

УДК 004.75:004.94

DOI: 10.18372/2073-4751.84.20891

Алькема В.В.

orcid.org/0009-0000-0009-8237

vitalii.alkema@gmail.com

КОНТЕЙНЕРНА МОДЕЛЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ В АРХІТЕКТУРІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Державний університет «Київський авіаційний університет»

Вступ

Активний розвиток хмарних обчислень, розподілених сервісів та сервіс-орієнтованих архітектур зумовив перехід від монолітних систем до модульних, ізольованих компонентних структур. Однією з ключових технологічних основ цього переходу стала контейнеризація, яка забезпечує легковагову ізоляцію середовищ виконання, переносимість застосунків та відтворюваність конфігурацій [1]. Контейнери дозволяють формувати стандартизовані одиниці розгортання, що функціонують незалежно від конкретного апаратного або операційного середовища.

Паралельно з розвитком контейнерних технологій сформувалася мікросервісна архітектура як концептуальна модель побудови складних систем із незалежних сервісів з чітко визначеними інтерфейсами [2]. На відміну від монолітних підходів, мікросервіси забезпечують модульність, локалізацію функціональності та спрощення масштабування. Архітектурні патерни мікросервісів систематизовано у роботі [3], де підкреслюється роль декомпозиції системи на автономні компоненти як передумови гнучкості та стійкості.

Формування великих розподілених інфраструктур потребує також ефективних механізмів управління масштабом та ресурсами. Досвід створення систем керування

кластерами великого масштабу, зокрема Borg та Kubernetes, демонструє можливість ефективної роботи з тисячами ізольованих компонентів [4], [8]. Практичні аспекти контейнерної інфраструктури та принципи її використання детально описані у [5], що підкреслює зрілість контейнерного підходу як інженерного стандарту.

Контейнеризація стала важливою складовою хмарних платформ, зокрема у моделі PaaS, де вона забезпечує ізоляцію, масштабованість та гнучкість сервісів [6]. Архітектурні та продуктивнісні аспекти контейнерних хмарних інфраструктур досліджені у [7], що підтверджує їхню ефективність у порівнянні з традиційною віртуалізацією. Подальший розвиток контейнерних технологій та їх інтеграція у хмарні екосистеми узагальнені у системному огляді [10], де підкреслюється їх роль як базової інфраструктурної парадигми сучасних розподілених систем.

Особливої актуальності контейнеризація набуває у контексті граничних (edge) та IoT-середовищ, де обмежені ресурси вимагають легковагових механізмів ізоляції та розгортання сервісів. Дослідження [9] демонструє доцільність використання контейнерних технологій на периферійних пристроях, що відкриває можливість формування багатокомпонентних розподілених архітектур із чіткою структурною декомпозицією.

Таким чином, аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що контейнеризація та мікросервісний підхід створюють концептуальну та технологічну основу для формування багатокомпонентних систем з модульною структурою, ізольованими компонентами та керованими ресурсами. Разом з тим, більшість існуючих досліджень зосереджені на інфраструктурних або інженерних аспектах розгортання контейнерів, тоді як формалізовані математичні моделі контейнерної декомпозиції систем залишаються недостатньо розробленими.

Це зумовлює необхідність побудови узгодженої контейнерної моделі багатокомпонентної системи, яка поєднує структурну декомпозицію, динамічний опис компонентів та ресурсні обмеження і може бути використана як архітектурна основа цифрового двійника.

Постановка завдання

Полягає у розробленні формалізованої контейнерної моделі багатокомпонентної комп'ютерної системи, що забезпечує узгоджене представлення її структурної декомпозиції, внутрішньої динаміки компонентів і ресурсних обмежень у межах архітектури цифрового двійника. Необхідно сформуувати математичний опис системи як сукупності взаємодіючих контейнерів, визначити механізм формалізації їхніх станів та зв'язків і інтегрувати ресурсні характеристики у єдиний модельний каркас, придатний для подальшого системного аналізу. Основна частина

У сучасних дослідженнях контейнеризація переважно трактується як інженерний механізм ізоляції програмного середовища. У даній роботі пропонується її розширена інтерпретація — контейнер розглядається як формалізована структурно-функціональна одиниця

системи, що має визначений простір станів, інтерфейси взаємодії та ресурсні характеристики. Такий підхід дозволяє перейти від технологічного рівня опису до математичної моделі багатокомпонентної системи.

Багатокомпонентна комп'ютерна система подається у вигляді множини контейнерів

$$S = \{C_1, C_2, \dots, C_N\} \quad (1)$$

Співвідношення (1) формалізує структурну декомпозицію системи та визначає її як композицію автономних підсистем. Кожен елемент множини S окремим об'єктом аналізу, що дозволяє локалізувати дослідження у межах конкретного компонента без втрати цілісності опису.

