

О. А. КОЗИНА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ МУЛЬТИХМАРНИХ КОМ'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З РЕПЛІКАМИ ДАНИХ

У статті запропонована концептуальна модель інформаційної структури мультимарної системи у вигляді діаграми IDEF0 та розроблена її декомпозиція для нативної мультимари типу DBaaS, де визначено вхідні та вихідні параметри, механізми та обмеження. На основі цих інформаційних моделей розроблено математичну модель мультимари узагальненого типу з репліками даних, що враховує географічне розташування як ресурсів провайдерів хмарних послуг, так і кластерів кінцевих користувачів мультимари. Іл.: 2. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: інформаційна структура; мультимарна система; нативна DBaaS; математична модель.

Постановка задачі. Для подальшого розвитку та більш широкого впровадження хмарних технологій потрібна єдина система порівняння та вибору постачальників ІТ-послуг для забезпечення зручного мережевого доступу на вимогу до теоретично нескінченного пулу високо-гнучких і масштабованих обчислювальних ресурсів, таких як мережі, сервери, сховища, програми та служби [1].

Обчислювальні послуги, до яких мають доступ клієнти хмар, повністю абстрактні. З одного боку абстракція забезпечує ключові переваги хмарних обчислень, а саме спільний доступ до ресурсів, чие фізичне розташування не має значення, та приховування фонових деталей надання ІТ-сервісу від клієнта [2]. Але, з іншого, отримання доступу до ресурсів лише у одного провайдера хмарних послуг (Cloud Service Providers, CSP) має суттєві недоліки [3], особливо для компаній, що мають справу з великими обсягами даних з підвищеними вимогами до надійності та доступності, як наприклад, банківські установи чи державні медичні заклади.

Багато CSP генерують та підтримують у своїх клієнтів прив'язаність, тобто економічний стан, за якого клієнт залежить від технології, продуктів або послуг конкретного постачальника настільки, що перехід до іншого конкурента стає неможливим або досить дорогим [4]. Різні CSP підтримують різні технології зберігання даних, формати та протоколи доступу до даних, змушуючи клієнтів хмари уникати міграції між CSP через таку несумісність. У зв'язку з цим необхідні активні зусилля зі

стандартизації для забезпечення переносимості даних між різнорідними хмарними системами.

Створення та використання мультихмарних систем (МХС) з репліками даних зводить до мінімуму прив'язаність до CSP, а також значно знижує ризик втрати даних при збою у одного з CSP гарантуючи при цьому високу доступність та відновлення даних.

Перехід до МХС пов'язаний зі складним вибором провайдерів та архітектури усєї розподіленої системи, який потребує наявності об'єктивних метрик порівняння та кількісних оцінок властивостей послуг, що можуть отримувати клієнт МХС. Розробка моделей інформаційних структур МХС є першим кроком до аналітичного формулювання та вирішення цієї проблеми.

Аналіз літератури. У чисельній кількості робіт, що присвячені визначенню аналітичних методів порівняння хмарних систем, автори приділяють увагу аналізу груп параметрів, що відображують лише якусь окрему сторону функціонування цих складних розподілених структур [1, 5 – 8], або розглядають особливості хмарних систем, що надають якийсь окремий тип послуг [1, 3, 9]. При цьому для вирішення поставлених задач автори використовують дуже різноманітні методи аналітичного та імітаційного моделювання. Так у роботі [5] автори порівнюють можливості використання програмних інфраструктур, здатних оркеструвати різнорідні ресурси CSP, за найкращою відповідністю потребам клієнта. Усі властивості оркестраторів запропоновано класифікувати за двома основними категоріями: хмарні функції та функції додатків, за якими створена подальша таксономія відповідних метрик і вимірів фреймворків оркестровки. Автори пропонують для оцінки можливостей МХС порівнювати таблиці наявності тієї чи іншої функції у оркестраторі, але двійкові оцінки не можуть, по-перше, відобразити багато таких параметрів хмарних систем, як, наприклад, продуктивність чи латентність, по-друге, відобразити вплив інформаційних методів та структур на властивості різних складових, наприклад, на властивості проміжного програмного забезпечення (ППЗ).

У роботі [1] проведено порівняльний компромісний аналіз архітектур ППЗ для менеджменту даних у мультихмарних сховищ різного типу. Через величезну складність, неоднорідність і нестійкість конфігурацій МХС автори запропонували групування вимог, які повинні враховуватися та підтримуватися додатками, що розгортаються, керуються та виконуються у хмарних сховищах. На їхній базі було розроблено декілька архітектур ППЗ для обраних сценаріїв динаміки обробки даних клієнтами МХС, у тому числі, фреймворк з можливостями самонастроювання для керування

даними в мультимарах. Розроблений фреймворк постійно адаптується до безперервних змін у робочому середовищі та на основі зібраних показників та визначеного рівня обслуговування (Service Level Agreement, SLA) приймає рішення, щодо управління даними та автономної реконфігурації архітектури МХС. Але сформульовані авторами групи вимог, за якими були розроблені архітектури ППЗ, мають здебільшого якісний характер, тому не можуть бути аналітичною базою об'єктивного порівняння МХС та, відповідно, вибору оптимального складу CSP.

