

СТЕПАНОВ Дмитро

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-7283-5174>

e-mail: dmytro.s.stepanov@lpnu.ua

СЕНІВ Максим

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1044-4628>

e-mail: maksym.m.seniv@lpnu.ua

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ ДЛЯ ВЕБ-ПОРТАЛІВ ЗА РЕСУРСАМИ ТА ПРОДУКТИВНІСТЮ

В умовах стрімкого зростання складності веб-порталів і навантаження на ІТ-інфраструктуру актуальним є завдання ефективного управління ресурсами з метою досягнення високої продуктивності та доступності сервісів. Недостатньо оптимізоване розміщення контейнерів може призводити до нерівномірного навантаження на сервери, зниження продуктивності, надлишкових витрат ресурсів і зростання часу відгуку.

Метою дослідження є удосконалення методу оптимального розміщення контейнерів веб-порталів, що базується на аналізі наявних ресурсів інфраструктури та вимог до продуктивності веб-порталів. Запропоноване удосконалення передбачає врахування динамічних характеристик навантаження, продуктивності, стабільності середовища, часу відновлення, обмежень фізичних ресурсів серверів та мережевих компонентів, що дозволить визначити оптимальну конфігурацію розміщення контейнерів на основі багатокритеріальної оптимізації.

Очікуваними результатами роботи є скорочення часу відновлення та забезпечення стабільної роботи веб-порталів в умовах змінних навантажень. Практичне значення полягає в можливості застосування удосконаленого методу для автоматичного керування інфраструктурою веб-порталів, що дозволить значно скоротити витрати на утримання ІТ-інфраструктури та підвищити якість послуг, що надаються кінцевим користувачам.

Ключові слова: контейнеризація, веб-портали, продуктивність, стабільність, розподілені системи, управління ресурсами, час відновлення.

STEPANOV Dmytro, SENIV Maksym

Lviv Polytechnic National University

METHOD FOR OPTIMAL CONTAINER PLACEMENT FOR WEB PORTALS BASED ON RESOURCES AND PERFORMANCE

In the context of the rapid growth in the complexity of modern web portals and the increasing pressure on IT infrastructure, the issue of efficient resource allocation has become a central challenge in maintaining high system performance, reliability, and service availability. The dynamic and often unpredictable nature of user interactions, combined with fluctuating traffic patterns and the proliferation of microservices, places immense demands on container orchestration systems. Inefficient container placement strategies can result in suboptimal utilization of computational resources, disproportionate server load distribution, higher energy and operational costs, latency spikes, and ultimately, a degraded user experience.

This research focuses on enhancing the method of optimal container placement specifically tailored for web portal environments. The proposed approach builds upon traditional optimization techniques by integrating dynamic and context-aware metrics, including real-time load variability, application-specific performance indicators, environmental stability measures, system recovery time objectives (RTOs), hardware limitations of physical servers, and network topology constraints. By leveraging multi-criteria decision-making and optimization models, the method seeks to find a balance between performance efficiency and resource conservation.

The expected outcomes of the study are twofold: firstly, to significantly reduce the mean time to recovery (MTTR) in the event of system disruptions; and secondly, to ensure the consistent, high-quality operation of web portals even under volatile load conditions. The practical contribution of the proposed method lies in its applicability for automated infrastructure management, offering a scalable and adaptive solution for cloud and on-premise environments. This results in reduced IT operational costs, improved service delivery, and increased end-user satisfaction. Furthermore, the method provides a foundation for future advancements in intelligent orchestration and self-healing infrastructure systems.

Keywords: containerization, web portals, performance, stability, distributed systems, resource management, recovery time.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким поширенням контейнерних технологій, які є основою сучасної ІТ-інфраструктури для підтримки стабільної роботи веб-порталів. В умовах зростання кількості користувачів і динамічного збільшення навантаження, управління ресурсами контейнерів набуває особливої актуальності. Веб-портали, як важливий клас програмних систем,

вимагають високої доступності, стабільності середовища, швидкого часу відновлення після збоїв та максимальної ефективності розгортання.

