

## ІНТЕГРОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ХМАРНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ДАНИХ НА ОСНОВІ ВІРТУАЛЬНИХ МАШИН

\*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

---

**Анотація.** Складність хмарних центрів обробки даних вимагає передових рішень з управління ресурсами для забезпечення безперервного обслуговування і гарантованої продуктивності. Пропонований підхід до інтегрованого управління ресурсами центру обробки даних забезпечує необхідну еластичність на рівні фізичного сервера з урахуванням споживання енергії та з урахуванням порушень угоди про рівень обслуговування (SLA). Підхід до інтегрованого управління ресурсами заснований на динамічній моделі у просторі станів, моделі енергоспоживання, моделі порушень SLA і методі управління ємністю центру обробки даних. Аналіз виконано з використанням журналів статистики використання кластера Google. Результати показують, що підхід до інтегрованого управління ресурсами центру обробки даних дозволяє досягти економії енергії і мінімізувати порушення SLA.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, дата-центр, віртуалізація, енергоефективність.

**Аннотация.** Сложность облачных центров обработки данных требует передовых решений по управлению ресурсами для обеспечения непрерывного обслуживания и гарантированной производительности. Предлагаемый подход к интегрированному управлению ресурсами центра обработки данных обеспечивает необходимую эластичность на уровне физического сервера с учетом потребления энергии и с учетом нарушений соглашения об уровне обслуживания (SLA). Подход к интегрированному управлению ресурсами основан на динамической модели в пространстве состояний, модели энергопотребления, модели нарушений SLA и методе управления емкостью центра обработки данных. Анализ выполнен с использованием журналов статистики использования кластера Google. Результаты показывают, что подход к интегрированному управлению ресурсами центра обработки данных позволяет достичь экономии энергии и минимизировать нарушения SLA.

**Ключевые слова:** облачные вычисления, дата-центр, виртуализация, энергоэффективность.

**Abstract.** The complexity of cloud data centers requires advanced resource management solutions to provide continuous service and to ensure performance guarantees. The proposed Integrated Resource Management approach of cloud data center provides the necessary elasticity on the physical machine level by considering data center power consumption and a service-level agreement violation. The Integrated Resource Management approach is based on the state-space dynamic model, power consumption model, SLA violation model, and capacity control method. The analysis is performed using Google cluster-usage traces. The results show that Integrated Resource Management approach allows achieving energy savings while minimizing SLA violations.

**Keywords:** cloud computing, data center, virtualization, energy efficiency.

### 1. Вступ

Провайдери хмарних послуг пропонують користувачеві широкий спектр сервісів [1], що базуються на використанні трьох основних моделей надання хмарних послуг: Software-as-a-Service (SaaS), Infrastructure-as-a-Service (IaaS) and Platform-as-a-Service (PaaS). Якість і продуктивність роботи сервісів напряму залежать від ІТ-інфраструктури (модель IaaS). Основними високорівневими сервісами є хмарні застосування, застосування електронної комерції, загальні застосування для бізнесу, застосування для автоматизації процесів підприємства, застосування для розробників, пакетні завдання з середовищами виконання та застосування для сфери Інтернету речей. Кожний сервіс має конкретні вимоги до виконання, такі

як висока доступність, висока продуктивність, еластичність зміни необхідної ємності та масштабування, балансування навантаження, розподілене функціонування і взаємодія з мобільними клієнтами. При цьому кожний хмарний сервіс та відповідна ІТ-інфраструктура сприймають різні комбінації робочих навантажень, які є нестаціонарними і які складно прогнозувати. Хмарні сервіси також є масштабованими та стійкими до відмов інфраструктури. Таким чином, дуже важливо забезпечити виконання угоди щодо дотримання рівня сервісу (service-level agreement, SLA), в тому числі, мінімальну затримку при плануванні завдань до виконання, що є основною проблемою в сучасних центрах обробки даних у хмарі.

Завдяки застосуванню віртуалізації [2] виникає можливість консолідувати віртуальні машини (ВМ) на одному фізичному сервері (ФС) з метою покращення ефективності використання ресурсів центру обробки даних (ЦОД). Всі робочі навантаження в сучасних хмарних ЦОД обслуговуються, як правило, за допомогою віртуальних машин. Безперервні зміни робочого навантаження на сервіс користувача, перерозподіл графіків виконання віртуальних машин, а також відмови ФС відбуваються непередбачуваним способом. Таким чином, ресурсною ємністю для обслуговування такого навантаження необхідно управляти динамічно і адаптивно, одночасно забезпечуючи гарантії дотримання рівня сервісу та продуктивності без порушення SLA. Провайдери хмарних сервісів застосовують різні методи для забезпечення достатньої кількості ФС, одночасно забезпечуючи ефективне використання ресурсів, зменшуючи операційні витрати та енергоспоживання.