Автори роботи [6] запропонували метод порівняльного аналізу масштабованості хмарних додатків, що базується на метриці попиту на ресурс та метриці завантаження ресурсу. Розроблений комплекс допомагає швидко оцінити, чи можуть певні обсяги розподілених ресурсів впоратися з інтенсивністю навантаження, але такі метрики не можуть бути повноцінними оцінками МХС загалом.

У роботі [7] пропонується визначити оптимальний склад SLA DBaaS МХС за три кроки: декомпозиція вхідного запиту, генерація відповідних SLA для підзапитів та агрегація останніх у форму кортежу з пари: вартість запиту та час відклику *RT*. При цьому МХС аналітично розглядається як орієнтовний ациклічний граф (Directed Acyclic Graph, DAG), а *RT* є сумою час відклику максимального шляху в DAG, з урахуванням часу передачі між провайдерами. Автори роботи [10] визначають, що при розробці структури МХС важливіше мінімізувати витрати клієнту за умови забезпечення високої продуктивності обробки даних, тому для обчислення мінімальної затримки обробки задач у кожному обчислювальному ноді (ОН) пропонують представляти МХС також у вигляді DAG, у якому вершини відображають обчислювальні ноди ОН, а ребра – канали зв'язку між ними. Автори роботи [9] також використовують визначення хмарних систем типу IaaS у вигляді DAG, де вершини графа є завдання, що розташовані по віртуальних машинах різних провайдерів, але використовують цей граф при аналізі статичного планування робочого навантаження на ресурси розподіленої системи із обмеженим терміном виконання завдань. Основна ідея цього підходу полягає в тому, щоб зіставити завдання, тобто, вершини DAG з найшвидшими віртуальними машинами, які пропонує хмарний постачальник, щоб виконати єдиний кінцевий термін робочого процесу, а потім рекурсивно призначити часткові критичні шляхи DAG найдешевшій віртуальній машині. Автори підкреслюють, що попри переваги використаного ними IaaS Cloud Partial Critical Paths алгоритму для планування робочих процесів із обмеженими термінами, запропонована процедура профілювання також може бути придатною для використання інших алгоритмів планування навантаження у хмарних системах, таких як, генетичні алгоритми, алгоритми оптимізації

рою частинок та колонії мурашок. Таким чином, результати, отримані у цих дослідженнях демонструють корисність моделі DAG у аналітичному визначенні таких динамічних властивостей МХС, як планування, балансування та продуктивність, але така модель не відображає взаємозв'язки шарів архітектури розподілених систем, особливостей методів і протоколів обробки даних у них, а також економічні обмеження використання хмарних послуг.

Дослідження [8] демонструє переваги використання теорії нечіткої логіки у вирішенні проблеми оптимального вибору ресурсів CSP на основі продуктивності, гнучкості, вартості та безпеки, тобто, так званої групи параметрів PACS (performance, agility, cost, security). Автори запропонували модель вибору мультимарних ресурсів з точки зору клієнта, який бажає оптимальних рішень для розгортання своїх високо навантажених додатків. Ця модель містить два рівні механізму нечіткого логічного висновку для оцінки CSP: оцінки потрібних клієнту факторів PACS та оцінки CSP відповідним факторам PACS. Розроблений оптимізатор попередньо рекомендує інтелектуальний набір налаштованих рішень для хмарних шаблонів, оптимізованих на основі критеріїв PACS для мультимарних ресурсів. Однак, використання лише параметрів PACS звужує потенціал комплексного порівняння МХС та не дає змоги оцінити, наприклад, узгодженість та доступність даних у різних конфігураціях мультимар з різними CSP.

Мета статті. Розробка комплексу моделей інформаційної структури МХС з реплікацією даних, як аналітичної бази створення високоефективної архітектури розподіленої системи на ресурсах об'єктивно обраних CSP.

Концептуальна модель МХС. Мультимарні системи є розподіленими паралельними середовищами, що складаються з множини взаємопов'язаних автономних елементів обробки даних (ЕОД). Можливості цих ЕОД можуть бути різними, вони можуть бути різнорідними, і тому взаємозв'язки між ними можуть бути різними, але загальним є те, що ЕОД у МХС не мають доступу до станів один одного: вони можуть його дізнатися лише обмінюючись повідомленнями, що вимагає витрат на зв'язок [3].

Сутність додатків, що розгорнуті у ЕОД, визначають тип послуг, до яких мають доступ клієнти МХС, наприклад, інфраструктура як послуга (IaaS), платформа як послуга (PaaS), програмне забезпечення як послуга (SaaS), база даних як послуга (DBaaS), функція як послуга (FaaS), тестування як послуга (TaaS), що узагальнено назвемо *-aaS, тобто, визначена сутність як послуга.

Для формального визначення процесів у складних системах широко використовується методологія функціонального проектування. Метод інтегрованого визначення для функціонального моделювання (Integrated Definition for Function Modelling) IDEF0 використовується для моделювання структурних представлень функцій, залучених до процесів або складних систем [11]. Діаграми IDEF0 базуються на п'яти компонентах: процес, вхідні та вихідні дані, елементи керування та механізми, що використовуються для функціонування процесу. Таким чином, концептуальну модель узагальненої мультимарної системи з точки зору функції з надання ІТ-послуг типу *-aaS доцільно розглядати як діаграму IDEF0.

Концептуальна модель МХС у формі IDEF0, що наведена на рис.1, дозволяє розглядати та керувати об'єктами, що мають вплив при реалізації основної функції системи, у інформаційних потоках, які при цьому перетворюються на процеси, що потрібні для виконання основної функції.

