

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР. ІІ - 91.00.00.000 ІЗ

Група ІІ-22-4

Бойчук Арсен

2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Бойчук Арсен Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Техніки оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в

дата-центрах

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня Бойчук А.І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Царева Олександра Степанівна, асистент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц. Бандура В.В.

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прі-

звище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут, факультет інформаційних технологій
Кафедра інженерії програмного забезпечення
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ІІЗ
доцент. В.В. Бандура
“ ____ ” _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Бойчук Арсен Іванович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту (роботи) "Техніки оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах"

керівник проекту (роботи) Царева Олександра Степанівна, асистент

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 21 ” квітня 2026 р. № 179/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Результати і матеріали отримані під час проходження переди-дипломної практики

4. Зміст розрахунково - пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз вимог до програмного забезпечення

2. Аналіз вимог і постановка задачі

3. Проектування системи

4. Реалізація проекту

5. Тестування та впровадження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Вуглецевий цикл (рис. 1.1, ст. 14)

2 Візуальне зображення архітектури моделі (рис. 2.2, ст. 39)

3. Графік порівняння споживання енергії (рис. 3.5, ст. 62)

4 Графік порівняння витрат (рис. 3.6, ст. 63)

5 Графік порівняння викидів вуглецю (рис. 3.8, ст. 65)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

2. Дата видачі завдання 2026 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Визначення та обґрунтування теми роботи	17.01.2026	виконано
2	Огляд існуючих концепцій, рішень та сервісів в даній області	21.02.2026	виконано
3	Побудова моделі або алгоритму власного рішення	01.03.2026	виконано
4	Документування реалізації власного оригінального рішення вибраними засобами	21.04.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи	02.05.2026	виконано

Студент

_____ Бойчук А.І.
(підпис)

Керівник роботи

_____ Царева О.С
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить 74 сторінок, 11 рисунків, 4 таблиці, список використаних джерел із 40 найменувань.

Метою роботи є дослідження технік оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах та аналіз підходів до підвищення енергоефективності програмних систем у хмарних і розподілених середовищах.

Об'єкт дослідження: процеси функціонування програмного забезпечення у дата-центрах та хмарних обчислювальних середовищах.

Предмет дослідження: методи, алгоритми та інструменти спрямовані на зменшення енергоспоживання та вуглецевого сліду дата-центрів.

Результати дослідження: досліджено методи управління енергоспоживанням у хмарних дата-центрах, розглянуто підходи до оцінювання ефективності оптимізації програмного забезпечення.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи енергоефективного програмування, принципи зелених обчислень та сучасні підходи до оптимізації програмного коду в дата-центрах.

У другому розділі досліджено методи та інструменти зниження енергоспоживання у хмарних центрах обробки даних.

У третьому розділі розглянуто архітектуру моделі оптимізації програмного коду, методологію реалізації алгоритмів зниження енергоспоживання та оцінювання ефективності запропонованих рішень.

Висновок: застосування технік оптимізації програмного коду дозволяє зменшити енергоспоживання дата-центрів, скоротити вуглецевий слід обчислювальних систем та забезпечити екологічно орієнтований підхід до розробки програмного забезпечення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ПРОГРАМУВАННЯ, ЗЕЛЕНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ДАТА-ЦЕНТРИ, ВУГЛЕЦЕВИЙ СЛІД, ОПТИМІЗАЦІЯ КОДУ, ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, GREEN IT, ХМАРНІ СЕРЕДОВИЩА, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕСУРСІВ.

ANNOTATION

Bachelor's thesis of 74 pages, 11 figures, 4 tables, and a reference list containing 40 sources.

The aim of the work is to study code optimization techniques for reducing the carbon footprint in data centers and to analyze approaches for improving the energy efficiency of software systems in cloud and distributed environments.

Research object: processes of software operation in data centers and cloud computing environments.

Research subject: algorithms, and tools for software code optimization aimed at reducing energy consumption and the carbon footprint of data centers.

Research results: methods of energy management in cloud data centers were studied and approaches to evaluating the effectiveness of software optimization were identified.

The first section describes the theoretical foundations of energy-efficient programming, principles of green computing, and modern approaches to software optimization in data centers.

The second section analyzes methods and tools for reducing energy consumption in cloud data centers.

The third section covers the architecture of the software optimization model, methodologies for implementing energy-saving algorithms, and evaluation of the effectiveness of the proposed solutions.

Conclusion: the application of software code optimization techniques reduces energy consumption in data centers, decreases the carbon footprint of computing systems, improves the efficiency of hardware resource utilization, and supports an environmentally oriented approach to software development.

KEY WORDS: ENERGY-EFFICIENT PROGRAMMING, GREEN COMPUTING, DATA CENTERS, CARBON FOOTPRINT, CODE OPTIMIZATION, CLOUD COMPUTING, ENERGY CONSUMPTION, GREEN IT, CLOUD ENVIRONMENTS, RESOURCE OPTIMIZATION.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ В ДАТА-ЦЕНТРАХ ..	11
1.1 Основи енергоефективного програмування та зелених обчислень	11
1.2 Аналіз сучасних досліджень і підходів до оптимізації програмного коду ..	16
1.3 Особливості оптимізації програмного забезпечення в дата-центрах: складність та перспективи	21
1.4 Висновки по розділу	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В ДАТА-ЦЕНТРАХ	25
2.1 Проблеми енергоспоживання та вуглецевого сліду у сучасних дата-центрах	25
2.2 Методи управління енергоспоживанням у хмарних центрах обробки даних	28
2.3 Зелені інформаційно-комунікаційні технології та програмні підходи до підвищення енергоефективності	31
2.4 Висновки по розділу	36
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ, РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ	37
3.1 Архітектура та структура моделі оптимізації програмного коду	37
3.2 Методологія реалізації та алгоритми оптимізації енергоспоживання	55
3.3 Оцінювання ефективності оптимізації та аналіз результатів	60
3.4 Висновки по розділу	72
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	75

					БР.ІІ –91.00.00.000 ІІЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бойчук А.І.			Техніки оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Царева О.С.					7	
Реценз.		Лютак І.З.				ІФНТУНГ ІІ-22-4		
Н. Контр.		Піх М.М.						
Затверд.		Бандура В. В.						

ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток цифрових технологій, хмарних сервісів та систем обробки великих обсягів даних призводить до постійного зростання навантаження на дата-центри. Сучасні центри обробки даних забезпечують функціонування веб-сервісів, хмарних платформ, систем штучного інтелекту, потокових сервісів і корпоративних інформаційних систем, що супроводжується значним споживанням електроенергії та збільшенням вуглецевого сліду. У зв'язку з глобальними екологічними викликами, змінами клімату та необхідністю раціонального використання енергетичних ресурсів особливої актуальності набуває проблема підвищення енергоефективності програмного забезпечення та оптимізації програмного коду для зменшення навантаження на обчислювальну інфраструктуру.

Одним із ключових напрямів розвитку сучасних інформаційних технологій є концепція зелених обчислень (Green Computing). Значна частина енергоспоживання дата-центрів залежить не лише від апаратного забезпечення, а й від якості програмного коду, ефективності алгоритмів, оптимізації використання пам'яті та процесорних ресурсів. У зв'язку з цим оптимізація програмного коду стає важливим інструментом зниження енергоспоживання та вуглецевого сліду сучасних обчислювальних систем.

Актуальність теми зумовлена необхідністю розробки та застосування ефективних технік оптимізації програмного коду, які дозволяють зменшити використання апаратних ресурсів, підвищити продуктивність програмного забезпечення та скоротити негативний вплив дата-центрів на навколишнє середовище. Існуючі програмні рішення часто орієнтовані переважно на функціональність і масштабованість, тоді як питання енергоефективності залишаються недостатньо дослідженими.

Метою роботи є дослідження технік оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах, аналіз сучасних методів енергоефективного програмування та визначення підходів до підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів у хмарних середовищах.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завданнями дослідження є аналіз предметної області та сучасних підходів до енергоефективного програмування, дослідження методів оптимізації програмного коду та управління енергоспоживанням у дата-центрах, визначення архітектурних підходів до побудови енергоефективних програмних систем, дослідження методів оцінювання ефективності оптимізації програмного забезпечення.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування програмного забезпечення у дата-центрах та хмарних обчислювальних системах, що включають обробку даних, використання обчислювальних ресурсів та управління енергоспоживанням.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмні засоби оптимізації коду, спрямовані на підвищення енергоефективності програмного забезпечення, зменшення навантаження на серверні ресурси та скорочення вуглецевого сліду дата-центрів.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел для вивчення сучасних підходів до енергоефективного програмування, порівняльний аналіз технологій оптимізації програмного забезпечення, моделювання архітектури програмних систем, експериментальні методи оцінювання продуктивності та енергоспоживання, а також статистичний аналіз отриманих результатів.

У роботі розглядатимуться техніки оптимізації програмного коду, методи управління енергоспоживанням у хмарних дата-центрах. Особлива увага приділятиметься оптимізації алгоритмів, управлінню ресурсами, зменшенню обсягів обчислень і використанню сучасних підходів до зниження енергоспоживання серверної інфраструктури. Очікується, що результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання дата-центрів, зменшенню витрат на енергоспоживання та підтримці екологічно орієнтованого підходу до розробки програмного забезпечення.

Бакалаврська робота містить 74 сторінок, 11 рисунків, 4 таблиці, 3 розділи, список використаних джерел із 40 найменувань.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ В ДАТА-ЦЕНТРАХ

1.1 Основи енергоефективного програмування та зелених обчислень

У сучасному технологічно розвиненому світі центри обробки даних є вирішальними як основа сучасного бізнесу, організацій та установ. Центри обробки даних стають необхідною частиною інфраструктури для зберігання, обробки та управління величезними обсягами даних через експоненціальне зростання цифрових даних та зростаючу залежність від інформаційних технологій. Щоб проілюструвати вирішальну роль, яку центри обробки даних відіграють у сприянні цифровій трансформації багатьох компаній та суспільства в цілому, у цій роботі розглядається суттєва важливість центрів обробки даних у різних секторах, таких як інформаційні технології (ІТ), охорона здоров'я, телекомунікації, енергетика, освіта тощо. Організації зберігають та керують своїми важливими даними та програмами в центрах обробки даних, які служать централізованими вузлами. Вони пропонують надійне та безпечне середовище для розміщення серверів, мережевого обладнання та пристроїв зберігання даних.

Нещодавні дослідження показали, що споживання енергії центрами обробки даних зростає, а попит на неї стрімко зростає через зростання популярності інтернет-сервісів та платформ розподілених обчислень, таких як кластери, мережі та хмари. За оцінками, хмарні центри обробки даних споживають понад 2,4% електроенергії у світі, що має глобальний економічний вплив на 30 мільярдів доларів США [1]. Незважаючи на підвищення ефективності ІТ-обладнання, очікується, що споживання електроенергії центрами обробки даних зростатиме на 1,5-20 % щороку [2]. Крім того, хмарні центри обробки даних (ХЦОД) відповідають за викиди парникових газів, що утворюються під час виробництва електроенергії та виробництва та утилізації інформаційно-технологічного (ІТ) обладнання [3, 4]. Також за оцінками, у 2011 році центри обробки даних були

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідальні за викиди 78,7 мільйона метричних тонн вуглекислого газу (CO₂) , що дорівнює 2 % світових викидів [5, 6] . Зокрема, центри обробки даних мають велику потужність, включаючи десятки тисяч обчислювальних серверів, сховищ даних, різноманітне обладнання для охолодження та силові трансформатори [7, 8]. З 2005 по 2010 рік у всьому світі спостерігалось 56% зростання споживання електроенергії центрами обробки даних [9]. Щодо ефективності центрів обробки даних, дослідження показали, що в середньому майже 55% енергії споживається обчислювальною системою, а решта споживається допоміжною системою, такою як охолодження, безперебійне живлення тощо в центрі обробки даних [10, 11]. Як наслідок, споживання енергії стало серйозною проблемою, і значні дослідження були присвячені зниженню споживання енергії центрами обробки даних шляхом інтеграції зелених центрів обробки даних. Тому для центрів обробки даних важливо бути енергоефективними. Зелений центр обробки даних (GDC) функціонує як будь-який інший центр обробки даних, слугуючи центром зберігання, управління та розподілу даних.