Структура контейнера визначається кортежем

$$C_i = \{X_i, U_i, Y_i, R_i, F_i\} \quad (2)$$

де простір станів X_i , множина входів U_i , множина виходів Y_i , ресурсний вектор R_i та оператор динаміки F_i утворюють повну формалізацію контейнера. Таким чином, формула (2) задає універсальний опис контейнера як динамічної підсистеми з визначеними межами ізоляції.

Еволюція стану контейнера визначається рівнянням

$$\dot{x}_i(t) = F_i(x_i(t), u_i(t)) \quad (3)$$

Рівняння (3) встановлює закон зміни стану контейнера в часі та дозволяє розглядати його як локальну динамічну систему. На відміну від суто програмного контейнера, який описується конфігураційно, тут контейнер характеризується математичною залежністю, що визначає його поведінку.

Взаємодія контейнерів задається співвідношенням

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} H_{ij} y_j(t) \quad (4)$$

Формула (4) описує механізм формування вхідного сигналу на основі виходів суміжних контейнерів. Це дозволяє представити систему як

орієнтований граф динамічних компонентів і формалізувати інформаційні потоки між ними.

Ресурсна складова контейнера визначається вектором

$$R_i = (r_i^{cpu}, r_i^{mem}, r_i^{net}, r_i^{stor}) \quad (5)$$

Вектор (5) інтегрує у модель обчислювальні та мережеві обмеження, що є характерними для хмарних та edge-середовищ. На відміну від абстрактних сервісних моделей, запропонована модель враховує фізичну обмеженість ресурсів.

Глобальна ресурсна узгодженість системи визначається умовою

$$\sum_{i=1}^N r_i^k(t) \leq R_{max} \quad (6)$$

Умова (6) забезпечує формальний критерій відсутності перевантаження та створює основу для аналізу масштабованості системи.

Інтегруючи локальні рівняння (3) для всіх контейнерів множини (1),

агрегована динаміка системи може бути подана у вигляді

$$\dot{X}(t) = F(X(t)) \quad (7)$$

Рівняння (7) формує єдиний математичний каркас системи та дозволяє досліджувати її глобальні властивості — зокрема стійкість та керованість.

У межах архітектури цифрового двійника вводиться відображення

$$\Phi: P \rightarrow D \quad (8)$$

де P — фізична система, а D — її цифрове представлення. Відображення (8) формалізує процес синхронізації станів і визначає контейнерну декомпозицію як структурну основу цифрового двійника.

Таким чином, співвідношення (1)–(8) утворюють узгоджену математичну модель багатокомпонентної комп'ютерної системи, що поєднує структурну ізоляцію, динамічну поведінку та ресурсні обмеження в єдиному формалізованому каркасі.

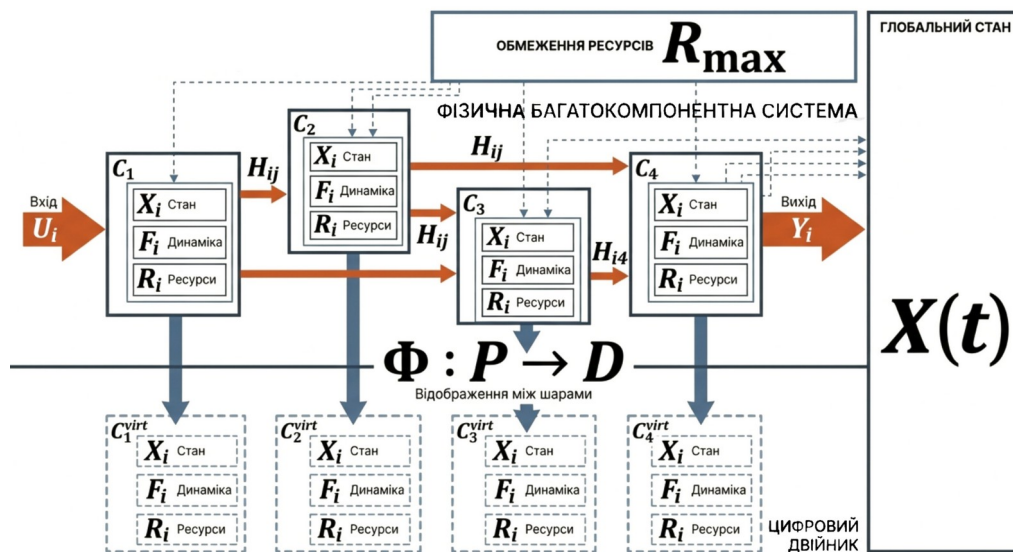


Рис. Архітектура контейнерної моделі відображення фізичної системи у цифровий двійник

На рисунку представлено структурну архітектуру контейнерної моделі багатокомпонентної комп'ютерної системи. Верхній рівень відповідає фізичній системі, що складається з множини контейнерів C_i , кожен з яких описується станом X_i ,

оператором динаміки F_i та ресурсним вектором R_i . Міжконтейнерна взаємодія реалізується через оператори передачі H_{ij} , що формують орієнтований граф зв'язків. Обмеження сумарних ресурсів визначаються величиною R_{max} .

