \frac{\Delta P_1}{\Delta R_2} & \frac{\Delta P_1}{\Delta R_3} & \cdots & \frac{\Delta P_1}{\Delta R_6} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\Delta P_5}{\Delta R_1} & \frac{\Delta P_5}{\Delta R_2} & \frac{\Delta P_5}{\Delta R_3} & \cdots & \frac{\Delta P_5}{\Delta R_6} \end{vmatrix} =$$

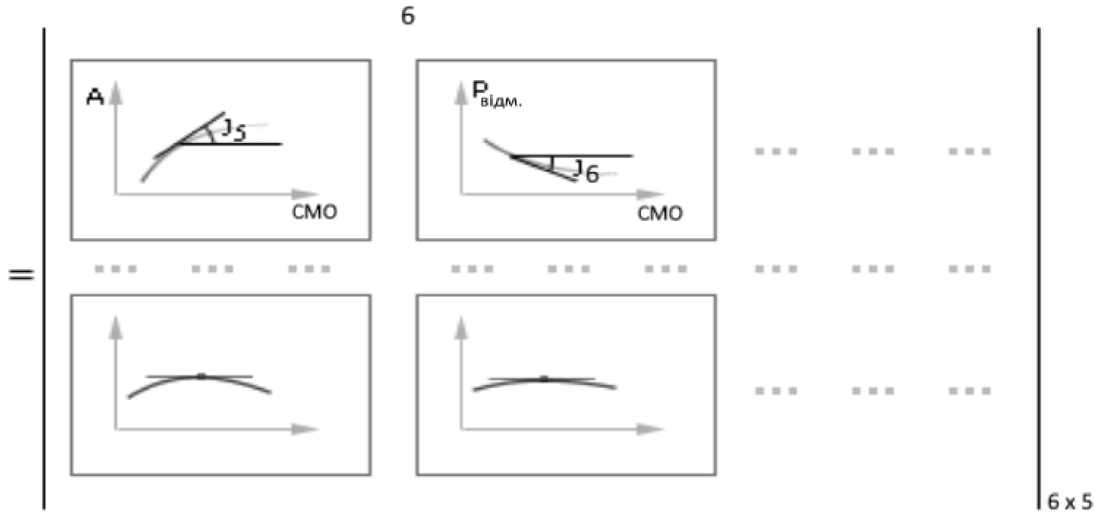

Рис. 2. Матриця чутливостей показників залежно від зміни параметрів СМО

Для доступу до розроблених засобів у процесі підготовки та проведення експериментів кінцеві користувачі будуть забезпечені веб-орієнтованим інтерфейсом [13]. До таких осіб можна віднести: різних категорій: розробники програмного забезпечення, адміністратори інформаційно-обчислювальних ресурсів, експерти з прийняття рішень щодо оптимізації функціонування інфраструктурних об'єктів на основі результатів їх моделювання та інші особи. Оптимізаційна постановка завдання у рамках такого дослідження наведена нижче.

Нехай $x = (x_1 1, x_2, \ldots, x_c)$ – це вектор економічних показників споживання ресурсів (електроспоживання, теплопостачання, споживання води тощо) у процесі експлуатації інфраструктурного об'єкта у період τ. Стан технічних, що використовуються об'єктом, представлено вектором $b = (b_1, b_2, \ldots, b_v)$ булевих змінних. Елемент $b_i = 0\,(b_1 = 1)$ означає, що $i-$й пристрій виключено (включено), $i \in 1, l$.

Характеристики пристроїв представлені множиною параметрів $C = \{c_1, c_2, \ldots, c_h\}$. На множині C визначено множину операцій $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_w\}$. Операція $f \in F$ забезпечує розрахунок необхідних цільових параметрів C за початковими даними, також представлених параметрами C.

Виділимо у множині C підмножини параметрів, що відображають експлуатаційні показники та керуючі параметри об'єкта. Ці підмножини параметрів представимо векторами $q = (q_1, q_2, \ldots, q_p)$ та $u = (u_1, u_2, \ldots, u_r)$.

Поточні показники довкілля об'єкта відображені речовою матрицею O розмірності $m \times n$. Елемент матриці o_{ij} містить значення $i-$го показника в j годину періоду τ. Ретроспективні показники навколишнього середовища аналогічно представлені речовою матрицею Y такої ж розмірності.