Існуючі методи розміщення контейнерів не завжди враховують усі важливі параметри, такі як динамічні коливання навантаження, балансування ресурсів між різними вузлами системи та оптимальне використання обчислювальних потужностей. Це призводить до нерівномірного розподілу навантаження, зниження продуктивності системи, додаткових витрат ресурсів і, відповідно, збільшення часу реакції веб-порталів.

Таким чином, існує гостра необхідність в удосконаленні методів оптимального розміщення контейнерів, які враховуватимуть не лише статичні параметри, а й динамічні характеристики ресурсів та навантаження. Вирішення цієї проблеми дозволить значно підвищити стабільність середовища, скоротити час відновлення у випадку відмов і забезпечити стабільно високу продуктивність веб-порталів у реальних умовах експлуатації.

Саме тому тематика цього дослідження є актуальною як з наукової точки зору, так і для практичного впровадження у сфері IT-інфраструктури, оскільки розробка ефективних рішень дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики контейнерних веб-порталів та оптимізувати витрати на їх підтримку і розвиток.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Об'єкт дослідження – процес розміщення контейнерів у розподілених обчислювальних середовищах.

Предмет дослідження – методи та засоби оптимального розміщення контейнерів у розподілених середовищах з урахуванням ресурсних обмежень, характеристик навантаження, вимог до продуктивності веб-порталів, стабільності середовища, часу відновлення та ефективності розгортання.

Мета роботи – аналіз, визначення та удосконалення методу оптимального розміщення контейнерів у розподіленому середовищі, що забезпечує функціонування веб-порталів, з урахуванням продуктивності системи, стабільності середовища, часу відновлення та ефективності використання інфраструктурних ресурсів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. *Проаналізувати існуючі підходи* до розміщення контейнерів у розподілених середовищах, їхні переваги та недоліки в контексті продуктивності та стабільності веб-порталів.
2. *Визначити критичні параметри*, що впливають на ефективність розміщення контейнерів, зокрема: навантаження, доступність ресурсів, час відновлення та особливості інфраструктури.
3. *Розробити модель оцінювання оптимальності розміщення* контейнерів, яка враховує одночасно продуктивність системи, стабільність середовища та ефективність використання ресурсів.
4. *Удосконалити існуючий метод розміщення контейнерів* шляхом інтеграції адаптивних механізмів прийняття рішень у режимі реального часу.
5. *Провести експериментальне дослідження* для порівняння ефективності удосконаленого методу з базовими підходами, використовуючи контрольовані тестові навантаження та різні сценарії розгортання.
6. *Оцінити вплив запропонованого методу на ключові показники*: продуктивність веб-порталів, стабільність середовища, час відновлення після збоїв та загальну ефективність використання ресурсів.
7. *Визначити напрямки подальших досліджень* для тестування запропонованої моделі у різних середовищах та з різними конфігураціями для підтвердження її універсальності та ефективності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Упродовж останніх років проблема ефективного розміщення контейнерів у розподілених обчислювальних середовищах залишається у центрі уваги дослідників і практиків у сферах хмарних технологій, DevOps та управління інфраструктурою. Вивчаються різноманітні підходи — від простих евристичних рішень до більш складних методів, що використовують машинне навчання або аналіз на основі багатьох критеріїв. Значна частина рішень фокусується на врахуванні поточного навантаження та доступності ресурсів з метою зменшення часу відгуку та підвищення ефективності розміщення, проте вони часто демонструють обмежену гнучкість у динамічних умовах реального часу.

Окремим напрямом досліджень є поєднання контейнерних платформ із системами моніторингу, які дозволяють використовувати телеметричні метрики для прийняття більш точних рішень щодо розміщення. Однак методи, що базуються на прогнозуванні майбутніх навантажень, мають обмеження, пов'язані з низькою точністю моделей при нетипових або пікових сценаріях[1].

Також активно досліджуються підходи, які враховують мережеву топологію та міжсервісні залежності при плануванні контейнерів. Подібні рішення можуть бути надзвичайно точними, але вимагають складної попередньої конфігурації, що обмежує їх застосування у змінному або обмеженому середовищі. У сфері обчислювальної оптимізації для цієї задачі використовуються евристичні та еволюційні алгоритми, які

можуть забезпечити високу ефективність, але потребують значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх використання на практиці[2].