При управлінні ресурсами хмарного ЦОД виникають проблеми управління ємністю ресурсів: проблема надмірного виділення ресурсів (over-provisioning) і проблема недостатнього виділення ресурсів (under-provisioning). Ці проблеми повинні вирішуватись за допомогою ефективних методів консолідації віртуальних машин. Щоб досягти виділення необхідної ємності ресурсів, необхідної для обслуговування запитів користувачів протягом горизонту керування, провайдери хмарних сервісів повинні застосовувати адаптивні методи та алгоритми керування консолідацією ВМ. Управління консолідацією віртуальних машин являє собою адаптацію до динамічних робочих навантажень шляхом використання технології безперебійної міграції (live migration) віртуальних машин. Ця технологія дозволяє віртуальним машинам переміщатись з недовантажених ФС, щоб мінімізувати кількість активних ФС, необхідних для обслуговування поточного навантаження користувача. Таким чином, вивільнені від навантаження ФС можуть бути переключені в «режим сну» або в режим мінімального споживання енергії з метою зменшення споживання енергії в ЦОД. У разі, коли зростає попит на відповідні ресурси, необхідну кількість фізичних серверів швидко можна повернути в робочий режим. У цьому підході існують два основних критерії: мінімізувати порушення SLA та мінімізувати споживання енергії в центрі обробки даних.

Основною метою статті є розробка підходу до інтегрованого управління ресурсами (ІУР) ЦОД, що полягає в управлінні необхідними ресурсами на базі моделі станів ЦОД, враховуючи споживання електроенергії та порушення SLA. Підхід до вирішення проблеми динамічного управління виділенням ресурсів заснований на моделі станів центру обробки даних з метою мінімізації споживання енергії фізичними серверами ЦОД при допустимій затримці розгортання віртуальної машини. Сформульовано проблему оптимізації, яка розглядає декілька типів ресурсів та гетерогенні ФС. Результати показують, що використання ІУР підходу дозволяє досягти енергозбереження при мінімізації порушень SLA з точки зору затримки розгортання віртуальної машини. У статті запропоновані основна схема підходу ІУР; метод управління ємністю ресурсів ЦОД, вхідні та вихідні сигнали контуру управління, модель споживання електроенергії з урахуванням міграції віртуальних машин та гетерогенності ресурсів ФС, модель порушення SLA з урахуванням штрафів за перевантаження ФС та штрафів за затримку розгортання віртуальної машини. У процесі моделювання використані дані з журналів використання кластера Google [3].

## 2. Аналіз публікацій

В умовах сучасних ЦОД основна увага з боку провайдерів приділяється зменшенню споживання електроенергії з одночасним дотриманням вимог SLA [4–6]. З цією метою запропоновано багато підходів і методів, призначених для використання в різних умовах функціонування ЦОД з різними програмно-апаратними платформами. Важливо зазначити, що при застосуванні методів управління з використанням прогнозу можна досягти високої ефективності при управлінні ресурсами хмарного ЦОД [7–9].

У роботі [7] автори запропонували використовувати керування з прогнозуванням в динамічній схемі резервування ресурсів для віртуалізованих серверних середовищ. Мінімізація споживання електроенергії досягається шляхом коригування кількості фізичних та віртуальних машин з урахуванням частки процесора та навантаження на кожен віртуальну машину. Метою запропонованої схеми є максимізація кількості транзакцій, які повинні виконуватися з дотриманням SLA, з точки зору середнього часу відгуку при врахуванні витрат на включення та виключення фізичних машин. Однак, вони в основному концентруються на продуктивності серверних застосувань, а не на плануванні розміщення ВМ та ресурсної спроможності ФС.

Автори в роботі [8] пропонують підхід динамічного розподілу ресурсів, який базується на моделях інтелектуального аналізу навантаження. Згідно з запропонованим підходом, система керування вмикає або вилучає фізичні сервери для роботи застосування на основі оптимізації завантаженості застосування на обмеженому горизонті прогнозування. Головним чином, запропонований підхід орієнтований на хмарну модель обслуговування SaaS і не враховує мінімізацію енергоспоживання. Крім того, метод авторегресії рухомого середнього, який використовується в роботі для прогнозування навантаження, не враховує сезонних змін.

У роботі [10] автори запропонували алгоритм керування на основі ланцюгової моделі Маркова для вирішення проблеми виявлення перевантаження ФС як частини процесу динамічної консолідації ВМ. Для відомого стаціонарного робочого навантаження та заданої конфігурації стану системи політика управління оптимально вирішує задачу виявлення перевантаження ФС шляхом максимізації середнього часу між міграціями, одночасно дотримуючись QoS вимог. Використовуючи підхід до оцінки навантаження на основі багаторозмірного вікна зі зсувом, автори адаптували модель для обробки невідомих нестаціонарних навантажень. Існує також припущення, що робоче навантаження задовольняє властивості Маркова, що може бути невласивим для всіх типів робочих навантажень. Крім того, вхідні дані для моделювання робочого навантаження, використані в публікації, містять лише навантаження на процесор, якого недостатньо для моделювання гетерогенного середовища.

У роботах [5, 6, 9] наведено дослідження щодо методів та підходів динамічного масштабування ємності ресурсів ЦОД. У роботі [6] автори запропонували систему автоматизованого надання фізичних серверів, яка передбачає компроміс між енергозбереженням, продуктивністю та надійністю, використовуючи прогнозування та оптимізацію для запропонованої моделі, однак гетерогенність ФС і їх ресурсів у цій роботі не враховані. У роботі [9] запропонована модель для вирішення задачі динамічного виділення ресурсів. При цьому мінімізується загальне використання електроенергії при виконанні вимог SLA щодо затримки планування завдання, але запропонована модель розроблена для гомогенного кластера. Крім того, модель прогнозування потребує налагодження до використання у процесі управління, яке не забезпечується запропонованим підходом. У роботі [5] автори запропонували систему управління ресурсами для виконання неоднорідних завдань гетерогенними ФС за критерієм енергозбереження. Запропонована схема враховує гетерогенність і динамічно регулює кількість ФС у відповідності з критеріями енергозбереження та мінімальної затримки планування виконання, а також з урахуванням витрат на реконфігурацію. Але запропонова-

ний підхід використовує ту ж саму модель прогнозування, що і в [9], не розглядає можливість відмов ФС і не враховує штрафних витрат на міграції віртуальних машин.