Відобразимо цільову функцію у такому вигляді:

$$y\,(x\,,\tau,O,Y,b\,v)\;=\sum_{i-1}^{n}x_i\;\rightarrow\;min,$$
$$h_j\,(b)=\;0,q_s\;\rightarrow\;min\,(max),$$
$$q_s^{min}\;\leq q_s\leq\;q_s^{max}\,,s\;=\overline{1,p}\,,$$

де $h_1(b), h_2 2(b), \ldots, h_o(b)$ – це булеві функції, що накладають обмеження на спільне використання технічних пристроїв, $q_s \rightarrow min(max)$ – умова оптимальності $s-$го експлуатаційного показника, q_s^{min} та q_s^{max} – його граничні значення, $v = (v_1, v_2, \ldots, v_z)$ - Вектор вхідних параметрів моделі, $v_t \in C, t = 1, z$.

Збір, уніфікацію, агрегування, зберігання та передачу даних про роботу інфраструктурного об'єкта здійснюватиме спеціальна система моніторингу інформаційно-обчислювальних систем, адаптована до обслуговування об'єктів даного виду.

Визначення оптимальних значень експлуатаційних показників здійснюється шляхом прогону екземплярів моделі з різними варіантами її вхідних параметрів з подальшим застосуванням правил дискретного багатокритеріального вибору [14]. Якщо оптимальному варіанту експлуатаційних показників відповідає кілька варіантів вхідних змінних моделі, то вибір оптимального варіанту проводиться за допомогою тих самих правил.

Висновки

Запропоновано новий підхід до дослідження СМО, що базується на комплексному застосуванні методів концептуального програмування, інженерії знань, штучного інтелекту, багатокритеріальної оптимізації, паралельних та розподілених обчислень, віртуалізації ресурсів, а також мультиагентних та сервіс-орієнтованих технологій. Проаналізовано особливості зазначеного підходу та розроблено практичні рекомендації щодо його застосування. Проведено дослідження можливості створення моделей, алгоритмів, методів та інструментів, призначених для інтелектуальної підтримки прийняття рішень у процесі управління СМО на базі структурного та параметричного аналізу їх характеристик, властивостей та процесів роботи. На основі результатів дослідження показано нову модель підтримки прийняття рішень, що базується на багатокритеріальному аналізі результатів імітації роботи досліджуваних систем у обчислювальному середовищі, яка складається з різнорідних високопродуктивних ресурсів. Таке середовище може містити ресурси центрів колективного користування, включаючи суперкомп'ютери. Представлені методи та засоби моделювання СМО можуть бути застосовані у процесі дослідження інфраструктурних об'єктів, що, у свою чергу, дозволить суттєво покращити економічні показники функціонування досліджуваних об'єктів.

Література

1. Uhlemann T.H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 335–340. doi:10.1016/ j.procir.2016.11.152

2. Омельяненко В.А. Мультиагентний підхід до розробки інтелектуальних систем управління проектами. *Управління проектами та розвиток виробництва*, 2016. № 3 (59). С. 5–13.

3. Кобозєва А.А. Розробка інструментальних засобів автоматизованого проектування комплексу технічних засобів інформаційної системи. *Кібербезпека в Україні: правові та організаційні питання*. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 26 листопада 2020 р. Одеса. 2021. С. 86–89.

4. Ланде Д.В., Страшной Л., Балагура І.В. Метод формування та кластеризації кореляційних мереж понять. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2021, Т. 23, № 2. С. 27–36.

5. Адамцев Д.Ю., Прокопенко Д.І. Підтримка прийняття рішень у системі управління виробничо-збутовим процесом. *Automation and development of electronic devices*, 2021, Part 2. С. 139–143.

6. Азарова А., Дьогтєва І., Шиян А. Система підтримки прийняття рішень щодо підвищення рівня інформаційної безпеки підприємства. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2022. Вип. 53, № 1. С. 12–18.

7. Скулиш М.А. Математична модель пошуку оптимального обсягу ресурсів віртуального вузла обслуговування. *Сучасні інформаційні системи*, 2018. Том 2, № 2. С. 30-34. doi: 10.20998/2522-9052.2018.2.05

8. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. № 11. P. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
9. Касілов О.В., Крамська К.І. Моделі і метод синтезу агентної інформаційно-пошукової системи. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 2. С. 94–99. doi:10.20998/2522-9052.2020.2.14
10. Iafrate F. A Journey from Big Data to Smart Data. Proceedings of the Second International Conference on Digital Enterprise Design and Management. Springer, Cham, 2014. P. 25–33. doi: 10.1007/978-3-319-04313-5_3.
11. Kolumbet, V., Svynchuk, O. Multiagent methods of management of distributed computing in hybrid clusters. Сучасні інформаційні системи. 2022. Т. 6, № 1. С. 32–36. doi:10.20998/2522-9052.2022.1.05
12. Додонов О.Г., Коваль О.В., Сенченко В.Р., Шпурик В.В. Автоматизована система формування сценарію аналітичної діяльності. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2019, Т. 21, № 1. С. 11–22.
13. Помазун О.М. Особливості побудови групової системи підтримки прийняття рішень з реінжинірингу бізнес-процесів. *Вісник Запорізького національного університету*, 2009, № 1 (4). С. 83–88.
14. Кучук Г.А., Коваленко А.А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*, 2018. Том 2, № 1. С. 22–27. doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.04