Агрегований глобальний стан системи формується як $X(t)$. Нижній рівень відображає цифровий двійник, який є структурно ізоморфним фізичному шару. Відображення $\Phi: P \rightarrow D$ забезпечує синхронізацію станів між фізичною та віртуальною системами.

Подальший розвиток моделі передбачає встановлення формальних умов узгодженості між контейнерною структурою фізичної системи та її цифровим відображенням.

Нехай фізична багатокомпонентна система подається множиною контейнерів, визначеною співвідношенням (1), а цифровий двійник — структурно ізоморфною множиною віртуальних контейнерів. Відображення між цими множинами задається оператором (8), який встановлює відповідність між фізичним шаром P та цифровим шаром D . Саме співвідношення (8) формалізує перехід від фізичної системи до її віртуального представлення.

Контейнер у фізичній системі описується структурою (2), що включає простір станів, оператор динаміки та ресурсні характеристики. У цифровому двійнику кожному фізичному контейнеру відповідає віртуальний контейнер з аналогічною структурою. Таким чином, зберігається інваріантність внутрішньої організації, визначеної формулою (2).

Структурна узгодженість забезпечується збереженням графа зв'язків між контейнерами. Якщо взаємодія фізичних контейнерів описується співвідношенням (4), то у цифровому двійнику зберігається та сама топологія інформаційних потоків. Це означає, що відображення Φ є структурно ізоморфним відносно орієнтованого графа системи.

Динамічна узгодженість досягається за умови, що стани віртуальних контейнерів відтворюють

еволюцію фізичних станів, визначену рівнянням (3). Інакше кажучи, оператор динаміки цифрового контейнера відтворює поведінку відповідного фізичного контейнера з допустимою похибкою синхронізації. У такому випадку агрегований стан цифрового двійника узгоджується з глобальною динамікою системи, описаною співвідношенням (7).

Ресурсна узгодженість полягає у відображенні фізичних обмежень у цифровому середовищі. Якщо для фізичної системи виконується умова ресурсної обмеженості (6), то цифровий двійник повинен відтворювати ці самі граничні параметри у своїй моделі. Таким чином, цифровий шар не є абстрактною симуляцією, а відображає реальні експлуатаційні обмеження.

Отже, узгодженість контейнерної моделі визначається трьома взаємопов'язаними рівняннями: структурним (збереження композиції (1) та зв'язків (4)), динамічним (відповідність локальної та агрегованої еволюції (3), (7)) та ресурсним (збереження обмежень (6)). Сукупність цих умов забезпечує математичну коректність відображення (8) і дозволяє використовувати контейнерну модель як формальну основу архітектури цифрового двійника.

Висновки

У роботі розроблено формалізовану контейнерну модель багатокомпонентної комп'ютерної системи, яка поєднує структурну декомпозицію, локальну динаміку компонентів та ресурсні обмеження в єдиному математичному каркасі. На відміну від існуючих підходів до контейнеризації, що розглядають контейнер переважно як інженерну одиницю ізоляції середовища виконання, запропонована модель інтерпретує контейнер як формалізовану структурно-функціональну підсистему з

визначеним простором станів та оператором еволюції.

Відмінністю роботи від класичних мікросервісних і контейнерних архітектур є перехід від технологічного опису до математичної моделі, у якій контейнер визначається кортежем параметрів та динамічним законом зміни стану. Це дозволяє здійснювати системний аналіз не лише структури, але й поведінки багатокомпонентної системи.

Запропонована модель інтегрує ресурсні обмеження безпосередньо у формалізований опис, що відрізняє її від більшості існуючих архітектурних підходів, де ресурси розглядаються на рівні інфраструктурного керування, а не як параметри математичної моделі. Це створює основу для аналізу масштабованості та узгодженості системи у формалізованому вигляді.

У межах архітектури цифрового двійника контейнерна декомпозиція доповнена відображенням між фізичним та віртуальним шарами, для якого сформульовано умови структурної, динамічної та ресурсної узгодженості. Таким чином, запропонований підхід забезпечує математично коректне поєднання контейнерної архітектури з концепцією цифрового двійника.

