DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-34
УДК 004.94
Чепинога Анатолій Володимирович, к.т.н, доцент
http://orcid.org/0000-0003-3921-6557
Кащенко Дмитро Олександрович, аспірант
https://orcid.org/0000-0002-3365-7186
Черкаський Державний Технологічний Університет м. Черкаси, Україна

МЕТОДИ ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ СУБ'ЄКТИВНИХ СИСТЕМ

Чепинога А.В., Кащенко Д.О. Методи застосування концепції суб'єктивних систем. У статті розглянуто методи застосування концепції суб'єктивних систем для моделювання, проектування та керування складними технічними й інформаційними системами, що функціонують в умовах динамічної невизначеності та обмеженого зовнішнього контролю. Запропонований підхід ґрунтується на використанні не лише агентно-популяційних моделей, але й цілісних біоподібних систем, які мають внутрішню структурну організацію та власні механізми функціональної взаємодії. Основну увагу приділено методам онтогенетичного розвитку суб'єктивних систем, внутрішньої саморегуляції та функціональної реконфігурації, що забезпечують їхню здатність до адаптації без прямого зовнішнього управління. Окремо досліджено граничні стани функціонування системи, які визначають перехід між режимами балансування, стабілізації та режимами змін, реконфігурації або розвитку. Такі переходи інтерпретуються як ключові моменти внутрішньої перебудови структури та логіки взаємодії компонентів системи. Показано можливості практичного застосування концепції суб'єктивних систем у комп'ютерній інженерії, зокрема в задачах оркестрації обчислювальних ресурсів, побудові адаптивних керуючих контурів, а також у проектуванні автоматизованих комплексів, здатних до самостійної стабілізації та розвитку в змінному середовищі.
Ключові слова: суб'єктивні системи, онтогенез, саморегуляція, складні динамічні системи, біонічні моделі, комп'ютерна інженерія

Chepynoha A., Kashchenko D. Methods for Applying the Concept of Subjective Systems. The article examines methods for applying the concept of subjective systems to the modeling, design, and control of complex technical and information systems operating under conditions of dynamic uncertainty and limited external control. The proposed approach is based on the use of not only agent-based and population models, but also holistic bio-inspired systems that possess an internal structural organization and their own mechanisms of functional interaction. The main focus is placed on methods of ontogenetic development of subjective systems, internal self-regulation, and functional reconfiguration, which ensure the system's ability to adapt without direct external control. Particular attention is given to the analysis of boundary operational states that determine transitions between modes of balancing and stabilization and modes of change, reconfiguration, or development. Such transitions are interpreted as key moments of internal restructuring of the system's structure and the logic of interaction among its components. The practical applicability of the concept of subjective systems in computer engineering is demonstrated, particularly in the orchestration of computational resources, the construction of adaptive control loops, and the design of automated complexes capable of autonomous stabilization and development in a changing environment.
Keywords: subjective systems, ontogenesis, self-regulation, complex dynamic systems, bionic models, computer engineering

Постановка завдання. Сучасні складні технічні та інформаційні системи характеризуються високим рівнем динамічності, невизначеності та неповноти зовнішнього керування. Коли система достатньо складна, можна спостерігати та контролювати лише частину її змінних; решту потрібно залишити внутрішньому регулюванню. Немає єдиного центрального контролера, який міг би керувати всіма деталями складної системи.[1] Класичні підходи, засновані на централізованому контролі або популяційних агентних моделях, дедалі частіше виявляються недостатніми для опису та реалізації адаптивної поведінки таких систем.

Концепція суб'єктивних систем пропонує альтернативну парадигму, в якій система розглядається не як сукупність агентів, а як єдиний організм, що має власну внутрішню та зовнішню структуру, механізми сприйняття, перетворення та накопичення інформації, а також здатність до самостійного розвитку завдяки енергетичній складовій. У цьому контексті ключовим стає не зовнішній відбір або оптимізація популяції, а онтогенез окремої системи.

Метою цієї статті є систематизація методів застосування концепції суб'єктивних систем і формування методологічної основи для їх практичної реалізації.

Принцип суб'єктивних систем полягає в тому, що система (суб'єкт) є окремою частиною об'єктивної дійсності, але не роздільно зв'язаний з нею, здатна(ий) сприймати і оцінювати навколишню об'єктивну дійсність на основі і відносно своєї зовнішньої і внутрішньої структури і розвиватися відносно поточного стану цих структур і навколишньої дійсності, використовуючи ці внутрішні і зовнішні стани цих структур і оточуючу дійсність [2].