### 3. Модель ЦОД

ЦОД представлений набором ФС, що характеризуються певною конфігурацією апаратної та програмної підсистем і фіксованою ємністю ресурсів. Модель ЦОД складається з  $M \in \mathbb{N}$  ФС і  $N \in \mathbb{N}$  ВМ. На кожному ФС може бути розміщено декілька ВМ. Фізичні сервери поєднані мережею ЦОД один з одним та централізованою системою зберігання даних (сховищем) [11]. У реальних умовах роботи ЦОД кількість віртуальних машин постійно змінюється шляхом створення та завершення їх роботи (нормального або аварійного).

У гетерогенному середовищі кожен ФС має типову конфігурацію ресурсів, що включає процесор, оперативну пам'ять, сховище та підключення до мережі з метою надання їх визначеній кількості віртуальних машин при розміщенні. На кожному ФС виконуються менеджер віртуальної машини (МВМ) і спеціальна віртуальна машина з менеджером фізичного сервера (МФС) для керування віртуальними машинами засобами МВМ. Використовуючи показники моніторингу, МФС отримує поточне використання ресурсів ФС та використання ресурсів кожною розміщеною на ньому ВМ. Рішення з управління ресурсами приймаються менеджером ЦОД, який виконує консолідацію віртуальних машин, управління станом ФС і ВМ, а також визначає розміщення нової створюваної ВМ. Продуктивність кожної віртуальної машини клієнта обмежена конкретними показниками SLA, наприклад, час на обслуговування запиту, час роботи, кількість запитів у секунду та ін.

### 4. Інтегроване управління ресурсами ЦОД

У статті пропонуються нові стратегії управління ємністю ресурсів ЦОД та розподілом віртуальних машин (включаючи перерозподіл) з урахуванням обмежень на енергоспоживання та порушення умов SLA. Структура об'єкта управління представлена на рис. 1. Для управління кількістю активних ФС, вибору нового місця розташування віртуальної машини та для керування міграцією віртуальної машини слід враховувати такі вимоги:

- мінімізувати кількість порушень SLA, що виникають у зв'язку з перевантаженням як мінімум одного з ресурсів ФС;
- мінімізувати кількість порушень SLA, що виникають у зв'язку з затримкою розгортання нової віртуальної машини;
- мінімізувати споживання енергії в ЦОД з урахуванням гетерогенного та нестаціонарного стохастичного середовища IaaS.

Для досягнення таких цілей запропоновано підхід IUP на основі моделі динаміки ЦОД.

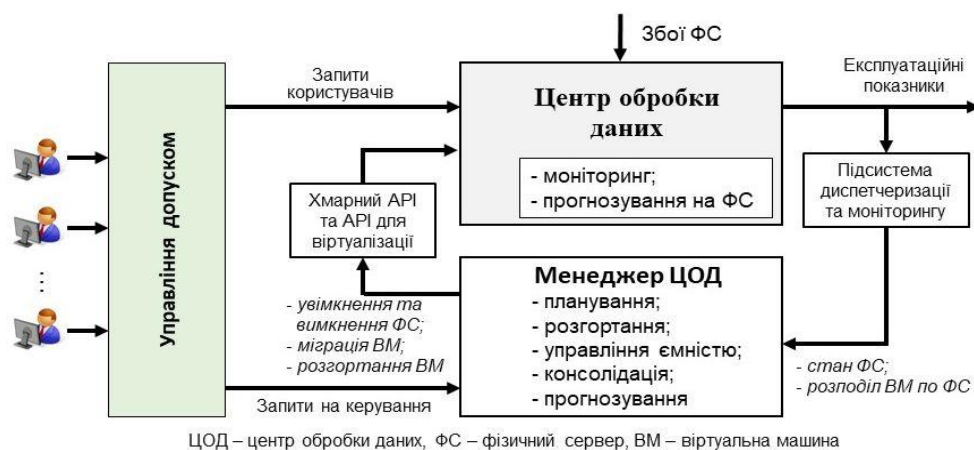


Рис. 1. Структура об'єкта управління для підходу інтегрованого управління ресурсами

У рамках запропонованого підходу ІУР вирішуються такі задачі: консолідація віртуальних машин, розміщення нової ВМ та задача планування ресурсної ємності. Запропонований підхід включає в себе моделі енергоспоживання, порушення умов SLA та управління ємністю ЦОД, що використовують модель динаміки ЦОД.

#### Моделювання споживання електроенергії в ЦОД

В ІТ-індустрії у даний час існує потреба скорочення енергоспоживання центрів обробки даних. Енергоспоживання ЦОД складається із споживання електроенергії для обслуговування навантаження клієнтів та енергоспоживання фізичної інфраструктури. Таким чином, важливо підвищити енергоефективність ЦОД шляхом розробки та впровадження моделей і алгоритмів систем управління та апаратного забезпечення, що безпосередньо обслуговують ІТ-навантаження. У роботі розглядається і вирішується задача моделювання енергоспоживання фізичними серверами у хмарному ЦОД. При цьому задачі управління енергоспоживанням мережевого обладнання та пристроїв зберігання даних у запропонованій моделі не розглядаються і являють собою окремі підзадачі загальної задачі управління енергоспоживанням ЦОД.