Для узагальненого типу МХС вхідними потоками концептуальної моделі є запити кінцевих користувачів додатків, що розташовані у МХС, або завдання від ЕОД, наприклад, запит на надання додаткового вузла обробки транзакції у визначеному дата-центрі.

Множина механізмів та засобів, які надають можливість виконувати хмарну послугу типу *-aaS, складається з:

- технічних ресурсів та компонентів дата-центрів, ОН, обчислювальних нодів, сховищ даних та інших форм ЕОД брокеру МХС та усіх CSP;

- даних про географічне розташування дата-центрів, ОН, обчислювальних нодів, сховищ даних CSP;

- методів обробки, обміну та зберігання даних;

- засобів оркестровки, моніторингу та балансування навантаження на ресурси та інфраструктуру CSP. Інструменти хмарної оркестровки не тільки керують всім життєвим циклом та виконують адаптацію залучених ресурсів CSP, а також виконують розгортання додатків на основі певної топології ресурсів хмари [12].

Особливістю групи обмежень та елементів керування основною функцією МХС у концептуальній моделі є поєднання економічних та технічних параметрів. Саме ця група є найбільш складним та невизначеним місцем у проблемі формалізації та стандартизації функціонування МХС усіх типів. Елементи керування діаграми IDEF0 представляють умови, що необхідні для отримання результатів, тобто, отримання вихідних даних концептуальної моделі МХС.

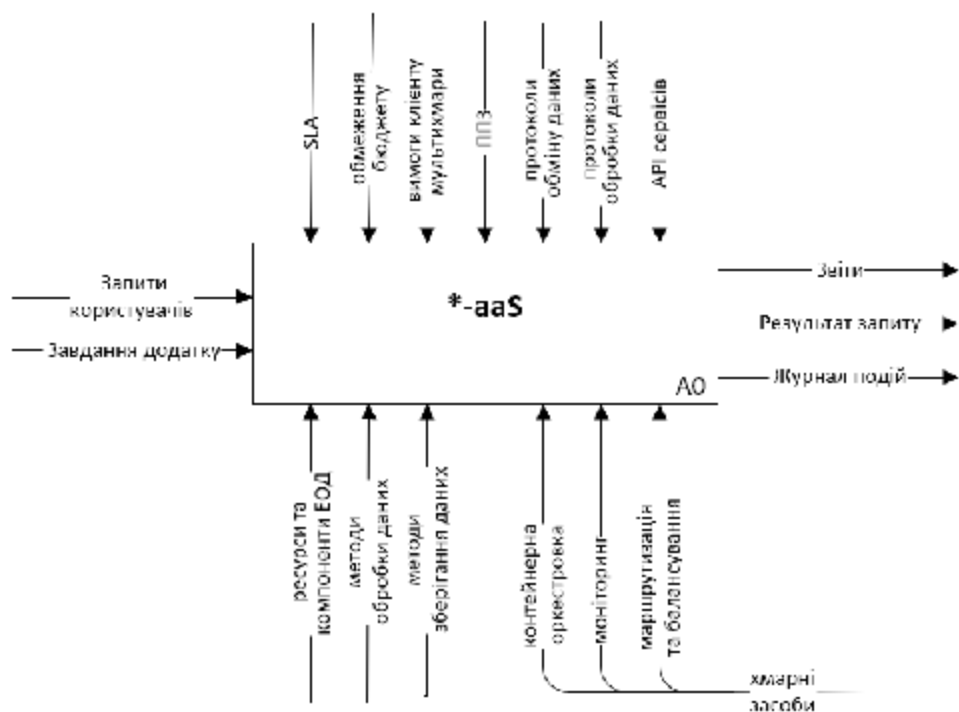


Рис.1. Концептуальна модель MXC узагальненого типу

У загальному випадку елементами керування MXC є:

- вимоги, гарантії та специфікації угоди про SLA. У залежності від сутності основної функції MXC до вимог SLA можуть бути віднесені також ключові вимоги ефективності – продуктивність, гнучкість, вартість та безпека (група параметрів PACS) [8], або спеціальні вимоги, як, наприклад, для DBaaS мультимедіа – атомарність, узгодженість, ізольованість, довговічність (група параметрів ACID). Параметри якості обслуговування (QoS), які часто є частиною SLA, як наприклад, час відгуку, пропускну здатність тощо, можуть неодноразово змінюватися протягом функціонування MXC, тому ці параметри потрібно ретельно контролювати [13];
- обмеження бюджету та особливі вимоги клієнту MXC відповідно до його унікальних бізнес-потреб;
- API сервісів/мікросервісів, що складають сутність основної ІТ-послуги типу *-aaS;
- протоколи обміну та обробки даних є найбільш формалізованою частиною процесів у MXC, та вибір відповідних протоколів як у брокері

МХС, так і у CSP впливає на ефективність функціонування та параметри QoS мультимарі;

- ППЗ, що абстрагує складність структури мультимарі від додатку, а також визначає принципи об'єднання різнорідних ресурсів CSP, принципи взаємодії мікросервісів кожного CSP, протоколи та методи керування даними, стратегії розгортання додатку у МХС [14].