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

Суб'єктивна система формує власні внутрішні і зовнішні структури і здатна до саморегуляції та розвитку за рахунок взаємодії зовнішньої структури із зовнішнім середовищем. І саме при взаємодії внутрішніх і зовнішніх структур і виникає роз'яснення для самої суб'єктивної системи . Функціонально: ЗПМ - це захисно-перетворювальний механізм; РНМ - це розподільно-накопичувальний механізм; ВІМ - це видозмінний механізм.

На відміну від агентних підходів, де поведінка виникає з колективної взаємодії великої кількості простих елементів, у суб'єктивних системах складність локалізується всередині одного організму. І елементами вже є, як внутрішні так зовнішні органели, так і зовнішні сполуки та структуру. Це зумовлює іншу логіку застосування методів адаптації та навчання.

Для початку треба визначитися, що саме буде робити система в заданому середовищі з чого і в що вона буде робити перетворення елементів і саме головне для чого. Тобто треба визначитися з яких процесів система буде отримувати енергію для себе. З яких елементів вона саме буде будувати себе. Наскільки система самодостатня, пластична та наскільки буде залежна від зовнішніх чинників середовища.

Пропонується онтогенетичний метод, який передбачає поетапне формування внутрішньої структури системи в процесі її функціонування. Основні характеристики цього методу це розвиток від простих функціональних схем до складних структур, накопичення внутрішнього досвіду, зміна ролей і зв'язків між органелами без кардинальної заміни всієї системи. Саме межа кардинальних змін в багатьох випадках потребує повного перескладання системи і саме цей процес краще розглядати вже з позиції філогенезу та агентного підходу (рисунок 1).

Рис. 1 – Графічне зображення меж змін Суб'єктивної системи

У технічних системах онтогенез може реалізовуватися як поступове розширення функціональності програмно-апаратного комплексу, адаптація конфігурацій або перебудова логіки та алгоритмів керування в реальному часі. Саморегуляція суб'єктивної системи здійснюється через внутрішні механізми контролю стану та перерозподілу ресурсів.

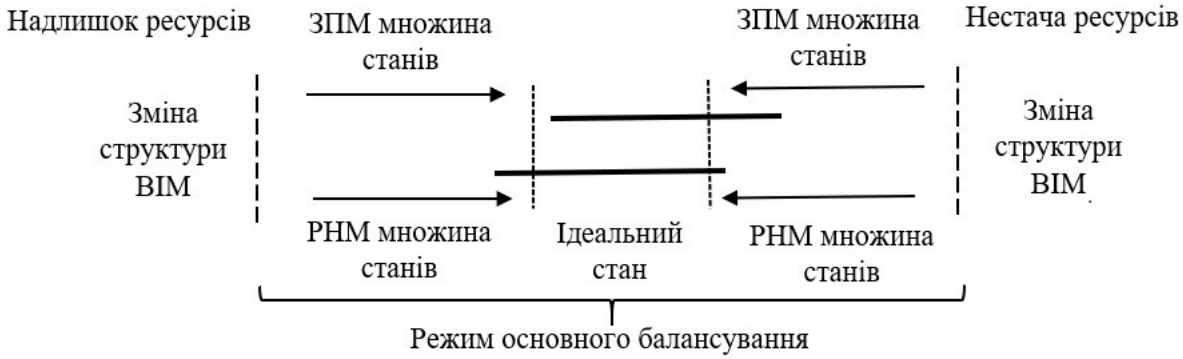

Рис. 2 – Графічне зображення множини станів режиму основного балансування Суб'єктивної системи

Метод передбачає наявність внутрішніх критеріїв стабільності, локальну корекцію параметрів без глобального перезапуску системи, зміни пріоритету між зовнішньою структурою (ЗПМ) та внутрішньою структурою (РНМ) з оптимізаційними функціями. У комп'ютерній інженерії цей підхід може бути застосований для побудови систем самовідновлення, де рішення про

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

перерозподіл обчислювальних, енергетичних та захисних ресурсів приймаються не зовнішньою керуючою системою, а самою системою.