Споживання електроенергії фізичного сервера визначається його компонентами, такими як процесор, чіпсет, накопичувач дисків, пам'ять, джерела живлення та системи охолодження [12]. На практиці у гетерогенному середовищі неможливо окремо виміряти і врахувати при управлінні енергоспоживанням кожного компонента. У [13] автори показали, що споживання електроенергії фізичним сервером може бути описане лінійною залежністю між електроспоживанням та використанням процесора. Інша проблема, розглянута в [13], це вузький динамічний діапазон потужності серверів, коли сервер, який працює в режимі очікування, витрачає близько 70% енергії від його максимальної потужності.

Слід також враховувати, що варіація інтенсивності робочого навантаження на кожну ВМ, розміщену на ФС, не впливає на споживання електроенергії центральним процесором ФС [7]. Електроспоживання ФС змінюється тільки при зміні кількості ВМ, що виконуються на ньому. Проте неможливо визначити коефіцієнти, щоб врахувати внесок кожної ВМ в електроспоживання ФС, що їх містить. Таким чином, у статті пропонується враховувати використання ресурсу  $R_i^k(t)$  для кожного ресурсу  $k$   $i$ -го ФС, оскільки  $R_i^k(t)$  також вносить вклад у загальне споживання електроенергії фізичним сервером.

Позначимо змінною  $e_{idle}^g \in \mathbb{R}^+$  споживання електроенергії фізичним сервером типу  $g$ , коли він працює в режимі очікування. Гетерогенність ЦОД пропонується врахувати різними моделями споживання електроенергії, беручи до уваги коефіцієнт енергоефективності ФС типу  $g$ , позначений як  $\rho^{gk}$ , для ресурсу типу  $k$ . Споживання електроенергії  $i$ -го ФС типу  $g$ , позначене змінною  $e_i^g(t) \in \mathbb{R}^+$ , може бути визначене таким чином:

$$e_i^g(t) = e_{idle}^g + \sum_{k \in R} R_i^k \rho^{gk}. \quad (1)$$

Сумарне споживання електроенергії всіх працюючих ФС може бути визначене таким чином:

$$E_{PM}(t) = \sum_{i=1}^M z_i(t) e_i^g(t), \quad (2)$$

де  $z_i(t) \in \{0,1\}$  – стан  $i$ -го ФС.

Інший важливий показник, який слід враховувати при моделюванні електроспоживання в центрах обробки даних, це «жива» (без зупинки сервісу) міграція ВМ. За різними оцінками і в залежності від кількості працюючих ФС, сотні ВМ в ЦОД можуть брати участь у процесі консолідації. Залежно від архітектури зберігання даних (зі спільним сховищем

або без спільного сховища) транспортні витрати на міграцію будуть різними. Якщо ЦОД використовує архітектуру без спільного сховища даних, витрати на передачу жорсткого диска VM додаються до витрат на транспортування пам'яті, що належить VM. У запропонованій моделі використовується архітектура зі спільним сховищем. Слід також зазначити, що режим живої міграції не викликає суттєвого зменшення продуктивності роботи самої VM у порівнянні з продуктивністю роботи VM у звичайному режимі [14], але викликає навантаження на фізичні сервери, що беруть участь у процесі міграції VM.

Крім того, є обмеження гіпервізора щодо кількості одночасних міграцій з/на ФС, на завантаження підсистеми зберігання та мережевих адаптерів. Ці обмеження також повинні бути враховані. Встановлення обмежень кількості одночасних міграцій віртуальних машин у реальному ЦОД виконується окремо для ФС та для його мережевого підключення. Міграція VM є процесом з інтенсивним вводом/виводом, і енергія споживається передавальними та приймальними пристроями на самих ФС, що беруть участь в управлінні процесом міграції та мережевим обладнанням ЦОД [15].

Позначимо змінною  $e_j^h(t)$  споживання електроенергії при міграції VM типу  $h$ . Тоді загальне електроспоживання при міграціях VM у поточний момент  $t$  можна визначити таким чином:

$$E_{mVM}(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N u_{ij}(t) e_j^h(t), \quad (3)$$

де  $u_{ij}(t) \in \{0,1\}$  – цілочисельна змінна, яка вказує на міграцію  $j$ -ї VM з  $i$ -го ФС. Міграція відбувається тоді, коли  $u_{ij}(t) = 1$ .

Споживання електроенергії центром обробки даних у момент  $t$ , позначене змінною  $E(t)$ , може бути визначено таким чином:

$$E(t) = E_{PM}(t) + E_{mVM}(t). \quad (4)$$

### Моделювання порушень умов SLA

Продуктивність ФС знижується, коли один або більше його ресурсів використовуються на 100% [16], тому VM, що працюють на даному ФС, у цьому випадку не забезпечені необхідними ресурсами для досягнення узгодженого рівня продуктивності. В реальних умовах обмеження використання деяких ресурсів може бути жорсткішим, від 85% до 95%, щоб не допускати вузьких місць [17]. Причиною цього є відсутність ресурсного резерву ФС для обслуговування майбутніх потреб у ресурсах, що у решті-решт призводить до порушення SLA. Серед усіх ресурсів, що споживаються VM, є три найбільш важливих, які впливають на продуктивність VM, коли ФС завантажений на 100% деякий час навіть по одному з ресурсів.