Вихідними даними для МХС узагальненого типу є результати запитів кінцевих користувачів додатків чи сховищ даних, звіти з використання ресурсів, потужностей, додатків CSP, журнали дій, логі та резервні копії даних.

Декомпозиція концептуальної моделі МХС. Для виконання декомпозиції концептуальної моделі МХС треба визначити сутність послуги, що надається клієнтам мультимарі. Розглянемо розроблену декомпозицію концептуальної моделі нативної МХС типу DBaaS (рис.2), у якій реалізована часткова реплікація фрагментів схеми бази даних у кожному провайдеру, тобто, кожна репліка фрагменту бази даних зберігається у кількох репліках в межах кожного CSP, та повна реплікація фрагментів між усіма провайдерами МХС.

У такий спосіб зберігання даних кінцевому користувачу гарантується, що запит читання, відправлений до будь-якого дата-центру CSP, поверне актуальні і ідентичні дані.

Вхідний потік даних, що формується з запитів кінцевих користувачів мультимарі П, потрапляє у блок менеджменту мікросервісів А1 (Microservice management/API Gateway). Наявність мікросервісів є однією з визначальних особливостей нативної архітектури хмарних систем [15]. Весь вхідний трафік МХС проходить через блок А1, який відповідає за маршрутизацію трафіку (М1) до відповідної служби. Вихідні потоки блоку А1: стани ЕОД та метадані запиту, що містять інформацію про схеми та версії даних, які поступають на вхід блоку А2, а також змістовні дані запиту та транзакції, у межах якої вхідний запит має бути виконаний, формуються під впливом вимог та обмежень МХС, до яких віднесено: параметри АСІD та вимоги, що пов'язані з особливістю бізнес-процесів чи персональних вподобань клієнта МХС (С1); обмеження АРІ мікро-сервісів (С2); архітектура та алгоритми реалізації моделей у ППЗ (С3); вимоги SLA та QoS (С4); протоколи обміну даних (С5). Для виконання функцій блоку А1 мають бути задіяні ресурси та компоненти ЕОД (М2) та засоби моніторингу (М3).

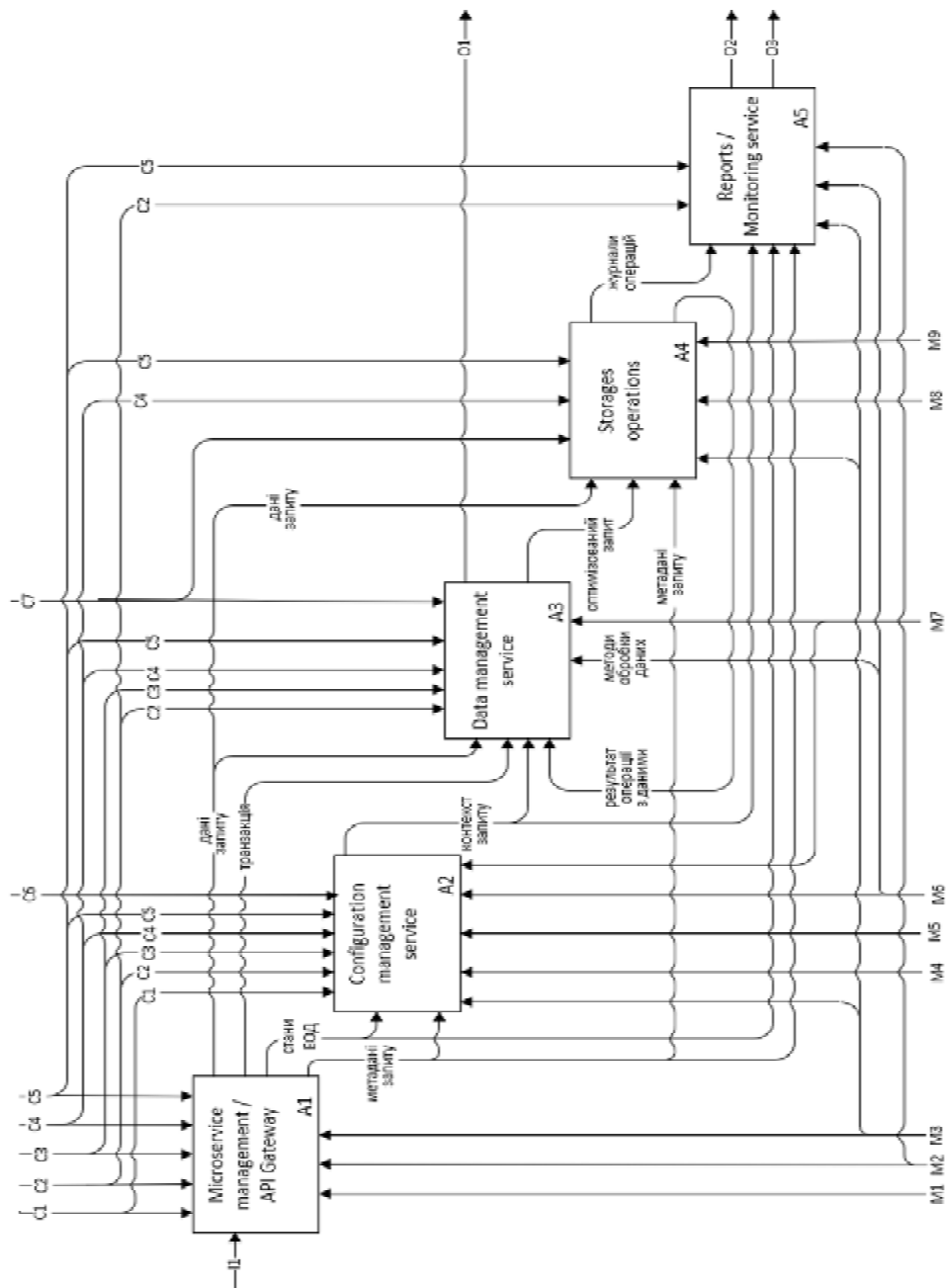


Рис. 2. Декомпозиція нативної DBaaS MXC з частковою реплікацією фрагментів схеми бази даних