В даному методі розгортання суб'єктивної системи повинні заздалегідь бути визначені, що саме, буде внутрішньою та зовнішньою структурою системи, та як буде накопичуватися та розподілятися ресурс при необхідності, а також як система буде захищатися і перетворювати зовнішні елементи середовища. Який механізм і як саме, буде допомагати змінювати систему для пристосування до навколишнього середовища.

Для визначення налаштування основних станів балансування необхідно визначити які цілі переслідуватиме функціонування даної системи, які процеси будуть мати характер позитивних або негативних для цієї системи. Тобто як буде виникати саме роз'яснення для системи. І яка періодичність їхньої появи чи не появи зумовить зміну цього стану та структури системи.

Для більш детального аналізу моделі розглянемо безліч тих станів, які виникають під час основного балансування. Суть основного балансування у тому щоб стабілізувати систему без особливих змін її структури. Це досягається завдяки вже сформованим структурним станам розподільчої мережі, а також станом лічильників (для прикладу) ЗПМ та РНМ.

Режим основного балансування ділиться на три стани – один із них є відносно ідеальним, тобто не потребує змін станів системи, коли повністю збалансовано стан РНМ та ЗПМ щодо витрат та споживання. Тобто в більшості випадків системи збалансована відносно періодичності появи негативних та позитивних збуджень та має атрактор до ідеального стану системи. Якщо в процесі функціонування системи відбувається зміна зовнішніх умов та періодичність їх появи, то система змінює спочатку своє роз'яснення до значення межі позитивних та негативних даних, а надалі змінює свої зовнішні та внутрішні параметри для стабілізації, це і є два інших стани. Ці стани характеризуються недоліком чи надлишком періодичності появи ресурсів (див. Рисунок.2), які виконують роль, як енергетичну, для умовного «живлення» системи, так і інформаційно-аналітичну роль для опису умов довкілля.

Якщо це нестача ресурсів, то РНМ за принципом негативних і позитивних зворотних зв'язків, збільшує чутливість ЗПМ до появи приблизних позитивних даних, що призводить до стабілізації системи та знімає невизначеність з деяких зовнішніх процесів для системи. Якщо це надлишок періодичності появи позитивних даних, то РНМ за допомогою збільшення порога потреби зменшує ймовірну чутливість ЗПМ при позитивних даних, що призводить до внутрішньої стабілізації системи і збільшує невизначеність деяких зовнішніх процесів для системи. Зміна структури за допомогою ВІМ відбувається при критичних станах основного балансування.

Важливим аспектом є механізми внутрішньої взаємодії. У біологічних системах обмін речовин і сигналів відбувається через гуморальні канали, зокрема капілярні мережі. В електромеханічних системах аналогічні процеси повинні реалізовуватися через кінетичні механізми, а також через інформаційні канали. Це вимагає складних патернів розрахунку руху і взаємодії, що можуть бути формалізовані за допомогою алгоритмів керування та машинного навчання. Тобто нейромережа у цьому сенсі використовується для заміни функціональних процесів взаємодії органічної біохімії. Але це наступний етап в розвитку моделювання подібних систем, направлений на формування їх самодостатності взаємодії з зовнішнім середовищем.

Окрему увагу заслуговує проблема мініатюризації та мобільності подібних систем. У контексті суб'єктивних систем мобільність розглядається не як допоміжна характеристика, а як умова виконання захисних і перетворювальних функцій у змінному середовищі. Мобільна система здатна змінювати конфігурацію, розміщення та структуру ресурсів залежно від зовнішніх впливів, що суттєво підвищує її адаптивність і стійкість.

Застосування концепції суб'єктивних систем передбачає декомпозицію не на агентів, а на органели з функціоналом в РНМ або ЗПМ. Кожна органела виконує чітко визначену функцію та взаємодіє з іншими органелами через стандартизовані механізми. Переваги методу: зменшення складності проектування; підвищення інтерпретованості системи; можливість локальної модернізації без порушення цілісності. Такий підхід є особливо ефективним у кіберфізичних, видобувних та виробничих системах. Концепція суб'єктивних систем може бути застосована у таких напрямах:

- системи оркестрації обчислювальних ресурсів;
- автоматизовані виробничі комплекси;
- адаптивні мережеві інфраструктури;

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

• автоматизовані аграрні комплекси;
• автоматизовані видобувні комплекси;

У кожному з цих випадків суб'єктивна система розглядається як самодостатній функціональний організм, здатний до внутрішнього розвитку та адаптації.