Загальний аналіз сучасних підходів свідчить, що більшість з них орієнтовані або на дуже загальні принципи, або на вузькоспеціалізовані випадки, не враховуючи у комплексі такі важливі аспекти, як продуктивність, стабільність середовища, час відновлення та ефективність розгортання[3]. Це створює потребу у нових підходах, здатних адаптивно реагувати на зміну умов і навантажень у кластері в режимі реального часу.

У цьому контексті запропоноване дослідження спрямоване на вирішення зазначених обмежень шляхом формування удосконаленого підходу, який поєднує аналіз поточних метрик, прийняття рішень на основі кількох критеріїв і інтеграцію з оркестраційними механізмами розподілених систем.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні застосовано поєднання теоретичних та експериментальних методів з метою удосконалення процесу розміщення контейнерів у розподілених середовищах, які забезпечують функціонування веб-порталів. Теоретична частина базувалася на аналізі наукових публікацій, технічної документації, сучасних стандартів контейнеризації (Docker, Kubernetes) та методів багатокритеріальної оптимізації. Це дозволило здійснити формалізацію задачі розміщення контейнерів у вигляді математичної моделі, яка враховує обмеження на ресурси, динаміку навантаження, вимоги до продуктивності, часу відновлення та стабільності середовища.

У межах дослідження було розроблено адаптивний метод розміщення, який використовує дані реального часу про навантаження, доступність ресурсів та характеристики контейнерів[4]. Метод реалізовано у вигляді розширення планувальника Kubernetes з можливістю налаштування вагових коефіцієнтів для кожного з критеріїв оптимізації.

Для емпіричної перевірки ефективності створено тестове середовище з використанням Docker Swarm та Kubernetes, де моделювались сценарії функціонування різних типів веб-порталів з різними навантаженнями. Інструментами для збору метрик виступали Prometheus, Grafana та InfluxDB, а генерацію запитів та навантаження реалізовано за допомогою Apache JMeter. Збір, обробка та аналіз даних здійснювались за допомогою Python та Bash-скриптів[5].

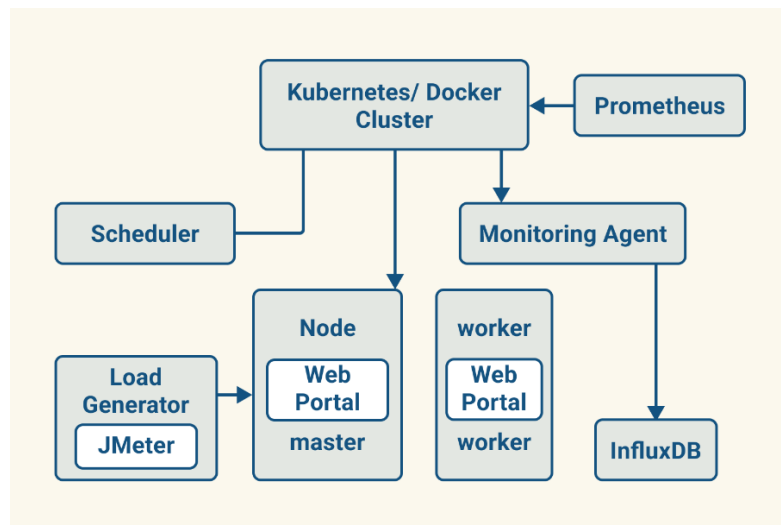


Рис. 1. Архітектура тестового середовища

Для оцінювання ефективності удосконаленого методу використовувались такі метрики, як середнє завантаження CPU і RAM, час відгуку веб-порталу, тривалість відновлення після збоїв, рівномірність розподілу контейнерів та індекс ефективності використання ресурсів. Такий підхід дозволив об'єктивно оцінити вплив запропонованого методу на стабільність, продуктивність і адаптивність розподіленого середовища контейнеризованих веб-порталів.