На вхід блоку керування конфігурацією MXC A2 (Configuration management service) потрапляють дані, щодо поточних станів хмарних

ресурсів кожного CSP та метадані вхідного запиту, які створюють поточну конфігурацію задіяних мікросервісів CSP та обчислювальних нодів (M7), необхідних для отримання результатів виконання вхідного запиту. Кожен мікросервіс розгортається в програмному контейнері, якій забезпечує мобільність і гарантує узгодженість у різних середовищах розгортання.

Управління контейнерами здійснюється за допомогою оркестратора контейнерів (M4), основними функціями якого є:

- афінність, тобто таке розташування контейнерів, що сприяє доступності та продуктивності МХС;
- автоматичне виявлення та виправлення збоїв;
- автоматичне додавання чи видалення екземпляра контейнеру відповідно вхідного трафіку чи обчислювальних завдань;
- координація оновлення з нульовим простоем розгортання.

Особливістю розробленої моделі є визначення ролі та місця географічної мапи ресурсів та компонентів CSP (M5), яка разом з відповідними методами обробки даних (M6) надає змогу ППЗ отримати максимально ефективну конфігурацію ресурсів МХС згідно вимог та обмежень C1 – C5, а також обмеження бюджету клієнта МХС (C6).

Також, у запропонованій моделі МХС відокремлені ресурси ОН обчислювальних нодів дата-центрів (M7) та сховищ даних (M9) у механізмах різних блоків. Таке розділення підкреслює вплив нативної архітектури МХС на процес формування моделі оцінки ефективності функціонування МХС.

На вхід блоку керування даними A3 (Data management service) додатково поступає контекст запиту, сформований ППЗ у A2, що містить інформацію про те за якими протоколами та між якими сховищами даних треба виконувати дії згідно моделі узгодженості даних чи згідно моделі реплікації змістовних даних, ключів, кешей, логів тощо. Для формулювання оптимізованого запиту, що є вихідним потоком для блоку A3, використовуються ресурси обчислювальних нодів ОН (M7) визначених дата-центрів та методи обробки даних (M6), функціонування яких підпорядковано вимогам C2 – C5 та протоколам обробки даних (C7).

Наявність блоку операцій у сховищах даних A4 (Storages operations) дозволить сформулювати окрему декомпозицію моделі функціонування цих апаратних ресурсів нативної DBaaS МХС та визначити їх вплив на вибір провайдерів CSP. У блоці A4 згідно визначених вимог SLA та параметрів QoS (C4), а також відповідних протоколів обміну даних (C5) та протоколів обробки даних (C7) у сховищах даних (M9) методами зберігання даних (M8) формується результат кожної поточної операції у базах даних визначеного типу. Результат операції у базі даних поступає на вхід блоку A3 для виконання умов визначеної транзакції та обмежень усіх

моделей узгодженості та реплікації даних як між провайдерами, так і у межах дата-центрів одного провайдера. Мікросервіси відображення результатів вхідного запиту блоку A3 формують вихідний потік O1 у той час, як лог усіх операцій з даними з блоку A4 поступає на вхід блоку звітів та моніторингу МХС A5 (Reports/ Monitoring service).

Блок A5 надає клієнту МХС статистичні та аналітичні звіти O2 про потоки вхідних даних, поточні стани та конфігурації використаних ресурсів, обробляючи під керуванням мікросервісів моніторингу та формування звітів (C2) та протоколів обміну даних (C5) стани ЕОД та метадані вхідних запитів, що потрапляють на його вхід. Вхідні до блоку A5 журнали операцій у сховищах даних та контекст вхідних запитів перетворюються методами обробки даних (M6) та засобами моніторингу (M3) у вихідний потік МХС – журнали подій O3.

Подальша декомпозиція кожного блоку моделі DBaaS МХС, залежить від цілей аналізу процесів у цій складній розподіленій системі.

Розроблена декомпозиція є графічною моделлю інформаційних зв'язків між складовими МХС та може бути абстрактною базою для формулювання математичної моделі інформаційної структури мультимарних систем. Аналіз інформаційних взаємозв'язків між блоками розробленої декомпозиції DBaaS МХС виявляє, що блоки A1, A2 та A5 разом з усіма визначеними вимогами, обмеженнями та потоками керування, що позначені стрілками групи C*, та усіма визначеними механізмами та засобами забезпечення виконання функцій МХС, що позначені у моделі стрілками групи M*, можуть розглядатися як обов'язкові елементи математичної моделі інформаційної структури МХС узагальненого типу. Іншими словами, у декомпозиціях усіх інших типів блоки A1, A2, A5 та потоки груп M* та C* обов'язково будуть присутні незалежно від типу хмарних послуг, що надаються клієнту. У той же час блоки A3 та A4, вхідні та вихідні потоки даних будуть змінюватися та доповнюватися відповідно до сутності послуг, що надаються клієнту МХС. Таким чином, у інформаційній моделі МХС узагальненого типу маємо дві складові: множину незмінних (Permanent Components, PC) та множину змінних (Changeable Component, CC) компонентів.