Застосування концепції суб'єктивних систем в оркестрації обчислювальних ресурсів

Сучасні системи оркестрації обчислювальних ресурсів, зокрема Kubernetes, розроблялися як інфраструктурні інструменти для автоматизації розгортання, масштабування та підтримки працездатності розподілених програмних компонентів. Проте зі зростанням складності таких систем і зменшенням можливостей централізованого керування дедалі актуальнішою стає необхідність їх переосмислення як автономних, адаптивних утворень, здатних до внутрішньої саморегуляції. У цьому контексті концепція суб'єктивних систем пропонує альтернативний підхід до інтерпретації та проектування оркестраційних платформ.

Одним із базових принципів Kubernetes є безперервне виконання кожним елементом системи заданої функції незалежно від змін зовнішнього середовища. Контролери, планувальники, сервіси та робочі вузли функціонують у режимі постійного зворотного зв'язку, відновлюючи заданий стан системи при відхиленнях. У межах концепції суб'єктивних систем цей принцип може бути інтерпретований як прояв внутрішньої цілісності системи, де кожен компонент виконує роль функціонального «органу», а не ізольованого агента.

На початковому етапі проектування суб'єктивної системи оркестрації необхідно чітко визначити її цільове призначення. У класичному інженерному підході Kubernetes використовується для забезпечення стабільності сервісів і зручності масштабування. Проте в суб'єктивній інтерпретації постає питання: для кого і для чого підтримується ця стабільність. Зовнішньо вона забезпечує комфортний доступ користувачів до сервісів, але з внутрішньої точки зору система підтримує власне існування, отримуючи ресурси, енергію та умови для розвитку.

Показовим є приклад системи, у якій стабільність функціонування безпосередньо пов'язана з автоматичним білінгом. У такій моделі безперервна робота сервісів забезпечує регулярне надходження фінансових ресурсів, які спрямовуються самою системою на підтримку інфраструктури, масштабування обчислювальних потужностей і розвиток системи. У результаті формується замкнений цикл самопідтримки, у якому оркестраційна система виступає не лише інструментом, а й активним елементом власного життєвого циклу.

Для прикладу: ЗПМ (захисно-перетворювальний механізм) - слугує для отримання грошей та електроенергії за послуги та сервіси (криптомайненгу, або користування сервісами серверів) та захисту від кібератак і фізичного захисту. РНМ (розподільно-накопичувальний механізм) - слугує для розподілення грошей (на рахунках) та внутрішніх апаратних ресурсів системи (Pod, Service, Control Plane). ВІМ (видозмінний механізм) - слугує для зміни РНМ або ЗПМ та алгоритмів їх функціонування за допомогою аналізу логів і переписування коду та запуску на репліках за потреби. Даний метод зменшує час реакції на зміну системи і підвищує гнучкість та розширює кордони функціонування, а також збільшує її стабільність функціонування. Для розрахунку ефективності змін системи скористаємося порівнянням етапів розробки нових сервісів за допомогою спеціалістів і аналогічних змін оброблених автоматично за допомогою концепції суб'єктивних систем.

Базова формула ефективності адаптаційних змін. Позначимо:

- T_h — середній час внесення змін людиною (традиційна розробка);
- T_a — середній час автоматичної зміни через ВІМ;
- C_h — вартість змін за участю спеціалістів;
- C_a — вартість автоматизованих змін;
- S_h — коефіцієнт стабільності системи після ручних змін;
- S_a — коефіцієнт стабільності після автоматичної реконфігурації.

Тоді **інтегральна ефективність змін** визначається як:

$$E_{change} = \alpha \frac{T_h}{T_a} + \beta \frac{C_h}{C_a} + \gamma \frac{S_a}{S_h}$$

де: $\alpha+\beta+\gamma=1$ — вагові коефіцієнти важливості часу, вартості та стабільності.

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

Нижче - приклад для Kubernetes-сценарію з підстановкою чисел у формулу ефективності змін. Типовий сценарій змін у Kubernetes: виявлена деградація/аномалія в білінгу + ризик DDoS, потрібно: додати/оновити - правила rate-limit / WAF (ЗПМ), змінити - policy розподілу ресурсів і ліміти/автоскейл (РНМ), виконати - canary/blue-green і швидкий rollback (через ВІМ).