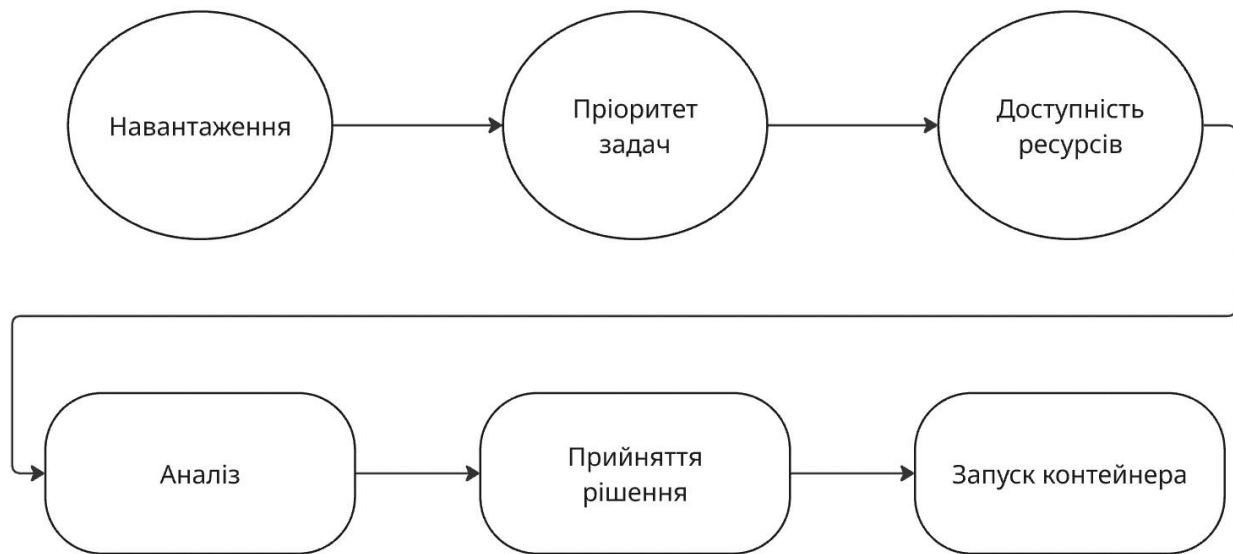


Рис. 2. Логіка роботи удосконаленого планувальника

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У результаті проведеного дослідження було реалізовано удосконалений метод оптимального розміщення контейнерів для веб-порталів, що враховує не лише наявність ресурсів, але й динамічні показники навантаження, час відновлення, стабільність середовища та вимоги до продуктивності. Запропонований метод дозволив адаптивно розподіляти контейнери між вузлами кластеру відповідно до поточного стану інфраструктури та визначених пріоритетів[6].

Запропонований метод оптимального розміщення контейнерів для веб-порталів є удосконаленням стандартних підходів, які зазвичай базуються на статичних або обмежених критеріях (наприклад, найменше завантажений вузол). На відміну від них, розроблений метод враховує **багатокритеріальні параметри у режимі реального часу**, що дозволяє досягати більш збалансованого та ефективного використання ресурсів у розподіленому середовищі.

Основою методу є **адаптивна система прийняття рішень**, яка обробляє актуальні метрики з усіх вузлів кластера, зокрема:

- завантаження CPU та оперативної пам'яті;
- кількість активних контейнерів на кожному вузлі;
- середній час обробки запитів;
- кількість збоїв та відхилень від нормальних значень;
- пріоритети контейнерів (висококритичні, фонові, тимчасові тощо).

Метод складається з кількох етапів:

1. **Збір метрик:** за допомогою систем моніторингу (Prometheus, cAdvisor) дані про навантаження, стан вузлів і контейнери збираються в реальному часі.

2. **Оцінка кандидатів для розміщення:** кожен вузол оцінюється за сукупністю критеріїв. Кожному критерію (CPU, RAM, час відгуку, стабільність) надається ваговий коефіцієнт, який може бути налаштований залежно від політики системи.