Математична модель інформаційної структури МХС. Відповідно до складу компонентів у інформаційній моделі МХС узагальненого типу визначимо сутність групи незмінних компонентів:

- множина провайдерів хмарних послуг $S_{csp}, csp = \overline{1, P}$, де P – потужність множини S_{csp} , тобто, загальна кількість провайдерів хмарних послуг, що формують поточну конфігурацію МХС;

- множина S_{dc} дата-центрів МХС потужністю $|S_{dc}| = DC = \sum_{i=1}^P D_i \geq 2$

, де D_i – кількість дата-центрів у i -му провайдері, що формують поточну конфігурацію МХС;

- матриця розташування ОН M_{nod} у дата-центрах МХС. Розмірність цієї матриці: $dim M_{nod} = DC \times N$, де N – загальна кількість ОН, що формують поточну конфігурацію МХС;

- матриця M_{brT} математичних очікувань часу мережної затримки (часу встановлення з'єднання) між брокерами ППЗ та є відображенням мапи географічного розташування брокерів ППЗ у дата-центрах МХС. Розмірність цієї матриці дорівнює кількості брокерів M ППЗ у поточній конфігурації МХС: $dim M_{brT} = M$;

- множина $S_{st} = \{ST_i | i = 1 \dots P\}$ фрагментів баз даних зі змістовними даними у МХС, елементи якої є множини фрагментів баз даних у дата-центрах по кожному CSP $ST_i = \{st_x^y | x = 1 \dots FR_i, y = 1 \dots D_i\}$, де FR_i – загальна кількість фрагментів у i -му CSP. Потужність множини S_{st} дорівнює кількості первинних фрагментів бази даних у МХС: $S_{st} = \sum_{i=1}^P FR_i = FR$.

Множина S_{st} відображає той факт, що у МХС може існувати не ізоморфні розподілення бази змістовних даних на первинні фрагменти по CSP, що вимагає наявності додаткової симетричної матриці M_{fr} рефлексивного бінарного відношення фрагментів бази даних з усіх CSP з розмірністю FR . Приклад матриці:

$$M_{fr} = \begin{matrix} & st_1^3(1) & st_2^5(1) & st_1^3(2) & \cdots & st_3^4(4) \\ \begin{matrix} st_1^3(1) \\ st_2^5(1) \\ st_1^3(2) \\ \vdots \\ st_3^4(4) \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \vdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{array} \right. & , & (1) \end{matrix}$$

у якої 1 на перехресті третього рядка та другого стовбця означає, що перший фрагмент, що розташований у третьому дата-центрі другого провайдера $st_1^3(2)$ відповідає другому фрагменту, розташованому у п'ятому дата-центрі першого провайдера $st_2^5(1)$, та 0 показує відсутність відповідності між фрагментами;

- матриця розташування баз логів запису даних M_{stl} за дата-центрами МХС, що може мати такий вигляд:

$$M_{stl} = \begin{matrix} & D_1(1) & \dots & D_1(m) & \dots & D_5(P) \\ \begin{matrix} stl_1 \\ \vdots \\ stl_j \\ \vdots \\ stl_K \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{array} \right| & , & (2) \end{matrix}$$

у якій база логів stl_K розташована у першому дата-центрі m -го провайдеру. Розмірність матриці (2) $dim M_{stl} = DC \times K$, де K – загальна кількість логів у МХС;

- множина S_{sla} результуючих (з точки зору впливу ППЗ) параметрів SLA та QoS МХС у кількісному вигляді, до яких також відносяться вірогідності (ступені досяжності) узгодженості, доступності даних та стійкості МХС до розділення у термінах теореми CAP;

- обмеження бюджету клієнта C_{lim} за розрахунковий період;

- множина S_{rout} параметрів алгоритмів маршрутизації і балансування трафіку запитів та навантажень у ППЗ, що містить, наприклад, інтервали дозволених меж змін завантаженості нодів, інтенсивності обмінів завданнями між нодами МХС, тощо;

- множина параметрів S_{serv} алгоритмів та протоколів обробки даних, які можуть задавати не тільки склад мікросервісів блоку АЗ, а також й архітектуру ППЗ, та виражатися у, наприклад, латентності запису даних або терміні досяжності повної синхронізації даних у репліках при реалізації визначеного протоколу результуючої моделі узгодженості даних у МХС;

- множина S_u мережних параметрів з'єднань між кластерами кінцевих користувачів, що генерують вхідний потік запитів чи завдань до ресурсів МХС, та відповідними брокерами ППЗ. До складу множини $S_u = \{M_{tu}, M_{sdu}\}$ входить матриця M_{tu} математичних очікувань часу доставки пакетів (часу встановлення з'єднання) від кожного кластеру кінцевих користувачів до відповідного закріпленого за кластером брокеру ППЗ, а також матриця M_{sdu} середньоквадратичних відхилень часу доставки пакетів від кластеру до відповідного брокеру ППЗ. Обидві матриці мають розмірність $dim M_{tu} = M_{sdu} = U \times M$, де U – кількість кластерів, на які поділено усіх потенційних користувачів МХС. Матриця M_{tu} є відображенням мапи географічного розташування регіонів обслуговування

користувачів брокерами ППЗ МХС. Формування таких кластерів є оптимізаційною задачею, вирішення якої значною мірою вплине на вибір CSP та архітектуру усієї МХС.