Вихідні дані.

Ручна зміна (класичний процес):

- T_h=48 год (3 інженери × ~2 робочі дні на аналіз, правки, тести, деплой + узгодження)
- C_h=2200 USD (припустимо ~48 люд.год × 45 USD/год ≈ 2160 + дрібні витрати)
- Стабільність/надійність після релізу:

S_h=0.970 (умовний "коефіцієнт стабільності" / близько 97%)

Автоматизована зміна через ВІМ (LLM+policy engine+canary+rollback):

- T_a=3 год (детекція+генерація патча+canary+валідація; людина лише рев'ю)
- C_a=150 USD (3 год SRE × 45 USD/год = 135 + інфра/обчислення ~15)
- Стабільність після автоматизованої реконфігурації:

S_a=0.995 (99.5% — завдяки canary/авто-rollback/стандартним гвардам)

Частка змін, які реально автоматизуються A=0.7 (приблизно 70% змін такого класу можна закривати автоматично)

Ваги (приклад)

- α=0.5 (час критичний)
- β=0.3 (вартість важлива)
- γ=0.2 (стабільність важлива)
- α+β+γ=1

Розрахунок відношень:

$$\frac{T_h}{T_a} = \frac{48}{3} = 16$$
$$\frac{C_h}{C_a} = \frac{2200}{150} \approx 14.67$$
$$\frac{S_a}{S_h} = \frac{0.995}{0.970} \approx 1.0258$$

Тоді:

$$E_{change}=0.5\cdot 16+0.3\cdot 14.67+0.2\cdot 1.0258$$
$$E_{change}=8+4.401+0.205\approx 12.606$$

З урахуванням частки автоматизованих змін:

$$E_{total}=A\cdot E_{change}=0.7\cdot 12.606\approx 8.824$$

Інтерпретація результату $E_{total}\approx 8.8$ означає, що в середньому "корисність/ефективність" циклу змін (час+вартість+стабільність), з поправкою на те, що не все можна автоматизувати, майже **у 9 разів краща**, ніж у класичному ручному підході. Основний внесок у виграш — скорочення T та зменшення C; стабільність дає менший вклад, але важлива як "штраф/бонус" за якість.

Разом з тим така модель виявляє фундаментальну залежність системи від зовнішнього середовища. Для її функціонування необхідні електроенергія, канали зв'язку, матеріальні носії обчислювальних ресурсів і виробничі потужності для створення нових компонентів. Це ставить питання про межі автономності суб'єктивної системи та механізми формування її структурних елементів. Зокрема, виникає необхідність визначення, з яких елементів навколишнього середовища система може формувати нові «будівні блоки» та яким чином ці процеси можуть бути спрощені або формалізовані.

Оскільки всі відомі біологічні організми ґрунтуються на органічній хімії, постає питання про технічну реалізацію суб'єктивних систем. Запропонований підхід в наступних етапах розвитку передбачає часткову заміну біоорганічних процесів фізичними та електромагнітними процесами. Йдеться не про повну імітацію біологічних процесів, а про функціональне відтворення її ключових принципів. Формування нових структур може здійснюватися за допомогою адитивних технологій,

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

зокрема 3D металополімерного друку, фотолітографії та інших методів керованого створення компонентів. Але до цього етапу розвитку основні будівні компоненти будуть постачатися через фінансові операції.

Фундаментальним елементом суб'єктивних систем є механізми сприйняття, аналізу та прогнозування. У біологічних організмах ці функції реалізуються нейронними структурами, які забезпечують розпізнавання образів, категоризацію сигналів і побудову прогнозів. Глибинною метою цих процесів є забезпечення стабільного руху організму в просторі та часі, тобто збереження його цілісності в умовах змінного середовища.

У системах оркестрації обчислювальних ресурсів нейромережі здатні виконувати функції аналізу навантаження, прогнозування потреб у ресурсах, виявлення аномалій і ухвалення рішень щодо реконфігурації. У такій моделі нейромережа перестає бути зовнішнім інструментом оптимізації й стає внутрішнім допоміжним механізмом підтримки динамічної рівноваги системи.