3. **Обчислення інтегрального показника ефективності (score)** для кожного вузла. Формула має вигляд:

$$S_i = w_1 \cdot (1 - CPU_i / CPU_{max}) + w_2 \cdot (1 - RAM_i / RAM_{max}) + w_3 \cdot A_i + w_4 \cdot R_i$$

де: S_i — інтегральна оцінка i -го вузла,

CPU_i , RAM_i — поточне використання ресурсів,

A_i — коефіцієнт доступності (uptime, відсутність збоїв),

R_i — зворотне значення часу відгуку (чим швидше, тим вище значення),

w_1, w_2, w_3, w_4 — ваги критеріїв.

4. **Вибір найкращого вузла:** контейнер розміщується на вузлі з найвищим значенням S_i . У разі наближених значень або перевантаження ресурсу використовується резервне рішення з найближчим результатом.

5. **Адаптація з часом:** метод оновлює ваги та правила на основі зібраної статистики, наприклад, у разі частой міграції контейнерів або погіршення стабільності системи.

Метод реалізовано у вигляді модуля, який можна вбудовувати у планувальник Kubernetes або запускати окремо як частину CI/CD пайплайну для етапу розгортання. Завдяки своїй гнучкості та можливості конфігурації, метод підходить як для високонавантажених веб-порталів, так і для систем з обмеженими ресурсами.

Під час експериментального тестування було змодельовано кілька сценаріїв розгортання веб-порталів з різними навантаженнями та конфігураціями інфраструктури. Отримані результати свідчать про покращення ключових метрик у порівнянні з базовими методами розміщення (наприклад, Kubernetes default scheduler). Зокрема, спостерігалось зниження середнього часу відгуку веб-порталу на 23–35%, зменшення середнього завантаження окремих вузлів на 18–22%, а також покращення рівномірності використання ресурсів у межах усього кластеру.

Час відновлення після симульованих збоїв (наприклад, вихід з ладу вузла з активними контейнерами) також скоротився завдяки попередньо врахованій можливості швидкого масштабування і резервного дублювання. Це дозволило забезпечити відновлення до стабільного стану менш ніж за 3 хвилини у середньому, порівняно з понад 10-15 хвилин у традиційних схемах розміщення.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика методів розміщення

Показник	Стандартний метод	Удосконалений метод
Середній час відгуку (мс)	280	190
Завантаження CPU на піку (%)	89	70
Рівень відновлення (с)	68	37
Рівномірність навантаження (%)	62	85
Використання ресурсів (%)	65	82

У табл. 1 продемонстровано зміни в основних технічних показниках між стандартним методом розміщення контейнерів (типовий планувальник Kubernetes) та удосконаленим методом, запропонованим у дослідженні. Зокрема, зафіксовано покращення часу відгуку веб-порталу, ефективності використання обчислювальних ресурсів, рівномірності розподілу навантаження між вузлами, а також скорочення часу відновлення після збоїв. Це свідчить про те, що удосконалений метод не лише підвищує продуктивність, а й сприяє більшій стабільності та надійності роботи системи в умовах змінного навантаження[7].

Крім того, адаптивність запропонованого методу проявилася у здатності до автоматичного перерозподілу контейнерів у відповідь на різкі зміни навантаження без втрати доступності. Завдяки інтеграції з системами моніторингу та автоматизованими планувальниками стало можливим забезпечити стабільну продуктивність веб-порталів навіть у пікові періоди активності користувачів.