Таким чином, математична модель інформаційної структури МХС загального типу має такий вигляд:

$$K = \langle \{PC\}, \{CC\} \rangle = \langle \{S_{csp}, S_{dc}, M_{nod}, M_{brT}, S_{st}, M_{fr}, M_{stl}, S_{sla}, C_{lim}, S_{rou}, S_{serv}, S_u\}, \{CC\} \rangle \quad (3)$$

де $\{PC\}$ – підмножина незмінних компонентів, $\{CC\}$ – підмножина змінних компонентів, що формуються здебільшого з множин параметрів мікросервісів, методів та протоколів, що визначаються конкретним типом хмарного сервісу, що надається, та вимог, які пов'язані з особливістю бізнес-процесів чи персональних вподобань клієнту МХС.

Запропонована нова структура математичної моделі інформаційної структури МХС за виразом (3) дозволяє формулювати клас математичних моделей інформаційних структур МХС усіх відомих спеціальних типів *-aaS шляхом визначення підмножини $\{CC\}$ для кожного окремого випадку.

Розроблена математична модель МХС має потужне практичне значення під час формулювання інтегрального показника ефективності функціонування цих складних розподілених систем для клієнтів хмарних послуг з різними вимогами. Наявність чисельних параметрів для порівняння структур МХС дозволить клієнтам хмарних послуг обрати найбільш оптимальний склад хмарних провайдерів та відповідну структуру ППЗ для власних потреб.

Висновки. В роботі вперше запропоновано новий принцип формулювання моделі інформаційної структури МХС узагальненого типу у вигляді комплексу моделей, що складається з концептуальної моделі у вигляді діаграми IDEF0, її декомпозиції та математичної моделі мультихмари. Вперше розроблено концептуальну модель мультихмари узагальненого типу у вигляді діаграми IDEF0. На основі аналізу розробленої декомпозиції концептуальної моделі інформаційної структури МХС на прикладі нативної DBaaS МХС з частковою реплікацією фрагментів схеми бази даних вперше розроблено математичну модель МХС узагальненого типу.

Список літератури:

1. Rafique A. Middleware for Data Management in Multi-Cloud: disser. ...PhD: Computer Science / Ansar Rafique. – Leuven (Belgium), 2019. – 222 p.

2. Таненбаум Э.С. Распределенные системы / М. ван Стин, Э. Таненбаум. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 584 с.
3. Özsu M.T. Principles of Distributed Database Systems / M.T. Özsu, P. Valduriez. – Springer Cham, 2020. – 674 p.
4. Taherkordi A. Future Cloud Systems Design: Challenges and Research Directions / A. Taherkordi, F. Zahid, Y. Verginadis, G. Horn // IEEE Access, Vol. 6, 2018. – P. 74120-74150.
5. Tomarchio O. Cloud resource orchestration in the multi-cloud landscape: a systematic review of existing frameworks / O. Tomarchio, D. Calcaterra, G.D. Modica // Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications, Vol. 9:49, 2020. – P. 1–24.
6. Henning S. A configurable method for benchmarking scalability of cloud-native applications / S. Henning, W. Hasselbring // Empirical Software Engineering, Vol. 27:143, 2022. – P. 1-43.
7. Wojtowicz D. SLA Definition for Multi-Cloud Queries / D. Wojtowicz, S. Yin, F. Morvan // Proceedings of the BDA 2020 Conference, October 27-29, 2020, En ligne, France, 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www. URL <https://hal.inria.fr/hal-03176597>.
8. Pandey A. Fuzzy-Engineered Multi-Cloud Resource Brokering for Data-intensive Applications / A. Pandey, P. Callyam, Z. Lyu, T. Joshi // 2021 IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid), P. 257-266.
9. Taal A. Profiling the scheduling decisions for handling critical paths in deadline-constrained cloud workflows / A. Taal, J. Wanga, C. de Laat, Z. Zhao // Future Generation Computer Systems, Vol. 100, 2019. – P. 237-249.
10. Chen Y. Cloud Network and Mathematical Model Calculation Scheme for Dynamic Big Data / Y. Chen, Z. Qiu // IEEE Access, Vol. 8, 2020. – P. 137322-137329.
11. Manenti G. Functional Modelling and IDEF0 to Enhance and Support Process Tailoring in Systems Engineering / G. Manenti, M. Ebrahimi-arjestan, L. Yang, M. Yu // 2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE), October 2019, Edinburgh, UK, 2019. – P. 1-8.
12. Kritikos K. Multi-cloud provisioning of business processes / K. Kritikos, C. Zeginis, J. Iranzo et al. // Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications, Vol. 8:18, 2019. – P. 1–29.
13. Chana I. Quality of Service and Service Level Agreements for Cloud Environments: Issues and Challenges / Inderveer Chana, Sukhpal Singh // Cloud Computing. Computer Communications and Networks / Z. Mahmood. – Springer Cham, 2014. – Ch. 3. – P. 51-72.
14. Козіна О.А. Архітектура проміжного програмного забезпечення для узгодження даних в мультимарних системах / О.А. Козіна, В.І. Панченко, О.М. Рисованій // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – №2 (6). – С. 101-112.
15. Vettor R. Architecting Cloud-Native .NET Apps for Azure / R. Vettor, S. Smith. – Microsoft Corp, Washington, 2022. – 192 p.