По-перше, це використання процесора та довжина черги процесора. Продуктивність, яку надає процесор, знижується, коли використання становить 100%, а довжина черги процесора перевищує мінімально допустимий рівень. Іншими двома ресурсами є введення/вивід на пристрої збереження даних та на мережеві підключення. Ці ресурси можуть бути обмежені для кожної VM за допомогою гіпервізора, щоб уникнути перевантаження ФС. Але через деякий час ці два ресурси також можуть бути вичерпані через зміни кількості вхідних або вихідних запитів до підсистем збереження даних та до мережевих адаптерів з боку віртуальних машин або системного програмного забезпечення ФС.

Пропонується визначити штрафи за порушення SLA,  $P^{SLA}(t)$  у вигляді суми штрафів за перевантаження ФС,  $P^o(t)$  та штрафів за затримки розгортання нової віртуальної машини,  $P^d(t)$  таким чином:

$$P^{SLA}(t) = p_1 P^o(t) + p_2 P^d(t), \quad (5)$$

де  $p_1 > 0$  і  $p_2 > 0$  є ваговими коефіцієнтами.

Розглянемо розрахунок штрафів за перевантаження ФС по одному з ресурсів. Припустимо, що ФС може перебувати в нормальному стані (ресурси використовуються менше, ніж визначено порогом) або в перевантаженому стані. Перевантажений стан ФС настає тоді, коли показник використання одного з ресурсів досягає максимального, заздалегідь визначеного значення (порогу), близького до наявного обсягу цього ресурсу на ФС, протягом деякого періоду часу. Вважатимемо, що  $i$ -й ФС перевантажений, якщо

$$\exists k \in K : \sum_{j=1}^N r_{ij}^k(t) + r_i^k(t) = C_i^k, \text{ де } r_{ij}^k(t) \in [0, 1] \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}, \quad k \in K - \text{використання } k -$$

го ресурсу  $j$ -ю ВМ на  $i$ -му ФС,  $r_i^k(t)$  – це показник використання  $k$ -го ресурсу самим ФС у момент  $t$ ,  $K$  – це набір типів ресурсів, таких як процесорна ємність, об'єм пам'яті, продуктивність вводу/виводу диска тощо. Значення штрафу  $P^o(t)$  за перевантажений стан ФС визначимо для кожного ресурсу  $k \in K$  таким чином:

$$P^o(t) = N_{VM}^v(t)P, \quad (6)$$

де  $N_{VM}^v(t)$  – кількість ВМ, на яких впливає перевантаження відповідного ФС.  $P$  – узгоджена з користувачем вага одиниці штрафу за порушення SLA на одній ВМ.  $N_{VM}^v(t)$  визначається таким чином:

$$N_{VM}^v(t) = \sum_{i=1}^M z_i(t)\psi(i), \quad (7)$$

якщо ресурс  $k \in K$  існує такий, що  $\psi(i)$  визначається як

$$\psi(i) = \begin{cases} 0, & \frac{C_i^k}{\sum_{j=1}^N r_{ij}^k(t) + r_i^k(t)} < 1, \\ \sum_{j=1}^N a_{ij}(t), & \text{інакше} \end{cases} \quad (8)$$

Розглянемо розрахунок штрафів за затримку розгортання нової віртуальної машини  $P^d(t)$ . Припустимо, що всі ВМ повинні бути розгорнуті в інтервалі між моментами  $t$  і  $t+1$  відповідно до SLA. Ця вимога стосується віртуальних машин, які створюються для забезпечення певної продуктивності роботи сервісу або балансування навантаження на сервіс.

Наприклад, якщо SLA визначає, що час розгортання повинен бути не більше, ніж часовий інтервал  $\tau$  між  $t$  і  $t+1$ , це означає, що в середньому час, потрібний для розгортання екземпляра ВМ, складає  $\tau$ . Постачальник хмарних послуг зацікавлений у мінімізації кількості задіяних (працюючих) ФС при достатній наявній кількості ресурсів. Таку ціль можна досягнути за рахунок консолідації ВМ та наявності групи вільних ФС, щоб бути готовим до прийому нових ВМ у міру необхідності. Кількість ФС, готових для прийняття нових ВМ, може бути оцінена за допомогою моделі управління ємністю.

Кількість віртуальних машин на наступному кроці  $t+1$  управління ресурсами ЦОД визначається таким чином:

$$N_{VM}(t+1) = N_{VM}(t) + N_{VM}^{on}(t) - N_{VM}^{off}(t), \quad (9)$$

де  $N_{VM}^{on}(t)$  – кількість VM, визначених на розгортання,  $N_{VM}^{off}(t)$  – кількість VM, визначених на вимикання. Значення  $N_{VM}^{off}(t)$  коректується кожного разу на наступному кроці управління ресурсами ЦОД, щоб врахувати аномальне вимкнення VM.

Кількість VM, запланованих до розгортання, визначається таким чином:

$$N_{VM}^{on}(t) = \sum_{j=1}^N \gamma_1(s) s_{ij}(t), \quad (10)$$

де  $\gamma_1(s)$  – це функція, визначена так, що  $\gamma_1(s) = 1$ , якщо  $s = 1$ , та  $\gamma_1(s) = 0$  в іншому випадку;  $s_{ij}(t) \in \{-1, 0, 1\}$  – цілочисельна змінна, яка вказує на зміну стану  $j$ -ї VM, якщо  $s_{ij}(t) = -1$ , тоді  $j$ -та VM повинна бути вимкнена, якщо  $s_{ij}(t) = 1$ , тоді  $j$ -та VM повинна бути розгорнута на  $i$ -му ФС, якщо  $s_{ij}(t) = 0$ , тоді стан  $j$ -ї VM не змінюється.