References

1. Uhlemann T.H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 335–340. doi:10.1016/ j.procir.2016.11.152
2. Omelyanenko V.A. Multiagentnij pidhid do rozrobki intelektualnih sistem upravlinnya proektami. [A multi-agent approach to the development of intelligent project management systems]. *Upravlinnya proektami ta rozvitok virobnictva*, 2016. № 3 (59). pp. 5–13. [in Ukrainian].
3. Kobozyeva A.A. Rozrobka instrumentalnih zasobiv avtomatizovanogo proektuvannya kompleksu tehnichnih zasobiv informacijnoyi sistemi. [Development of tools for automated design of a complex of technical means of the information system]. *Kiberbezpeka v Ukrayini: pravovi ta organizacijni pitannya*. Materiali mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi, 26 listopada 2020. Odesa. 2021. pp. 86–89. [in Ukrainian].
4. Lande D.V., Strashnoj L., Balagura I.V. Metod formuvannya ta klasterizaciyi korelyacijnih merezh ponyat. [Method of formation and clustering of correlation networks of concepts. Registration, storage and processing of data]. *Reyestraciya, zberigannya i obrobka danih*, 2021, Vol. 23, № 2. pp. 27–36. [in Ukrainian].
5. Adamcev D.Yu., Prokopenko D.I. Pidtrimka prijnyattya rishen u sistemi upravlinnya virobnicho-zbutovim procesom. [Decision-making support in the production and sales process management system]. *Automation and development of electronic devices*, 2021, Part 2. pp. 139–143. [in Ukrainian].
6. Azarova A., Dogtyeva I., Shiyan A. Sistema pidtrimki prijnyattya rishen shodo pidvishennya rivnya informacijnoyi bezpeki pidpriyemstva. [Decision support system for increasing the level of information security of the enterprise]. *Informacijni tehnologiyi ta komp'yuterna inzheneriya*, 2022. Vol. 53, № 1. pp. 12–18. [in Ukrainian].
7. Skulish M. A. Matematichna model poshuku optimalnogo obsyagu resursiv virtualnogo vuzla obslugovuvannya. [Mathematical model of finding the optimal amount of resources of a virtual service node]. *Suchasni informacijni sistemi*, 2018. Vol. 2, № 2. pp. 30–34. doi: 10.20998/2522-9052.2018.2.05 [in Ukrainian].
8. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. № 11. P. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
9. Kasilov O.V., Kramska K.I. Modeli i metod sintezu agentnoyi informacijno-poshukovoyi sistemi. [Models and method of synthesis of agent information and search system]. *Suchasni informacijni sistemi*. 2020. Vol. 4, № 2. pp. 94–99. doi:10.20998/2522-9052.2020.2.14 [in Ukrainian].
10. Iafrate F. A Journey from Big Data to Smart Data. Proceedings of the Second International Conference on Digital Enterprise Design and Management. Springer, Cham, 2014. P. 25–33. doi: 10.1007/978-3-319-04313-5_3.
11. Kolumbet, V., Svynchuk, O. Multiagent methods of management of distributed computing in hybrid clusters. Advanced Information Systems. 2022. Vol. 6, № 1. pp. 32–36. doi:10.20998/2522-9052.2022.1.05 [in English].
12. Dodonov O.G., Koval O.V., Senchenko V.R., Shpurik V.V. Avtomatizovana sistema formuvannya scenariyu analitichnoyi diyalnosti. [Automated system for creating a scenario of analytical activity]. Reyestraciya, zberigannya i obrobka danih, 2019, Vol. 21, № 1. pp. 11–22. [in Ukrainian].
13. Pomazun O.M. Osoblivosti pobudovi grupovoyi sistemi pidtrimki prijnyattya rishen z reinzhiniringu biznes-procesiv. [Peculiarities of building a group decision support system for business process reengineering]. *Visnik Zaporizkogo nacionalnogo universitetu*, 2009, № 1 (4). pp. 83–88. [in Ukrainian].
14. Kuchuk G.A., Kovalenko A.A. Metodi sintezu informacijnoyi ta tehnichnoyi struktur sistemi upravlinnya ob'yektom kritichnogo zastosuvannya. [Methods of synthesizing the information and technical structures of the critical application facility management system]. *Suchasni informacijni sistemi*, 2018. Vol. 2, № 1. pp. 22–27. doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.04 [in Ukrainian].