Центри обробки даних та високопродуктивні обчислювальні установки значною мірою сприяють зміні клімату, викидаючи 100 мегатонн CO₂ щорічно, що можна порівняти з американськими комерційними літаками [12]. За даними, створення та вдосконалення двигунів трансляції може виробляти від 0,6 до 280 тонн CO₂ . Наприклад, було підраховано, що австралійські астрономи, які використовують суперкомп'ютери , виробляють 15 кілотонн CO₂ щороку , або 22 тонни на кожного дослідника [13]. Очікується, що споживання енергії гіпермасштабними центрами обробки даних майже подвоїться між 2015 і 2023 роками, що зробить їх найбільшим у світі відсотком споживання енергії центрами обробки даних [14]. Прогнозується, що споживання енергії центрами обробки даних зросте з 200 ТВт·год у 2016 році до 2967 ТВт·год у 2030 році [15]. Незважаючи на проблему COVID-19, очікується, що світовий ринок інтернет-центрів обробки даних зростатиме зі середньорічним темпом зростання на рівні 13,4% у період з 2020 по 2027 рік, з оціночних 59,3 млрд доларів США у 2020 році до 143,4 млрд доларів США до 2027 року [16]. Прогнозується, що до 2020 року ринок інтернет-

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центрів обробки даних у США становитиме 16 млрд доларів США. Очікується, що Китай, друга за величиною економіка у світі, матиме ринок центрів обробки даних у розмірі 32 млрд доларів США до 2027 року, зростаючи на 17,5% у період з 2020 по 2027 рік [17]. Крім того, розглянули парадигму віртуалізації вводу/виводу (I/O) та підхід до планування віртуальних машин з точки зору оптимізації енергоефективності. Вони запропонували унікальний механізм компенсації вводу/виводу та методологію послідовного розподілу кредитів за справедливим розподілом потужності, щоб забезпечити швидке підвищення продуктивності вводу/виводу для сприяння енергозбереженню. У найновішому звіті [18] зазначено, що вуглецевий слід Google за 2015 рік становив 2,99 мільйона метричних тонн, що на 79,04% більше, ніж у 2011 році. Тому нагальним питанням, з яким стикаються центри сталого розвитку, є зменшення викидів вуглецю. Оскільки традиційні електричні мережі (часто звані «коричневою енергією») є основним джерелом енергії для більшості центрів обробки даних, викиди вуглецю-10 все ще залишаються на досить високому рівні [19]. Останнім часом деякі з найбільших постачальників хмарних послуг (CSP), такі як Google, Microsoft та Facebook, обрали зелені хмарні центри, що працюють на відновлюваній енергії.

Зменшення вуглецевого сліду комп'ютерних технологій є головною метою зелених технологій. Як згадувалося раніше, електростанції роблять значний внесок у викиди парникових газів. Тому важливо зменшити кількість електроенергії, необхідної в усьому світі, особливо в центрах обробки даних для обчислювальних цілей. «Зелений» центр обробки даних – це центр, розроблений для досягнення максимальної енергоефективності та мінімального впливу на навколишнє середовище завдяки одночасному проектуванню його механічних, електричних та комп'ютерних систем. Зелений центр обробки даних відрізняється від звичайного центру обробки даних.

З точки зору різних аспектів, таких як енергоефективність, системи охолодження, відновлювані джерела енергії, ефективність обладнання, оптимізація моніторингу, вплив на навколишнє середовище, економічна ефективність тощо.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Вуглецевий цикл

Центри обробки даних відіграють вирішальну роль у нашому цифровому світі, слугуючи основою сучасних технологій та сприяючи розвитку різних он-лайн-сервісів і програм. Однак вони не позбавлені проблем. Однією з основних проблем є їхнє високе енергоспоживання, оскільки центри обробки даних потребують значної потужності для роботи та охолодження серверів, що призводить до значних експлуатаційних витрат та екологічних наслідків через збільшення викидів вуглецю [20]. Крім того, традиційні центри обробки даних часто стикаються з обмеженим простором, що може перешкоджати можливості розміщення зростаючої кількості серверів та обладнання, що призводить до потенційних обмежень потужності та труднощів у масштабуванні операцій. Тепло, яке генерується серверами, створює ще одну проблему, вимагаючи використання передових систем охолодження для підтримки оптимальної температури та запобігання збоям обладнання. Крім того, масштабованість та гнучкість є важливими для ефективного задоволення коливань потреб. Однак традиційні центри обробки даних можуть мати труднощі зі швидким розширенням інфраструктури, що призводить до потенційних вузьких місць та перебоїв у обслуговуванні в періоди пікового навантаження. Регулярне технічне обслуговування та оновлення обладнання також ускладнюють управління центрами обробки даних. Вони вимагають ретельного планування та виконання для забезпечення безперебійної роботи. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для використання повного потенціалу центрів обробки даних та забезпечення їхньої стійкості та ефективності в цифрову епоху.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пропонується модель під назвою «Зелена енергоефективність та оптимізація викидів вуглецю» (GEECO). Запропоноване рішення включає серію модулів, які працюють злагоджено для оптимізації споживання енергії в центрах обробки даних, зберігаючи при цьому високий рівень продуктивності. Робочий процес починається з модуля інтерфейсу користувача (UI), де завдання отримуються з хмарних серверів та пересилаються на рівень центру обробки даних для обробки. У стані перевірки залежностей завдання перевіряються на наявність залежностей, і якщо їх немає, вони переходять до модуля планування завдань. Тут завдання класифікуються за допомогою алгоритмів найкоротшого часу обробки (SPT), найдовшого часу обробки (LPT) та найдовшого часу налаштування (LSTF) для ефективного визначення пріоритетів та планування.

Далі модуль оцінки ресурсів використовує історичні, статистичні алгоритми та алгоритми машинного навчання для точної оцінки потреб у ресурсах. Найкращий варіант потім вибирається на основі цих оцінок. Постачальник інформації про дані відіграє вирішальну роль у моніторингу та наданні даних у режимі реального часу для прийняття рішень.

Щоб забезпечити доступність ресурсів, перевірка доступності ресурсів постійно контролює їх рівні. Якщо ресурсів недостатньо, використовуються стратегії балансування навантаження та динамічного масштабування для розподілу завдань між кількома центрами обробки даних та оптимізації використання ресурсів [21].

Модуль виконання контролює виконання завдань, а завершальний етап включає виконання розрахунків для оцінки споживання енергії, вартості, рівня викидів вуглецю та загальної продуктивності. Завдяки інтеграції цих модулів, наше запропоноване рішення досягає енергоефективності, економічної ефективності та сталого розвитку в роботі центрів обробки даних.