Кількість VM, запланованих для завершення роботи, визначається таким чином:

$$N_{VM}^{off}(t) = \sum_{j=1}^N |\gamma_2(s) s_{ij}(t)|, \quad (11)$$

де  $\gamma_2(s)$  – це функція, визначена так, що  $\gamma_2(s) = -1$ , якщо  $s = -1$ , та  $\gamma_2(s) = 0$  в іншому випадку.

За кожний додатковий час  $\tau$ , витрачений на розгортання VM, постачальник хмарних послуг сплачує штраф  $P$ . Позначимо змінною  $w(t)$  число VM, які не були розгорнуті на попередньому кроці від  $t-1$  до  $t$ . Таким чином, штраф  $P^d(t)$  за затримку розгортання VM за визначений часовий період  $\Upsilon = \{1, 2, \dots, T\}$  визначається таким чином:

$$P^d(t) = \sum_{t=1}^T w(t)P. \quad (12)$$

### Метод управління ємністю ЦОД

У статті пропонується метод обчислення кількості ФС для обслуговування прогнозованого навантаження у вигляді VM. Запропонований метод проілюстровано на прикладі застосування тільки до одного ресурсу  $k$ . Позначимо змінною  $D^k$  суму вимог до  $k$ -го ресурсу, що отримана від модуля передбачення потреб у ресурсах. Позначимо вільну ємність  $k$ -го ресурсу в ЦОД як  $F^k$ . Позначимо змінною  $\Delta^k$  дефіцит (нестачу) ресурсу, що обчислюється за формулою  $\Delta^k = D^k - F^k$ .

Якщо задовольняється вимога  $\Delta^k \leq 0$  і є достатньо місця для розміщення максимального запитуваного ресурсу  $c_{\max, d}^k$  на будь-якому працюючому ФС ( $c_{\max, d}^k < C_{\text{free}}^k$ ), то немає необхідності вмикати додатковий ФС. Якщо  $\Delta^k > 0$ , то деяка кількість додаткових ФС повинна бути увімкнена. Щоб врахувати гетерогенність фізичних серверів, пропонується відсортувати їх типи  $g$  у порядку зменшення ємності ресурсу  $k$ . Передбачається, що чим більше ємність ресурсу  $k$  у ФС, тим більше він споживає електроенергії. Позначимо змінною  $C^{g, k}$  ємність ресурсу  $k$  фізичного сервера типу  $g$ . Наприклад,  $C^{1, k} = 1$ , якщо фізичний сервер типу  $g = 1$  має ємність ресурсу  $k$ , що дорівнює 1 ( $k = 1$ ),  $C^{2, k} = 0,75$ , якщо фізичний сервер типу  $g = 2$  має ємність ресурсу  $k$ , що дорівнює 0,75 ( $k = 0,75$ ), і т.д. Позначимо змінною  $M_{PM}^+(t)$  кількість ФС типу  $g$ , які повинні бути увімкнені, щоб обслуговувати наван-



таження з боку нових ВМ без затримки. Позначимо змінною  $M_{PM}^{g,off}(t)$  кількість ФС типу  $g$ , які знаходяться в режимі сну.

Необхідно врахувати два випадки для виконання обрахунків. Перший випадок: якщо  $\Delta^k \leq 1$ , то тільки один ФС з ємністю ресурсу  $k$ , що є найближчою до  $\Delta^k$  (для таких  $g$ , коли  $\frac{C^{g,k}}{\Delta^k} \geq 1$ ), повинен бути увімкнений. Другий випадок: якщо  $\Delta^k > 1$ , то кількість додаткових ФС обраховується таким чином (13):

$$M_{PM}^+(t) = \sum_{i=1}^M \left( \left\lfloor \frac{M_{PM}^{g,off}(t)}{2} \right\rfloor \prod_{j=1}^i f^g(t) \right),$$

$$f^g(t) = \begin{cases} 1, & \left\lfloor \frac{\Delta_j^k}{C^{g,k}} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{M_{PM}^{g,off}(t)}{2} \right\rfloor \geq 0 \\ \left\lfloor \frac{\Delta_j^k}{C^{g,k}} \right\rfloor + 1, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\Delta_{j+1}^k = \Delta_j^k - C^{g,k} M_{PM}^{g,off}(t).$$

Таким чином, отримана кількість фізичних серверів для увімкнення  $M_{PM}^+(t)$  складається з  $\left\lfloor \frac{M_{PM}^{g,off}(t)}{2} \right\rfloor$ ,  $g = \overline{1, G}$ , фізичних серверів кожного типу  $g$ . Запропонований метод пропонується використовувати для оцінки нижньої границі кількості ФС, які повинні знаходитися в робочому режимі для розміщення нових ВМ з урахуванням кожного ресурсу  $k$ , який враховується при розміщенні ВМ і є критичним для її роботи.

## 5. Формулювання і вирішення оптимізаційної задачі

Рішення з управління ресурсами включають в себе рішення щодо консолідації віртуальних машин, рішення про міграцію віртуальних машин, рішення про управління станом ФС, а також рішення про розміщення нової ВМ. Ці рішення можуть прийматися одночасно в гетерогенних середовищах IaaS. Для моделювання динаміки системи час поділено на інтервали рівної тривалості, поточний момент позначений як  $t$ . Рішення з управління відбуваються на початку кожного інтервалу.