References

1. Rafique, A., (2019), *Middleware for Data Management in Multi-Cloud: dissertation*, KU Leuven, Belgium, 222 p.
2. Tanenbaum, A. and Steen, M.V. (2021), *Distributed systems*, DMK Press, Moscow, 584 p.
3. Özsu, M.T. and Valduriez, P. (2020), *Principles of Distributed Database Systems*, Springer Cham, 674 p.
4. Taherkordi, A., Zahid, F. and Verginadis, Y., Horn, G. (2018), "Future Cloud Systems Design: Challenges and Research Directions", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 74120-74150.
5. Tomarchio, O., Calcaterra, D. and Modica, G.D. (2020), "Cloud resource orchestration in the multi-cloud landscape: a systematic review of existing frameworks", *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, Vol. 9:49, pp. 1-24.

6. Henning, S. and Hasselbring, W. (2022), "A configurable method for benchmarking scalability of cloud-native applications", *Empirical Software Engineering*, Vol. 27:143, pp. 1-43.
7. Wojtowicz, D., Yin, S. and Morvan, F. (2020), "SLA Definition for Multi-Cloud Queries", available at: <https://hal.inria.fr/hal-03176597> (accessed 19 November 2022).
8. Pandey, A., Calyam, P., Lyu, Z. and Joshi, T. (2021), "Fuzzy-Engineered Multi-Cloud Resource Brokering for Data-intensive Applications", *IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid)*, pp. 257-266.
9. Taal, A., Wanga, J., de Laat, C. and Zhao, Z. (2019), "Profiling the scheduling decisions for handling critical paths in deadline-constrained cloud workflows", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 100, pp. 237-249.
10. Chen, Y. and Qiu, Z. (2020), "Cloud Network and Mathematical Model Calculation Scheme for Dynamic Big Data", *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 137322-137329.
11. Manenti, G., Ebrahimiarestan, M., Yang, L. and Yu, M. (2019), "Functional Modelling and IDEF0 to Enhance and Support Process Tailoring in Systems Engineering", *2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp.1-8.
12. Kritikos, K., Zeginis, C., Iranzo, J., Gonzalez, R., Seybold, D., Griesinger, F. and Domaschka, J. (2019), "Multi-cloud provisioning of business processes", *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, Vol. 8:18, pp. 1–29.
13. Chana, I. and Singh S., (2014), "Quality of Service and Service Level Agreements for Cloud Environments: Issues and Challenges", in Mahmood, Z. (Ed.), *Cloud Computing. Computer Communications and Networks*, Springer Cham, Ch. 3, pp. 51-72.
14. Kozina O.A., Panchenko, V.I. and Rysovanyi, O.M. (2021), "Архитектура промізного програмного забезпечення для узгодження даних в мультимедійних системах" [Middleware architecture for data consistency in multi-cloud systems]", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modeling*, Kharkiv: NTU "KhPI", No. 2 (6), pp.101-112, [In Ukrainian].
15. Vettor, R. and Smith, S. (2022), *Architecting Cloud-Native .NET Apps for Azure*, Microsoft Corp, Washington, 192 p.

Надійшла (received) 30.11.2022

Статтю представив д.т.н., проф. кафедри Електронних обчислювальних машин ХНУРЕ Волк Максим Олександрович.

Kozina Olha, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Kirpicheva str., 2, Kharkov, Ukraine, 61002,
Associate Professor at Department of Computer Engineering and Programming;
Tel.:+38-057-707-01-65, e-mail: olha.kozina@kpi.edu.ua;
ORCID ID: 0000-0003-0740-7068

УДК 004.75

Моделі інформаційної структури мультихмарних ком'ютерних систем з реплікацією даних / Козіна О.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – С. 139 –154.

У статті запропонована концептуальна модель інформаційної структури мультихмарної системи у вигляді діаграми IDEF0 та розроблена її декомпозиція для нативної мультихмари типу DBaaS, де визначено вхідні та вихідні параметри, механізми та обмеження. На основі цих інформаційних моделей розроблено математичну модель мультихмари узагальненого типу з репліками даних, що враховує географічне розташування як ресурсів провайдерів хмарних послуг, так і кластерів кінцевих користувачів мультихмари. Іл.: 2. Бібл.: 15 назв.

Ключові слова: інформаційна структура; мультихмарна система; нативна DBaaS; математична модель.

UDC 004.75

Models of the information structure of multicloud computer systems with data replication / Kozina O.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – P. 139 – 154.

In the article, a conceptual model of the information structure of a multicloud system in the form of an IDEF0 diagram is proposed. Its decomposition for a native multi-cloud of the DBaaS type with identifications of the input and output parameters, mechanisms, and restrictions is developed. Based on these information models, a mathematical model of a generalized type of multi-cloud with data replication has been developed, which takes into account the geo-location of both the resources of cloud service providers and clusters of end users. Figs.: 2. Refs.: 15 titles.

Keywords: information structure; multicloud systems; native DBaaS; mathematical model.