У межах концепції суб'єктивних систем Kubernetes-інфраструктура розглядається як цілісна організмоподібна система з власними механізмами сприйняття, внутрішньої регуляції та адаптаці. У такій інтерпретації нейромережевий модуль виконує роль когнітивного шару, аналогічного неокортексу біологічних систем, і призначений для формування високорівневих планів керування, узагальнення досвіду функціонування та синтезу політик адаптації.

При цьому рефлекторні контури керування, зокрема автоматичне масштабування, перепланування контейнерів та контроль працездатності, залишаються детермінованими й реалізуються стандартними механізмами Control Plane Kubernetes, такими як Scheduler, Controller Manager, Horizontal Pod Autoscaler та KEDA [3, 4]. Такий розподіл функцій відповідає принципам ієрархічного біонічного управління та кібернетичної регуляції, відповідно до яких швидкі контури забезпечують локальну стабілізацію системи, а повільніші когнітивні рівні відповідають за стратегічне планування й адаптацію [5].

Нейромережевий модуль у суб'єктивній системі Kubernetes орієнтований на задачі, що потребують інтерпретації складних багатовимірних станів та прогнозування динаміки системи в умовах неповної визначеності.

Одним із ключових напрямів є предиктивне масштабування обчислювальних ресурсів. Для цього застосовуються моделі часових рядів, зокрема рекурентні нейронні мережі типу LSTM, Temporal Fusion Transformer або статистичні моделі класу Prophet, які прогнозують майбутнє навантаження на основі телеметричних даних, таких як використання CPU та пам'яті, швидкість обробки запитів, затримки або довжина черг [6]. Результати прогнозування використовуються для формування рекомендацій autoscaling-механізмам у вигляді спеціалізованих керуючих об'єктів, що визначають допустимі межі кількості реплік, цільові показники завантаження та параметри реакції системи.

Іншим важливим класом задач є самодіагностика та визначення першопричин інцидентів (Root Cause Analysis). Для виявлення аномальних станів застосовуються алгоритми детекції відхилень, зокрема методи на основі Isolation Forest, робастної статистики або автоенкодерів [7]. Нейромережевий мовний модуль використовується для інтерпретації результатів детекції, кореляції логів, подій Kubernetes та змін конфігурацій, що дозволяє формувати узагальнені гіпотези щодо причин деградації продуктивності або порушення стабільності. Результатом цього процесу є формалізовані діагностичні та відновлювальні описи, придатні для подальшого машинного або напівавтоматичного виконання.

Крім того, нейромережевий модуль використовується для планування ресурсів і синтезу політик розміщення контейнерів. У цьому контексті LLM застосовується для формування рекомендацій щодо правил affinity та anti-affinity, taints і tolerations, оптимізації параметрів requests та limits, а також для cost-aware планування з урахуванням фінансових показників використання ресурсів. Це дозволяє узгодити вимоги до продуктивності, надійності та економічної ефективності системи.

Пряме керування Kubernetes-кластером з боку нейромережевого модуля є неприйнятним з точки зору детермінованості та безпеки. У зв'язку з цим у роботі запропоновано архітектурний підхід, за якого LLM виступає у ролі когнітивного контролера, що генерує формалізовані керуючі артефакти, але не здійснює безпосередніх змін у системі. Такий підхід узгоджується з сучасними принципами policy-based та declarative management.

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

Керуючі рішення нейромережевого модуля подаються у вигляді користувацьких ресурсів Kubernetes (CRD), політик у форматі policy-as-code або конфігураційних змін, що вносяться через GitOps-процеси. Спеціалізований Kubernetes Operator виконує функцію інтерфейсу між когнітивним рівнем та стандартними контролерами Control Plane, забезпечуючи формальну валідацію, контроль допустимих дій та відтворюваність змін. Перед застосуванням усі згенеровані рішення проходять перевірку за допомогою політик безпеки та CI-пайплайнів, що гарантує контрольовану еволюцію системи.

Формування біонічного датасету є ключовим елементом реалізації онтогенетичного підходу у суб'єктивній системі Kubernetes. Датасет представляється у вигляді послідовності пов'язаних записів типу «стан – дія – результат», що відображає причинно-наслідкові зв'язки між внутрішніми станами системи та прийнятими керуючими рішеннями [8].