На початку кожного інтервалу управління  $t$  кількість ФС, які будуть потрібні на наступний момент  $t+1$ , визначається з використанням моделі динаміки ЦОД та моделі управління ємністю. Мета планування ємності – запланувати своєчасне включення ФС. Інформація про стан ЦОД у момент  $t$  спостерігається за допомогою МФС та МВМ, у тому числі значення  $M_{PM}(t)$ ,  $N_{VM}^{on}(t)$  і  $N_{VM}^{off}(t)$ . Використовуючи методи управління ємністю центрів обробки даних, можна визначити кількість ФС, необхідних на момент  $t+1$ , і визначити відповідні керуючі впливи.

Загальна мета ІУР ЦОД полягає в тому, щоб управляти кількістю ФС з урахуванням обмежень і згідно з критерієм енергозбереження та дотримання SLA. У запропонованій моделі управління кількістю ФС виконується за допомогою контрольної змінної  $S_{ij}(t)$  (змінна вказує на зміну стану  $i$ -го ФС) шляхом визначення змінних розташування віртуальної машини  $x_{ij}(t)$  і  $y_{ij}(t)$  та шляхом визначення змінної міграції  $u_{ij}(t)$  таким чином, щоб мінімізувати загальну суму штрафів з точки зору міграції ВМ та затримки планування виконання ВМ (11) при мінімізації споживання електроенергії (10). Щоб мінімізувати споживання електроенергії та порушення SLA, слід звести до мінімуму таку функцію на кожному кроці  $t$ :

$$J = \alpha |P^{SLA}(t)|^2 + \beta |E(t)|^2, \quad (14)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – це ваги, визначені користувачем, які позначають відносну важливість  $P^{SLA}(t)$  і  $E(t)$  відповідно.

Задача ІУР ЦОД (14) є задачею нелінійного цілочисельного програмування. Її оптимальне рішення можна знайти за допомогою класичних методів оптимізації. Але, якщо взяти до уваги велику кількість змінних та обмежень, класичні методи оптимізації будуть вимагати значної кількості обчислень для оптимізації, що в режимі онлайн складно досягнути.

Для того, щоб застосувати ІУР ЦОД у режимі реального часу для великомасштабних центрів обробки даних, пропонується вирішувати задачу оптимізації (14) приблизно, за рахунок використання оптимізації Монте-Карло [18]. Ідея застосування наближених методів полягає в тому, щоб випадково обирати велику кількість зразків контрольних входів і обчислювати функцію вартості для кожного з них. Отримана функція вартості з найнижчим значенням є субоптимальним керуванням ресурсами ЦОД на момент  $t$ . Необхідно тільки підібрати відповідну кількість зразків для налагодження компромісу між часом розрахунку та точністю наближення.

Для оцінки ефективності підходу ІУР ЦОД та запропонованих евристик розроблена модель динаміки ЦОД. Проведено моделювання різних сценаріїв на вхідних даних з журналів статистики використання кластера Google [3]. Журнали статистики використання кластера Google складаються з декількох наборів даних про завдання, виконані приблизно на 12 000 фізичних серверах. Журнали містять записи про конфігурацію фізичних серверів, події планування завдань, потреби в ресурсах для завдань та записи про використання ресурсів 25,462,157 завданнями протягом 29 днів. Для кожного завдання вказана максимальна потреба в кожному з двох ресурсів (ЦП та ОЗУ). Значення попиту та використання для кожного типу ресурсу нормалізовані від 0 до 1 відносно найбільшої ресурсоемності ФС.

Ефективність використання електроенергії оцінюється шляхом порівняння енергоспоживання активних ФС під час моделювання згідно з запропонованими моделями з результатами, отриманими за допомогою алгоритму Power Aware Best Fit Decrease (PABFD) [19]. У PABFD всі віртуальні машини сортуються в порядку зменшення їх поточної утилізації процесора. Розподіл кожної віртуальної машини на фізичні сервери у PABFD виконується з урахуванням найменшого збільшення споживання електроенергії, викликаного розподілом. Запропонований у статті підхід дозволяє розподіляти ВМ на ФС в середньому на 17% ефективніше, ніж PABFD. Моделювання споживання електроенергії фізичними серверами здійснювалося згідно з (4), параметри моделі для кожного типу фізичного сервера оцінювалися згідно з даними з [20].

У [5] зазначається, що у трейсі Google більше 50% завдань у групі з пріоритетом «продуктив» (production priority) заплановані негайно (за рахунок методів самого Google). Але деякі задачі у пріоритетній групі "продуктив" затримуються протягом декількох годин і навіть днів. У результаті аналізу встановлено, що однією з можливих причин такої ситуації є відсутність належних ресурсів з точки зору відповідної конфігурації ФС. Щоб зменшити до мінімуму таку розбіжність між запитаними та доступними ресурсами, запропоновано використовувати метод управління ємністю. Цей метод дозволяє зарезервувати ФС кожного типу після наступного рішення щодо планування та розгортання нових віртуальних машин. Після застосування запропонованої моделі управління ємністю в сценаріях моделювання затримка планування зменшується до 37% у деяких сценаріях (вибірках з трейсу). Таким чином, цей метод орієнтований на планування виконання неоднорідних завдань у гетерогенних середовищах.