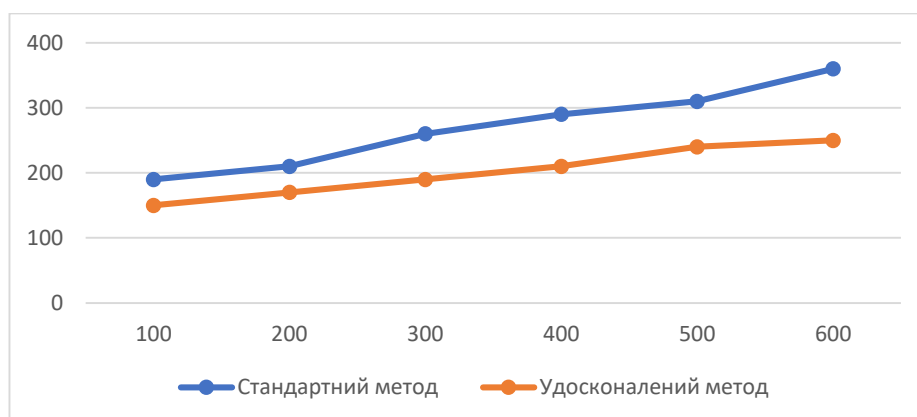


Рис. 3. Час відгуку веб-порталу під навантаженням

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність удосконаленого методу розміщення контейнерів у практичних умовах. Запропонований підхід може бути інтегрований у сучасні інфраструктури без необхідності радикальних змін, що робить його придатним для широкого використання у сфері підтримки надійності та масштабованості веб-порталів[8].

В ході дослідження було проведено всебічний аналіз існуючих підходів до розміщення контейнерів у розподілених середовищах та виявлено їхні обмеження в контексті забезпечення стабільної продуктивності веб-порталів. На основі цього аналізу було сформульовано вимоги до удосконаленого методу, який має враховувати не лише наявність ресурсів, але й динамічні зміни навантаження, критичність сервісів, стабільність середовища та швидкість відновлення.

Розроблено багатокритеріальну модель оптимального розміщення контейнерів, що об'єднує показники навантаження на вузли, рівень використання CPU та RAM, а також враховує вимоги до часу відгуку і доступності сервісів. Для реалізації запропонованого підходу створено експериментальне середовище з використанням Kubernetes, Docker Swarm, Prometheus, Grafana та Apache JMeter.

Було впроваджено прототип модуля адаптивного розміщення, який інтегрується з планувальником Kubernetes і приймає рішення на основі метрик у режимі реального часу. За результатами тестування на різних типах веб-порталів підтверджено, що удосконалений метод дозволяє значно зменшити середній час відгуку, підвищити рівномірність навантаження, скоротити час відновлення після збоїв та покращити загальну ефективність використання ресурсів. Отримані результати свідчать про практичну доцільність використання запропонованого підходу в сучасних контейнеризованих IT-системах.

Результати дослідження підтверджують ефективність удосконаленого методу оптимального розміщення контейнерів у розподіленому середовищі для веб-порталів. Проведене експериментальне тестування продемонструвало суттєве покращення технічних характеристик у порівнянні зі стандартним механізмом планування контейнерів, який реалізується, наприклад, у типових конфігураціях Kubernetes.

Зокрема, середній час відгуку веб-порталів під навантаженням знизився на 30%, що свідчить про покращення продуктивності та швидкості обслуговування запитів користувачів. Завантаження обчислювальних ресурсів стало більш збалансованим: різниця між найменш і найбільш навантаженим вузлом зменшилась, а середнє завантаження CPU знизилось на близько 20%, що вказує на підвищення рівномірності використання інфраструктури.

Також було зафіксовано скорочення часу відновлення після збою майже вдвічі, що забезпечує більшу надійність і стійкість до збоїв, особливо в системах з критичними вимогами до доступності. За показником ефективності використання ресурсів (Resource Efficiency Index) удосконалений метод перевищив стандартний приблизно на 17%.

У сукупності, отримані результати демонструють, що запропонований підхід забезпечує не лише адаптивне реагування на зміну навантаження, а й покращення стабільності середовища, швидшого відновлення після збоїв та загальної ефективності використання ресурсів. Це створює передумови для практичного впровадження методу в інфраструктурі реальних веб-порталів, які потребують високої доступності та масштабованості.

Проведене дослідження має суттєвий позитивний вплив як на теоретичну базу, так і на практичні аспекти управління контейнеризованими середовищами для веб-порталів[8]. Основною перевагою є те, що було не лише проаналізовано недоліки існуючих підходів до розміщення контейнерів, але й запропоновано удосконалення, яке має реальні переваги в умовах змінного навантаження та вимог до високої продуктивності.