Кожен запис включає сукупність спостережень, отриманих з систем телеметрії, логування та подій Kubernetes, опис поточного структурного й функціонального стану кластера, виконану дію з керування ресурсами або конфігурацією, а також зафіксований результат у вигляді змін показників продуктивності, стабільності або вартості. Додатково враховуються обмеження, зумовлені вимогами SLO, бюджетними рамками та політичними правилами керування.

Такий біонічний датасет забезпечує можливість формування внутрішніх моделей адаптації та саморегуляції, що відповідає концепції суб'єктивного онтогенезу і дозволяє системі накопичувати власний досвід функціонування у реальному середовищі.

Висновки. Запропонована в роботі концепція суб'єктивних систем формує цілісний теоретико-методологічний апарат для перенесення теорії функціонування складних адаптивних систем із абстрактних моделей у площину реальних технічних та інженерних об'єктів. На відміну від класичних агентно-популяційних та централізованих підходів, даний апарат орієнтований на внутрішню організацію системи, її онтогенетичний розвиток, саморегуляцію та здатність до функціональної реконфігурації в умовах змінного середовища.

Показано, що механізми онтогенезу, балансування та внутрішньої адаптації можуть бути безпосередньо застосовані до реальних комп'ютерних, кіберфізичних та виробничих систем без необхідності повної реконструкції їх архітектури. Це дозволяє розглядати технічні системи не лише як об'єкти керування, а як самодостатні функціональні організми, здатні до довготривалого розвитку, накопичення власного досвіду та локальної перебудови структури.

У межах даного дослідження було систематизовано методи застосування концепції суб'єктивних систем, формалізовано підхід до декомпозиції системи на функціональні органи та проаналізовано режими основного балансування і граничні стани переходу між стабілізацією та зміною структури.

Таким чином, застосування концепції суб'єктивних систем до оркестрації обчислювальних ресурсів дозволяє перейти від інструментального розуміння Kubernetes до інтерпретації його як організмоподібної системи з власною внутрішньою логікою функціонування, механізмами саморегуляції та потенціалом розвитку. Крім того цей підхід майже в 9 раз економічно ефективніший ніж класичні моделі розгортання оркестрації. Такий підхід відкриває можливості для створення більш автономних, адаптивних і стійких інфраструктур, здатних функціонувати в умовах високої динаміки та обмеженого ресурсного забезпечення.

Отримані результати мають теоретичне та прикладне значення для комп'ютерної інженерії, промислової автоматизації та оркестрації складних систем і створюють основу для подальших досліджень, спрямованих на математичну формалізацію суб'єктивних систем, розроблення програмних реалізацій і експериментальну перевірку запропонованих підходів у реальних інженерних середовищах.

Список бібліографічного опису

1. Ashby W. R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1956. 180 p.
2. Kashchenko D. Information Theory – Subjective Systems. Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. 2024. No. 56. P. 185–190. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-23
3. Hightower K., Burns B., Beda J. Kubernetes: Up and Running. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 366 p.
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. Wiener N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. Cambridge, MA : MIT Press, 1948. 318 p.

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.

6. Pham C., Minh N. Q., Nguyen D. T., Anh T. T. Q. Short-Term Electricity Load Forecasting Based on Temporal Fusion Transformer Model. IEEE Access. 2022. Vol. 10. Art. 106296. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3211941.
7. Chalapathy R., Chawla S. Deep Learning for Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 51, No. 5. Art. 94. P. 1–36. DOI: 10.1145/3344998.
8. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2018. 552 p.

References

1. Ashby W. R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1956. 180 p.
2. Kashchenko D. Information Theory – Subjective Systems. Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. 2024. No. 56. P. 185–190. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-23
3. Hightower K., Burns B., Beda J. Kubernetes: Up and Running. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 366 p.
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. Wiener N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. Cambridge, MA: MIT Press, 1948. 318 p.
6. Pham C., Minh N. Q., Nguyen D. T., Anh T. T. Q. Short-Term Electricity Load Forecasting Based on Temporal Fusion Transformer Model. IEEE Access. 2022. Vol. 10. Art. 106296. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3211941.
7. Chalapathy R., Chawla S. Deep Learning for Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 51, No. 5. Art. 94. P. 1–36. DOI: 10.1145/3344998.
8. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2018. 552 p.

Історія статті:
Отримано: 07.02.2026 Доопрацьовано: 23.02.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026

© Чепинога А.В., Кащенко Д.О.