Основний внесок цієї роботи коротко викладено нижче:

1. Запропоновано інноваційну модель для підвищення енергоефективності. Цей алгоритм динамічно регулює розподіл робочого навантаження та ресурсів у центрі обробки даних, щоб зменшити споживання енергії та керувати

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

узгодженням рівня обслуговування.

2. Проаналізовано продуктивність та оцінили ефективність запропонованої нами моделі. Результати показали значне підвищення енергоефективності та значне зниження споживання енергії та пов'язаних з цим витрат.

3. Дослідження підкреслює важливість зелених обчислень та зелених ІТ-практик, включаючи використання збалансованого підходу до оцінки продуктивності та стратегічно розміщених центрів обробки даних для підвищення енергоефективності та зменшення впливу на навколишнє середовище.

4. Розглянуто дослідження, які пропонують показники енергоефективності для центрів обробки даних, оцінюючи такі фактори, як споживання енергії, коефіцієнт викидів вуглецю, продуктивність та вимірювання, пов'язані з вартістю.

Ці ключові моменти разом демонструють внесок наших досліджень у - просування практик сталих хмарних обчислень шляхом впровадження екологічно чистих даних .

центри обробки даних та методи оптимізації енергоспоживання. Це дослідження підкреслює важливість зниження споживання енергії та викидів вуглецю в центрах обробки даних, забезпечення ефективної роботи та економічної ефективності [22].

1.2 Аналіз сучасних досліджень і підходів до оптимізації програмного коду

Було проведено широке дослідження щодо енергоефективності в центрах обробки даних. Їхня увага зосереджена на оптимальній якості обслуговування (QoS), ефективному використанні ресурсів та зниженні експлуатаційних витрат. Однак, все ще залишається складним завданням задовольнити потреби користувачів та постачальників послуг за допомогою ефективного управління енергією. З точки зору енергоефективності, увага може бути зосереджена на програмному рівні, апаратному рівні або проміжному рівні [23].

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

DVFS та енергозалежне планування віртуальних машин

Зростання розмірів та кількості центрів обробки даних призводить до значного збільшення споживання енергії, що створює додаткові труднощі в їх управлінні. У підході до енергоефективного управління живленням на основі DVFS робоча частота та напруга процесора динамічно регулюються для зміни споживання енергії серверами. Для ефективної економії енергії в центрах обробки даних планування завдань здійснюється на основі DVFS. Запропоновано енергозалежний алгоритм розподілу віртуальних машин, який має на меті вирішити багаточільову задачу, враховуючи оптимізацію споживання завдань та енергії разом з пов'язаними з цим обмеженнями. Управління енергією та планування на основі DVFS у гетерогенних системах. Проблеми контролю продуктивності веб-сервера були вирішені за допомогою DVFS як керуючої змінної для зменшення споживання енергії сервером [24].

Підхід на основі DVFS був запропонований з метою покращення використання ресурсів та мінімізації споживання енергії без шкоди для продуктивності системи. Робочі навантаження пріоритетизовані на основі попиту на доступні ресурси та вимог щодо чіткої угоди про рівень обслуговування [25]. Метод на основі DVFS був використаний для обмежених паралельних завдань. Стверджується, що запропонований метод може мінімізувати споживання енергії з мінімальним часом виконання завдань. Підхід на основі DVFS був застосований для оптимізації енергоефективності центрів обробки даних. Для покращення компромісів між продуктивністю застосунків та економією енергії було розглянуто інтегрований підхід до консолідації DVFS та віртуальних машин, який був автентифікований за допомогою реального тестового стенду [26]. Результати свідчать про те, що існує компроміс між енергоспоживанням та часом міграції під час виконання енергоефективної консолідації віртуальних машин між географічно розподіленими центрами обробки даних.

Запропоновано модель завдання, яка відображає якість обслуговування (QoS) завдань з найнижчою частотою. Для оцінки ефективності виконання завдань на різних частотах було використано коефіцієнт споживання енергії (ECR).

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щоб зменшити споживання енергії серверами, вхідні завдання надсилаються на активні сервери, а потім коригуються частоти виконання. На окремих серверах було використано алгоритм міграції для динамічного балансування робочого навантаження з метою мінімізації ECR сервера. Було використано розширення WorkflowSim з урахуванням енергоспоживання для інтеграції моделі енергоспоживання для оптимізації управління першочерговим енергозбереженням з урахуванням обчислень, реконфігурації, витрат на мережу та енергозбереження хоста за допомогою DVFS [27]. Вищезгадані підходи спрямовані на максимальну мінімізацію споживання енергії центрами обробки даних з урахуванням продуктивності.

Для порівняння, у нашому підході ми розглядаємо відновлювані джерела енергії разом із коричневою енергією для розподілу споживання енергії, формулюючи задачу оптимізації, яка призведе до різних сценаріїв для підтримки покращення продуктивності центрів обробки даних.

Регіональна різноманітність цін на електроенергію та планування віртуальних машин з урахуванням вуглецевого сліду в багатохмарних зелених центрах обробки даних

Кілька авторів сформулювали проблему розподілу віртуальних машин (ВМ), об'єднавши споживання енергії центрами обробки даних з їх вуглецевим слідом. Розподіл ресурсів з урахуванням вуглецю для одного центру обробки даних був запропонований для забезпечення ресурсами на вимогу на серверах, що працюють на відновлюваних джерелах енергії. Розподіл навантаження між різними центрами обробки даних був запропонований з урахуванням вартості споживання коричневої енергії. Алгоритм розміщення ВМ Min Brown був представлений для мінімізації споживання коричневої енергії враховуючи термін виконання завдання, міграція ВМ між об'єднаними центрами обробки даних була виконана для мінімізації вартості коричневої енергії з урахуванням динамічного ціноутворення на електроенергію [34]. Міграція ВМ розглядалася з метою мінімізації вуглецевого сліду у об'єднаній хмарі [35]. Розглядалася комбінація джерел вітрової та сонячної енергії з метою розподілу навантаження з нульовою

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вартістю коричневої енергії [36]. Застосування обмежень затримки розглядалися з метою зниження цін на електроенергію [37].