## 6. Висновки

У роботі запропонований підхід інтегрованого управління ресурсами ЦОД, який забезпечує необхідну кількість фізичних серверів для обробки навантаження зі зменшенням електропоживання та зменшенням кількості порушень угоди про рівень обслуговування клієнтів. Підхід IUP ЦОД базується на моделі динаміки хмарного ЦОД, яка враховує гетерогенність ФС та ВМ, зміну їх станів і конфігурацій, можливість управління розміщенням нових ВМ та їх міграцією.

Запропонована модель споживання електроенергії дозволяє мінімізувати споживання енергії фізичними серверами, одночасно підтримуючи прийнятну затримку розгортання нової ВМ. Модель обліку порушень SLA враховує штрафи за перевантаження ФС і штрафи за затримку розгортання нової ВМ. Запропонований метод планування ємності ЦОД дозволяє визначити кількість ФС, необхідних для забезпечення обслуговування прогнозованого навантаження у вигляді віртуальних машин з певними вимогами до ресурсів.

Аналіз та моделювання, які використовують трейси роботи кластера Google [3], показують, що за допомогою підходу IUP ЦОД постачальники хмарних сервісів можуть зменшити споживання електроенергії при мінімізації порушень SLA з точки зору кількості перевантажених ФС та затримки розгортання нової ВМ.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. RightScale 2018 State of the Cloud Report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rightscale.com/lp/state-of-the-cloud>.
2. Xen and the art of virtualization / P. Barham, B. Dragovic, K. Fraser [et al.] // Proc. of the 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles, SOSP2003. – Bolton Landing, NY, 2003. – P. 164 – 177.
3. Reiss C. Google cluster-usage traces: format+schema / C. Reiss, J. Wilkes, J.L. Hellerstein // Google Inc., Mountain View, CA, USA, Technical Report, 2011. – P. 1 – 14.
4. Energy-Aware Server Provisioning and Load Dispatching for Connection-Intensive Internet Services / G. Chen, W. He, J. Liu [et al.] // NSDI. – 2008. – Vol. 8. – P. 337 – 350.
5. Dynamic heterogeneity-aware resource provisioning in the cloud / Q. Zhang, M. F. Zhani, R. Boutaba [et al.] // IEEE transactions on cloud computing. – 2014. – Vol. 2, N 1. – P. 14 – 28.
6. Guenter B. Managing cost, performance, and reliability tradeoffs for energy-aware server provisioning / B. Guenter, N. Jain, C. Williams // Proc. of IEEE INFOCOM. – Shanghai, China, 2011. – P. 1332 – 1340.
7. Power and performance management of virtualized computing environments via lookahead control / D. Kusic, J.O. Kephart, J.E. Hanson [et al.] // Proc. of the International Conference on Autonomic Computing (ICAC). – Chicago, 2008. – P. 3 – 12.
8. Roy N. Efficient autoscaling in the cloud using predictive models for workload forecasting / N. Roy, A. Dubey, A. Gokhale // Proc. of IEEE International Conference on Cloud Computing (CLOUD) – Washington, 2011. – P. 500 – 507.
9. Dynamic energy-aware capacity provisioning for cloud computing environments / Q. Zhang, M.F. Zhani, S. Zhang [et al.] // Proc. of the 9th IEEE/ACM International Conference on Autonomic Computing. – New York, 2012. – P. 145 – 154.
10. Beloglazov A. Managing overloaded hosts for dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers under quality of service constraints / A. Beloglazov, R. Buyya // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2013. – Vol. 24, N 7. – P. 1366 – 1379.
11. Telenyk S. Architecture and Conceptual Bases of Cloud IT Infrastructure Management / S. Telenyk, E. Zharikov, O. Rolik // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. – 2017. – Vol. 512. – P. 41 – 62.
12. Minas L. Energy Efficiency for Information Technology: How to Reduce Power Consumption in Servers and Data Centers / L. Minas, B. Ellison // Intel Press. – Santa Clara, 2009. – 330 p.
13. Fan X. Power provisioning for a warehouse-sized computer / X. Fan, W.D. Weber, L.A. Barroso // Proc. of the 34th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA 2007), ACM. – New York, NY, USA, 2007. – P. 13 – 23.

14. Xiao Z. Dynamic resource allocation using virtual machines for cloud computing environment / Z. Xiao, W. Song, Q. Chen // IEEE Transactions on parallel and distributed systems. – 2013. – Vol. 24, N 6. – P. 1107 – 1117.
15. Performance and energy modeling for live migration of virtual machines / H. Liu, H. Jin, C.-Z. Xu // Cluster computing. – 2013. – Vol. 16, N 2. – P. 249 – 264.
16. Zheng Q. Utilization-Based Pricing for Power Management and Profit Optimization in Data Centers / Q. Zheng, B. Veeravalli // J. Parallel and Distributed Computing. – 2011. – Vol. 72, N 1. – P. 27 – 34.
17. Detecting bottlenecks in a virtualized environment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/performance-tuning/role/hyper-v-server/detecting-virtualized-environment-bottlenecks>.
18. Hammersley J. Monte Carlo methods / Hammersley J. – Springer Science & Business Media, 2013. – 178 p.
19. Beloglazov A. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing / A. Beloglazov, J. Abawajy, R. Buyya // Future Generation Computer Systems. – 2012. – Vol. 28, N 5. – P. 755 – 768.
20. ENERGY STAR Certified Enterprise Servers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.energystar.gov/Active-Specifications/ENERGY-STAR-Certified-Enterprise-Servers/46gm-kmbv/data>.

*Стаття надійшла до редакції 28.03.2018*