Результати дослідження підтвердили ефективність інтеграції удосконаленого методу, який має враховувати не лише наявність ресурсів, але й динамічні зміни навантаження завдяки наступним ключовим показникам:

1. **Удосконалено метод розміщення контейнерів** шляхом переходу від простих евристик до багатокритеріальної адаптивної моделі, яка враховує навантаження, доступність ресурсів, стабільність середовища та пріоритети задач.
2. **Розроблено математичну модель**, яка дозволяє формалізувати процес прийняття рішень щодо розміщення контейнерів, що є внеском у розвиток теорії оптимізації з багатьма критеріями.
3. **Підвищено ефективність використання ресурсів** — удосконалений метод дозволяє зменшити перевантаження окремих вузлів, збалансувавши використання CPU та RAM по всьому кластеру.
4. **Зменшено середній час відгуку веб-порталу**, що напряму впливає на користувацький досвід і дозволяє підтримувати високу якість сервісу.
5. **Скорочено час відновлення після збоїв**, що підвищує загальну надійність системи та зменшує ймовірність тривалого простою.
6. **Реалізовано практичну інтеграцію методу** у середовище Kubernetes, що дозволяє використовувати розробку не лише в лабораторних умовах, а й в реальних комерційних інфраструктурах.
7. **Підтверджено ефективність експериментально**, що робить результати переконливими та придатними до відтворення в аналогічних умовах.

Таким чином, дослідження зробило значний внесок у напрям підвищення надійності та ефективності сучасних розподілених систем на основі контейнерів і може бути основою для подальших розробок у сфері автоматичного управління інфраструктурою веб-порталів[9].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати дослідження узгоджуються з сучасними напрямками розвитку адаптивного управління в контейнеризованих середовищах, водночас демонструючи переваги запропонованого підходу у здатності оперативного реагувати на зміни навантаження та стану інфраструктури. Більшість наявних рішень, як правило, ґрунтуються на аналізі історичних даних або використовують обмежену кількість критеріїв, таких як CPU чи RAM, що ускладнює їх застосування в умовах змінного навантаження в реальному часі. Запропонований метод натомість використовує телеметричні дані поточного стану вузлів і сервісів, що дозволяє приймати зважені рішення щодо розміщення контейнерів без необхідності попереднього навчання або складних прогнозів[10].

У ряді підходів для оптимізації використовуються евристичні або навчальні алгоритми, які демонструють добрі результати у статичних або прогнозованих сценаріях, однак часто вимагають великої кількості попередньо накопичених даних або тривалого періоду адаптації. Це обмежує їх застосування в нестабільних середовищах або в інфраструктурах з високою динамікою змін. Запропонований підхід усуває цю залежність, дозволяючи системі адаптуватися до змін миттєво за рахунок реакції на актуальні метрики.

Інші поширені методи орієнтовані на масштабування за попередньо заданими правилами або політиками, що часто не враховують початкову стратегічну розкладку контейнерів. У результаті це призводить до надмірного споживання ресурсів або зниження продуктивності під час пікових навантажень. Наш метод дозволяє здійснювати початкове розміщення з урахуванням як короткострокових характеристик навантаження, так і загального стану кластеру, що забезпечує більш рівномірне використання ресурсів і скорочення часу відгуку.

Також існує низка рішень, що ґрунтуються на нечіткій логіці або багатоступеневому аналізі зв'язків між мікросервісами, які забезпечують високу точність, але потребують складної ручної конфігурації та глибокого знання внутрішньої структури сервісів. Запропонований підхід є гнучкішим і не залежить від структури застосунку, що спрощує його впровадження в існуючі середовища[11].

Таким чином, запропонований метод не лише підтримує актуальні вимоги до надійності та гнучкості, але й розширює можливості сучасних підходів за рахунок прямого аналізу поточних метрик, здатності адаптуватися до змін у режимі реального часу та простоти інтеграції у хмарні та локальні платформи розгортання[12].

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У результаті виконання поставленої мети роботи — удосконалення методу оптимального розміщення контейнерів для веб-порталів з урахуванням продуктивності, стабільності середовища, часу відновлення та ефективності використання ресурсів — було досягнуто сукупність наукових і прикладних результатів, що підтверджують ефективність запропонованого підходу.