Розглянуто проблему розміщення віртуальних машин з метою мінімізації енергії та витрат, пов'язаних з вуглецевим слідом у геологічно розподілених центрах обробки даних, розташованих в одній країні. Було запропоновано метод динамічного планування робочого навантаження для серверів, що працюють на відновлюваних джерелах енергії. Для ефективного використання відновлюваної енергії міграція робочого навантаження [28]. Запропоновано систему проміжного програмного забезпечення під назвою GreenWare з метою збільшення використання відновлюваної енергії георозподіленими центрами обробки даних, що працюють на вітровій та сонячній енергії. Основна увага в дослідженні була спрямована на мінімізацію вуглецевого сліду певних запитів у межах заздалегідь визначених бюджетних витрат постачальником послуг. Було запропоновано регульований підхід до розподілу робочого навантаження в географічно розподілених центрах обробки даних на основі доступності відновлюваної енергії. Небагато дослідників зосередили свої дослідження на стратегіях управління ресурсами в багатомарних середовищах [29]. Щоб оптимально збалансувати робоче навантаження між географічно розподіленими центрами обробки даних було запропоновано алгоритм для збільшення використання зеленої енергії та мінімізації коричневої енергії.

З метою мінімізації використання коричневої енергії було запропоновано підхід до балансування навантаження, що використовує доступну зелену енергію. Було представлено структуру з метою мінімізації загальної вартості електроенергії для центрів обробки даних. На основі доступності відновлюваної енергії було здійснено балансування навантаження між кількома центрами обробки даних. Було запроваджено схему управління робочим навантаженням та енергією для зниження експлуатаційних витрат мережі та витрат на енергію. Було запроваджено алгоритм динамічного відкладення робочих навантажень для багатомарного середовища. Виходячи з розгалуженого розташування центрів обробки даних, враховуються динамічні ціни на електроенергію, забезпечуючи при

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цьому терміни виконання робочих навантажень. Для розподілу робочих навантажень у стійких центрах обробки даних, розташованих у різних місцях було запропоновано алгоритм планування робочих навантажень на основі ланцюгів Маркова .

У вищезгаданих підходах автори зосередилися на постановці проблеми мінімізації загальних витрат на електроенергію центрів обробки даних без урахування викидів вуглецю. Центр обробки даних, що частково живиться зеленою енергією, допомагає постачальнику хмарних послуг мінімізувати залежність від джерел енергії на основі вугілля [30]. Для порівняння, у нашому підході ми розглядаємо відновлювані джерела енергії разом із коричневою енергією для розподілу споживання енергії центрами обробки даних з метою зменшення загальних витрат на електроенергію та викидів вуглецю в георозподілених центрах обробки даних.

Обсяг доступної відновлюваної енергії та вуглецева інтенсивність залежать від розташування центрів обробки даних. Порівняно з існуючими підходами. Для покращення використання відновлюваної енергії ми розглядаємо підхід до перерозподілу робочого навантаження в межах географічно розподілених центрів обробки даних з різною вуглецевою інтенсивністю та доступністю зеленої енергії. Виходячи з доступності зеленої енергії, викидів вуглецю в тоннах/МВт·год, ціни на електроенергію та вартості вуглецю, перевага була надана вибору центру обробки даних для перерозподілу робочого навантаження. Однак, через переривчастий характер виробництва зеленої енергії, все ще важливо використовувати вищезгадані параметри для експлуатаційних витрат, понесених через підтримку коричневої енергії.

Контейнери

Контейнери є легкими, з меншим часом запуску та накладними витратами на зв'язок, альтернативою віртуальним машинам рисунок 1.2. Вони забезпечують віртуальну платформу та ізоляцію завдань на рівні операційної системи. Контейнери більш поширені в наданні платформи як послуги в хмарному середовищі. Контейнерні технології, а саме Docker, порівнювали з машиною віртуалізації на

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі ядра (KVM) з точки зору обробки, пам'яті та сховища, а продуктивність контейнерів була такою ж, як і у голого металу з накладними витратами на віртуалізацію, як у віртуальних машинах.

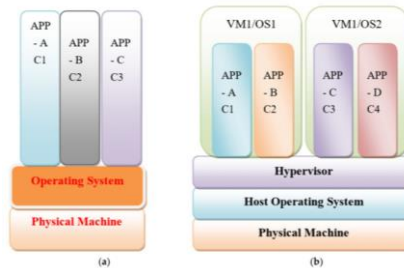


Рисунок 1.2 - Контейнери: (а) Розміщення в операційній системі-господарі; (б) Розміщення у віртуальній машині

Контейнери дозволяють горизонтально масштабовані системи для розміщення мікросервісів. Існує обмеження щодо використання ресурсів у групах процесів у методах віртуалізації на основі контейнерів. Контейнер як послуга прокладає місток між інфраструктурою як послугою (IaaS) та платформою як послугою (PaaS). Контейнери пропонують портативне середовище додатків, надаючи службам додатків безкоштовне середовище платформи як послуги. Docker - це відкрита платформа для запуску контейнерів додатків. Планувальник Docker Swarm розміщує контейнери на доступних віртуальних машинах за циклічним принципом, не враховуючи використання ресурсів віртуальними машинами. Запропоновано алгоритм чергового розміщення контейнерів на віртуальних машинах.

1.3 Особливості оптимізації програмного забезпечення в дата-центрах: складність та перспективи

Оскільки попит на енергоефективні обчислення продовжує зростати, розробники мікросхем все частіше звертаються до спеціалізованих архітектур та конструкцій SoC, де поряд із універсальними процесорами на одному кристалі

					БР.ІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впроваджується кілька прискорювачів. Це необхідний крок для підвищення операційної ефективності різноманітного набору високоінтенсивних робочих навантажень, які демонструють особливі характеристики, такі як обробка сигналів і потоків, штучний інтелект і криптографія [31]. Хоча спеціалізація необхідна для сталого підвищення енергоефективності, слід зрозуміти та вирішити наступні проблеми, щоб повною мірою використати її можливості.

Завдання 1: Компроміси протягом життєвого циклу. Адаптуючи апаратне забезпечення до потреб програмного забезпечення, гетерогенні конструкції можуть досягти значного покращення енергоефективності протягом операційної стадії обчислювального життєвого циклу. Однак, зі зростанням складності однокристальних систем на кристалі зростає і кількість вуглецю, пов'язаного з їх проектуванням та виробництвом. Існує кілька факторів, які сприяють збільшенню витрат на вуглець, включаючи зниження продуктивності, збільшення кількості необхідних етапів виробничого процесу та збільшення кількості необхідних газів, що використовуються для травлення, фотолітографії та осадження. Хоча обговорення сталого виробництва виходить за рамки цієї роботи, ми стверджуємо, що компроміси протягом життєвого циклу між витратами на виробництво вуглецю (що сприяють утворенню викидів) та підвищенням експлуатаційної енергоефективності необхідно проаналізувати та зрозуміти, щоб визначити оптимальні варіанти проектування для підвищення вуглецевої ефективності протягом життєвого циклу.