Отримані результати розширюють існуючі підходи до контейнеризації та формують теоретичну основу для подальшого розвитку методів аналізу і оптимізації багатокомпонентних систем у розподілених обчислювальних середовищах.

Література:

1. Merkel D. Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment // *Linux Journal*. 2014. No. 239. P. 2–7.

2. Lewis J., Fowler M. Microservices: a definition of this new architectural term. 2014. URL: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (дата звернення: 19.12.2025).

3. Taibi D., Lenarduzzi V., Pahl C. Architectural Patterns for Microservices: A Systematic Mapping Study // *Proceedings of CLOSER 2017*. Porto, 2017. P. 221–232.

4. Burns B., Grant B., Oppenheimer D., Brewer E., Wilkes J. Borg, Omega, and Kubernetes // *Communications of the ACM*. 2016. Vol. 59, No. 5. P. 50–57.

5. Hightower K., Burns B., Beda J. *Kubernetes: Up and Running*. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 278 p.

6. Pahl C. Containerization and the PaaS Cloud // *IEEE Cloud Computing*. 2015. Vol. 2, No. 3. P. 24–31.

7. Zhang Q., Chen M., Li L. Container-Based Cloud Infrastructure: Architecture and Performance // *Future Generation Computer Systems*. 2018. Vol. 85. P. 1–14.

8. Verma A., Pedrosa L., Korupolu M., et al. Large-Scale Cluster Management at Google with Borg // *Proceedings of EuroSys 2015*. Bordeaux, 2015.

9. Morabito R. Virtualization on Internet of Things Edge Devices with Container Technologies // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 8835–8850.

10. Pahl C., Brogi A., Soldani J., Jamshidi P. Cloud Container Technologies: A State-of-the-Art Review // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2019. Vol. 7, No. 3. P. 677–692.

Алькема В.В.

КОНТЕЙНЕРНА МОДЕЛЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ В АРХІТЕКТУРІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті розглянуто проблему формалізованого опису багатокомпонентних комп'ютерних систем у контексті побудови архітектури цифрового двійника. Актуальність дослідження зумовлена поширенням контейнерних технологій, мікросервісних архітектур та розподілених обчислювальних середовищ, у яких система складається з великої кількості взаємодіючих компонентів. Запропоновано контейнерну модель багатокомпонентної системи, у якій контейнер інтерпретується як структурно-функціональна підсистема з визначеним простором станів, оператором динаміки та ресурсними характеристиками. Систему подано у вигляді множини взаємодіючих контейнерів, для яких формалізовано механізм міжконтейнерної взаємодії, описано локальну динаміку компонентів та введено обмеження ресурсної узгодженості. Побудовано агреговану модель глобальної динаміки системи, що дозволяє здійснювати системний аналіз її поведінки. У межах архітектури цифрового двійника введено відображення між фізичною системою та її цифровим представленням і сформульовано умови їх структурної, динамічної та ресурсної узгодженості. Запропонований підхід дозволяє поєднати контейнерну декомпозицію з математичним описом поведінки системи та використовувати її як формальну основу побудови цифрових двійників у розподілених, хмарних та edge-середовищах.

Ключові слова: контейнерна модель, багатокомпонентна система, цифровий двійник, контейнеризація, розподілені обчислювальні системи, комп'ютерне моделювання.

Alkema V.V.

CONTAINER MODEL OF A MULTI-COMPONENT SYSTEM IN THE DIGITAL TWIN ARCHITECTURE

The paper addresses the problem of formal modeling of multi-component computer systems within the architecture of digital twins. The relevance of the study is обусловлена the rapid development of container technologies, microservice architectures, and distributed computing environments where systems consist of numerous interacting components. A container-based model of a multi-component system is proposed in which a container is interpreted as a structural and functional subsystem with a defined state space, dynamic operator, and resource characteristics. The system is represented as a set of interacting containers, for which the interaction mechanisms, local component dynamics, and resource constraints are formally defined. An aggregated model of the global system dynamics is constructed, enabling system-level analysis of behavior. Within the digital twin architecture, a mapping between the physical system and its digital representation is introduced, and conditions of structural, dynamic, and resource consistency are formulated. The proposed approach integrates container-based decomposition with a mathematical representation of system behavior and can serve as a formal basis for digital twin architectures in distributed, cloud, and edge computing environments.

Keywords: container model, multi-component system, digital twin, containerization, distributed computing systems, computer modeling.

Стаття подана до редакції: 05/11/2025

Стаття прийнята до опублікування: 16/11/2025

Стаття опублікована: 30/12/2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0