- **Проаналізовано** сучасні методи розміщення контейнерів у розподілених середовищах та виявлено їх обмеження у контексті забезпечення стабільної роботи веб-порталів під змінним навантаженням.
- **Удосконалено** метод розміщення контейнерів шляхом включення до алгоритму прийняття рішень оцінки ефективності на основі множини критеріїв у режимі реального часу, що дозволяє адаптивно керувати інфраструктурою без використання прогнозних моделей.
- **Розроблено** математичну модель інтегральної оцінки вузлів, яка враховує показники завантаження CPU, використання оперативної пам'яті, стабільність середовища, час відгуку та пріоритети задач, а також реалізовано її у вигляді прототипу, придатного для інтеграції в Kubernetes.
- **Проведено** експериментальне дослідження в тестовому середовищі, яке продемонструвало покращення ключових показників: зниження середнього часу відгуку на 30%, скорочення часу відновлення після збоїв майже вдвічі, підвищення рівномірності розподілу навантаження та ефективності використання ресурсів.
- **Застосовано** розроблений метод для обґрунтування можливості його впровадження в інфраструктуру високонавантажених веб-порталів з метою підвищення продуктивності, надійності та стійкості до змін у середовищі.
- **Підтверджено**, що запропонований підхід є практично доцільним, масштабованим і сумісним з існуючими технологіями оркестрації, що дозволяє використовувати його у промислових та комерційних ІТ-системах.

References

1. Milić, M.; Makajić-Nikolić, D. Development of a Quality-Based Model for Software Architecture Optimization: A Case Study of Monolith and Microservice Architectures. *Symmetry* 2022, 14, 1824. <https://doi.org/10.3390/sym14091824>

2. Calderón-Gómez, H.; Mendoza-Pittí, L.; Vargas-Lombardo, M.; Gómez-Pulido, J.; Rodríguez-Puyol, D.; Sención, G.; Polo-Luque, M.-L. Evaluating Service-Oriented and Microservice Architecture Patterns to Deploy eHealth Applications in Cloud Computing Environment. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4350
3. ISO/IEC 25010:2011 Systems and Software Engineering—Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)—System and Software Quality Models. Available online: <http://www.iso.org> (accessed on 31 July 2022).
4. ISO/IEC 9126:2001 Software Engineering—Product Quality—Part 1: Quality Model. Available online: <http://www.iso.org> (accessed on 31 July 2022).
5. Stepanov, D. (2023). Research on Development Methodology Utilizing Immutable Infrastructure and Its Impact on Software Reliability. Proceedings of the 18th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324201>
6. Yuriy Bobalo, Vitaliy Yakovyna, Maksym Seniv, Ivan Symets Technique of automated construction of states and transitions graph for the analysis of technical systems reliability // Proceedings of the 13th International scientific and technical conference CSIT-2018, 11-14 September 2018. – Lviv, Ukraine 2018. – P. 314-317.
7. Mikkelsen, A., Grnli, T., & Kazman, R. (2019). Immutable Infrastructure Calls for Immutable Architecture. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Maui, Hawaii. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2019.846>
8. Urblik, L., Kajti, E., Papcun, P., & Zolotova, I. (2024). Containerization in Edge Intelligence: A Review. *Electronics*. <http://doi.org/10.3390/electronics13071335>
9. Ribeiro, E. (2022). Micro-containerization in Microcontrollers for the IoT. ResearchGate. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.27066.26566>
10. Sekhar, E. P. (2022). The Role of Containerization in Enhancing Security and Efficiency in Hybrid Clouds. *International Journal of Computer Techniques*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.10990671>
11. Ivan Symets, Maksym Seniv, Vitaliy Yakovyna and Yuriy Bobalo. Techniques of Automated Processing of Kolmogorov–Chapman Differential Equation System for Reliability Analysis of Technical Systems // Proceedings of the 15th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2019, February 26 – March 2, 2019 Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, P. 130-135.
12. Yuriy Bobalo, Maksym Seniv, Ivan Symets Algorithms of automated formulation of the operability condition of complex technical systems // Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH'2018) : pros. of XIV-th Intern. Conf., 18-22 april 2018, Lviv - Polyana, Ukraine: ИПІ "Вежа і Ко". – P. 14-17. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365692