Проблема 2: Сталий дизайн. Гетерогенність збільшує складність процесу проектування з точки зору взаємодії апаратного та програмного забезпечення, доступу до спільних ресурсів та зниження регулярності дизайну [15]. Ця складність сприяє збільшенню витрат енергії на проектування нових спеціалізованих мікросхем. Проблема посилюється нерегулярністю дизайну та відсутністю засобів для ефективного повторного використання існуючих блоків інтелектуальної власності (ІВ) при проектуванні нових мікросхем шляхом композиції, а не повторного винаходу. У розділі IV ми обговорюємо підхід до вирішення цих проблем, використовуючи платформу з відкритим кодом, яка заохочує та сприяє

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модульності та повторному використанню в проектуванні SoC [32]. Проаналізовано переваги цього підходу на прикладі реального використання.

Проблема 3: Сталий розвиток операційних систем. Існуюче програмне забезпечення центрів обробки даних, і зокрема широко використовувані операційні системи (ОС) та гіпервізори, не враховують принципи сталого розвитку під час розподілу ресурсів та планування програм. Фактично, існуючі політики розподілу ресурсів ОС, які зазвичай спрямовані на повне використання обчислювальних ресурсів, можуть призвести до збільшення викидів вуглецю під час роботи, наприклад, через непотрібне зберігання «холодних» сторінок у пам'яті для максимізації її використання. Крім того, через свою універсальність та необхідність підтримки застарілих програм та інтерфейсів, ОС *роздуті*, витрачаючи багато циклів на синхронізацію та проходження програмних рівнів, що робить їх погано оснащеними для використання переваг спеціалізованого обладнання [33]. Дійсно, за оцінками, близько 20% циклів центрів обробки даних витрачаються даремно лише на різних програмних рівнях Linux [16]. Досліджено перспективний підхід до врахування принципів сталого розвитку системного програмного забезпечення, використовуючи фреймворки *розишрюваності* (eBPF), що підтримуються Linux та Windows. Ці фреймворки можна використовувати для надання метрик, пов'язаних зі стійкістю, застосункам, обходу дорогих програмних рівнів ОС, а також для налаштування поведінки ОС для зменшення операційних викидів та повного використання переваг гетерогенних ресурсів центру обробки даних для оптимального виконання різноманітних робочих навантажень.

Завдання 4: Сталі центри обробки даних. Гетерогенний центр обробки даних включає кілька різних типів мікросхем, пам'яті, сховищ даних та мережі, організованих за рівнями, що охоплюють джерела живлення, апаратні системи, операційні системи, програмне забезпечення для керування та прикладні фреймворки. Такий центр обробки даних використовується для виконання динамічного та різноманітного набору робочих навантажень, де кожне робоче навантаження пов'язане з ціллю рівня обслуговування (SLO), що визначає затримку, пропускну здатність, енергоспоживання та цілі щодо вартості. Недбалий розподіл ресурсів

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між робочими навантаженнями може призвести до неефективності через недовикористані або заблоковані ресурси. Оскільки апаратні компоненти мають різні порядки продуктивності та ефективності, алгоритми оптимізації та їх реалізація є важливими на кількох рівнях: на нижньому рівні, для контролю обмежень потужності та розділів пристроїв для дотримання бюджетів енергоспоживання, на вищих рівнях, для відображення робочих навантажень всередині та між стійками для ефективного охолодження та виконання завдань [34]. Оптимальне використання ресурсів центру обробки даних повинно враховувати такі аспекти, як специфічні характеристики обчислювальних систем та робочих навантажень, а також інші фактори, такі як охолодження, яке є основним джерелом витрат на енергію. Детальніше розглядається вплив гетерогенності на оптимізацію середовища виконання в центрах обробки даних, приділяючи особливу увагу унікальним викликам і можливостям, що виникають через робочі навантаження штучного інтелекту.

1.4 Висновки по розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах. Проаналізовано принципи енергоефективного програмування та концепції зелених обчислень, спрямовані на зменшення споживання ресурсів обчислювальними системами. Досліджено сучасні підходи до оптимізації програмного коду та визначено їх вплив на енергоспоживання серверної інфраструктури. Також розглянуто особливості оптимізації програмного забезпечення в дата-центрах, зокрема проблеми масштабованості, навантаження та ефективного використання ресурсів. Отримані результати формують теоретичну основу для подальшого дослідження методів зниження енергоспоживання та вуглецевого сліду.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГО-СПОЖИВАННЯ В ДАТА-ЦЕНТРАХ

2.1 Проблеми енергоспоживання та вуглецевого сліду у сучасних дата-центрах

За даними ЕРА, протягом останніх п'яти років величезні втрати енергії були спричинені зростанням попиту на комп'ютерні ресурси та подвоєнням споживання енергії серверами та інфраструктурою охолодження. Збільшення викидів CO₂, попиту на електроенергію та вартості енергії є наслідками розширення потужностей центрів обробки даних або будівництва нових центрів обробки даних. Споживання електроенергії центрами обробки даних у світі зросло приблизно на 56% протягом 2005–2010 років. Загальне споживання електроенергії в США становило близько 2% від загального споживання електроенергії у світі у 2010 році; тоді як загальне споживання електроенергії центрами обробки даних становило 1,3% від загального споживання електроенергії [6].

Компанії платять близько мільйонів доларів за хмарні технології. Більше запусканих фізичних машин (ФМ) означає більше споживання енергії, тому контроль таких ресурсів, як процесор і оперативна пам'ять, за допомогою методів енергоспоживання можна розглядати як комплексне рішення для мінімізації споживання енергії для виконання корисних завдань у хмарних центрах обробки даних. На відміну від традиційної обчислювальної моделі, де зосереджена увага на максимальній продуктивності, в енергоефективних системах зосереджена як мінімізація загальної кількості енергії, споживаної системою, так і підвищення рівня продуктивності. Відсоток витрат, понесених кожним хмарним компонентом і підкомпонентами, наведено в таблиці 2.1 [11].

У таблиці 2.1 показано, що на процесор, пам'ять та сховище даних припадає 45% витрат. Тому пошук найбільш енергоефективного та економічно вигідного алгоритму допоміг би мінімізувати споживання енергії цими трьома підкомпонентами, що значно опосередковано зменшить викиди CO₂. [12] Зростання

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання хмарних обчислень і, як наслідок, зростання споживання енергії, витрат і необхідності скорочення викидів CO₂ призвели до пропозиції енергоефективних методів та алгоритмів для досягнення сталого розвитку центрів обробки даних.

Метою цієї роботи є пошук найбільш енергоефективних алгоритмів, які також можуть задовольняти деякі інші критерії, такі як використання ресурсів, споживання енергії, економічна ефективність та викиди CO₂ [35]. Ефективне вимкнення або відключення компонентів у цілих системах, коли вони не використовуються, можна вважати ключовими напрямками енергосвідомості. Іншими словами, мінімізація кількості РМ шляхом використання VM є основою вибраних алгоритмів.

Таблиця 2.1

Витрати на центр обробки даних, компоненти та підкомпоненти.

Вартість (Cost)	Компонент (Component)	Субкомпоненти (Sub-components)
~45%	Сервери	Процесор (CPU), пам'ять, система зберігання даних
~25%	Інфраструктура	Розподіл живлення та охолодження
~15%	Енергоспоживання	Витрати на електроенергію
~15%	Мережа	Канали зв'язку, транзит, обладнання

Недоліки високого енергоспоживання

Як висока потужність, так і споживання енергії взаємопов'язані, але вони мають різні характеристики та повинні бути розглядаються окремо. Споживання енергії визначатиметься вартістю інфраструктури, необхідної для підтримки роботи системи, тоді як споживання енергії буде пов'язане з рахунком за електроенергію. Найважливішими факторами, що сприяють недолікам високого споживання енергії, є:

Проблеми навколишнього середовища та продуктивності системи

Збільшення споживання енергії обчислювальними засобами в хмарні центри обробки даних викликають численні занепокоєння щодо екологічної та системної продуктивності [36]. Більше того, висока щільність у сучасних процесо-

рах генерує більше тепла. Наприклад, майже 1 мільярд транзисторів, інтегрованих у процесор Intel Itanium 2, спричиняє більше тепловиділення. Збільшення щільності в майбутніх процесорах призведе до вироблення тепла, яке може перевищити тепло поверхні Сонця [13]. Енергоефективна конструкція не повинна обмежуватися основними обчислювальними пристроями, такими як процесори, сховища або засоби віртуалізації, вона повинна бути розширена на допоміжне обладнання, таке як системи охолодження, та зайнята ресурсами. [14] .

Розсіювання тепла

Розсіювання тепла – ще одна проблема, спричинена збільшенням щільності обчислювальних компонентів. Значна частина енергії, споживаної обчислювальними ресурсами, перетворюється на тепло, що вимагає підвищених вимог до системи охолодження. Ефективність обчислювальної конструкції зменшить кількість тепла, що виробляється інтегральною схемою. Крім того, регулювання робочої частоти та напруги компонентів позитивно впливає на зменшення розсіювання тепла. Щоб підтримувати безпечний тепловий стан обчислювальних пристроїв, необхідно зменшити тепло, що генерується обчислювальними пристроями. Однак перегрів компонентів може призвести до скорочення терміну служби та збільшення похибки в продуктивності систем. Як наслідок, вимоги до системи охолодження зростають, тому для роботи систем охолодження потрібно більше потужності. Раніше для системи охолодження потрібно було додатково від 0,5 до 1 Вт на кожен ват потужності, що використовується обчислювальними ресурсами, але сучасні системи охолодження розроблені більш ефективно. Наприклад, у 2004 році, щоб розсіювати 1 Вт потужності, споживаної системою високопродуктивних обчислень (HPC), потрібно було додатково 0,7 Вт потужності для живлення систем охолодження. У реальних системах 50% генерованої енергії споживається охолоджувальними установками або розсіюється під час перетворення між системами безперебійного живлення (ДБЖ) та розподільчими блоками живлення (PDU) [15] .

Високі викиди CO₂

Високе споживання енергії також призводить до великої кількості

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

викидів CO₂ у навколишнє середовище, що сприяє глобальному потеплінню. За даними Агентства з охорони навколишнього середовища (EPA), кожні 1000 кВт·год споживання енергії викидають 0,72 тонни CO₂. Річні викиди CO₂ зросли з 42,8 мільйона метричних тонн (ММТ CO₂) у 2007 році до 67,9 ММТ CO₂ у 2011 році. Загалом, галузь ІКТ викидає близько 2% світових викидів CO₂, що еквівалентно авіаційній промисловості [16]. Всі зазначені проблеми та труднощі можна було б пом'якшити за допомогою деяких методів управління енергоспоживанням. Очевидно, що зниження споживання енергії призведе до зниження тепловиділення та, як наслідок, до зниження викидів CO₂.

2.2 Методи управління енергоспоживанням у хмарних центрах обробки даних

Методи управління живленням високого рівня можна розділити на дві основні категорії: динамічні та статичні. Методи статичного управління живленням (SPM) включають усі методи оптимізації, що застосовуються в апаратній частині обчислювальних ресурсів [37]. Окрім апаратного рівня, оптимізації також потребує програмний рівень; таким чином, Реалізація програм у системі повинна виконуватися ретельно та бездоганно. Без урахування як апаратного, так і програмного рівнів, погане проектування системи може призвести до різкого зниження продуктивності та марнування енергії. У той же час, аналіз споживання енергії великими програмами неможливий на операційному рівні, оскільки, окрім процесу генерації коду та компіляції, порядок виконання інструкцій є ще одним фактором, що впливає на споживання енергії. Тому застосування деяких методів для непрямої оцінки споживання енергії видається необхідним. Алгоритмічний аналіз був би гарним способом аналізу там, де оптимальний алгоритм недоступний [24,25].

Методи управління живленням

Для динамічного керування споживанням енергії наразі існує багато методів керування живленням, таких як динамічне масштабування напруги та

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частоти, яке зменшує споживання енергії за рахунок продуктивності, та метод з використанням станів низького енергоспоживання, який зменшує споживання енергії за рахунок функціональності. Кожен вузол має три різні стани живлення: повна напруга та частота, низька напруга та частота, а також стан сну з низьким енергоспоживанням. Продуктивність та споживання енергії кожного з вузлів визначаються його станом живлення протягом робочого періоду [38]. При повній напрузі та частоті продуктивність найкраща, але споживання енергії високе, а в режимі сну з низьким енергоспоживанням як рівень продуктивності, так і споживання енергії знижуються [26]. У методах DPM існують два припущення; по-перше, стан живлення системи буде регулюватися відповідно до її поточних вимог до продуктивності. По-друге, робоче навантаження системи може бути передбачене для вжиття відповідних заходів.

Динамічна консолідація віртуальних машин

Динамічна консолідація віртуальних машин, консолідація завдань та м'яке масштабування ресурсів – це методи динамічного управління живленням, що використовуються для зменшення споживання енергії шляхом ефективного використання ресурсів. Запропоновано систему, зосереджену на зниженні продуктивності як одній з проблем консолідації віртуальних машин. Результат залежить від кількості консолідованих віртуальних машин та вибору відповідних віртуальних машин, які слід консолідувати разом. Тому важливим є вибір найкращої комбінації цих двох факторів. Експериментальна оцінка показала, що запропонована система дозволяє заощадити енергію понад 30% та мінімізувати деградацію до 52% [27]. Запропоновано схему під назвою алгоритм на основі АСО, в якій використовуються три відомі алгоритми консолідації віртуальних машин: First-Fit, Decreasing (FED) та V-Man. Результати показали, що запропонована повністю децентралізована схема консолідації віртуальних машин дуже близька до централізованої топології щодо глобальної ефективності упаковки. Незважаючи на збільшення кількості РМ та VMS, система залишається масштабованою, і, на решті, алгоритм на основі АСО вимагає меншої міграції, ніж FED та V-MAN [28].

Консолідація завдань

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей метод має багато переваг, включаючи краще використання ресурсів, зручність обслуговування, налаштування ІТ-послуг, якість обслуговування (QoS) та надійність. Тим не менш, максимізація використання ресурсів не означає енергоефективність. Запропоновано метод під назвою «Енергоефективна консолідація завдань» (ЕТС) для оптимізації енергоспоживання віртуальних кластерів у хмарних центрах обробки даних. Експериментальний результат показав, що ЕТС може зменшити енергоспоживання процесора для управління консолідацією завдань між віртуальними кластерами. Більше того, ЕТС досягнуло покращення до 17% порівняно з іншими дослідженнями [29]. Зосереджено на максимізації використання ресурсів [30]. PSciMapper - це ще один алгоритм консолідації з урахуванням енергоспоживання, який базується на ієрархічній кластеризації. Експериментальний результат показав, що загальне енергоспоживання зменшилося до 56% за рахунок уповільнення робочих процесів приблизно на 15%. Цей метод використовує невеликі накладні витрати на міграцію завдань у багатоядерних процесорах, вимкнення невикористаного ядра процесора та спільний кеш L2 для підвищення енергозбереження. Фактично, алгоритми планування завдань розроблені для мінімізації споживання енергії в багатоядерних процесорах [31]. Крім того, такі алгоритми допомагають усунути обмеження для подальшої високопродуктивної вбудованої системи реального часу шляхом вирішення проблеми споживання енергії в цих багатоядерних системах [32].

М'яке масштабування ресурсів

М'яке масштабування можна використовувати, коли апаратне масштабування (наприклад, DVFS) не підтримується або є неефективним з точки зору енергоспоживання. Дослідження показало, що гібридні методи, тобто поєднання жорсткого та м'якого масштабування, можуть забезпечити більшу економію енергії. Мета цих методів полягає в забезпеченні окремої та незалежної роботи віртуальної машини, а також у контролі та координації різних політик управління живленням. Експеримент показав, що гібридний підхід буде корисним для ефективною координації та зниження споживання енергії до 34% без будь-яких помилок у продуктивності [33,34].

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Статичне керування живленням

Методи статичного керування живленням (SPM) або статичного керування витоками (SLA) утримують систему в режимі очікування в ефективному стані, доки не знадобиться наступний процес. Фактично, статичною потужністю можна повністю керувати під час простою, перевівши РМ у режим сну. Проблема полягає в тому, що для повторної активації або пробудження РМ потрібен тривалий час. Однак, щоб скоротити час пробудження, хорошим рішенням буде проміжний стан вимкнення живлення; це призведе до невеликого збільшення розсіювання потужності витоку. Через тривалість періоду бездіяльності можна застосовувати різні режими вимкнення живлення, і таким чином максимізувати кількість зекономленої статичної потужності [35,36] .

2.3 Зелені інформаційно-комунікаційні технології та програмні підходи до підвищення енергоефективності

Зелені інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) набувають дедалі більшої популярності в останні роки через глобальне потепління та зміну клімату, які є серйозними викликами для екологічної стійкості. Загальний обсяг викидів, що генеруються електроенергією, зріс з 58,2 мільйона тонн (мт) у 1971 році до 588,8 мт у 2020 році, що становить 1,45% від світових викидів вуглецю. Крім того, загальний обсяг викидів, що генеруються електроенергією зростає із середньорічним темпом понад 5% [1]. З такими темпами зростання очікується, що загальний обсяг викидів перевищить 1 мільярд тонн до 2030 року.

Щоб уповільнити зростання глобальних викидів вуглецю, планується збільшити свої потужності з виробництва відновлюваної енергії з 58 гігават (ГВт) до 120 ГВт у 2030 році, розвиваючи сонячну та водневу енергетику, яка буде базуватися переважно в місті NEOM [2]. Також є план скоротити викиди вуглецю на 278 млн тонн у 2030 році та прагне досягти нульового рівня викидів вуглецю до 2060 року [1]. Крім того, скорочення споживання енергії центрами обробки даних є серйозною проблемою як для науковців, так і для промисловості [3].

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сектор ІКТ вважається ключовим фактором, що сприяє глобальному споживанню енергії та викидам вуглецю. Наприклад, центри обробки даних становлять близько 13% від загального світового попиту на електроенергію до 2030 року [4]. Таким чином, скорочення загального споживання енергії центрами обробки даних відіграє життєво важливу роль у досягненні плану щодо мінімізації глобальних викидів вуглецю.

Наразі великомасштабні локальні центри обробки даних, створені Oracle [5], Saudi Telecom Company [6] та Mobily [7] і ці центри обробки даних працюють на сирій нафті та іншому викопному паливі [8]. Тому використання відновлюваної енергії має інші витрати порівняно з нафтою та викопним паливом. Наприклад, вартість електроенергії з сонячної відновлюваної енергії досягла 0,068 долара США за кіловат-годину (кВт-год) у 2019 році [9], тоді як вартість викопного палива досягла 0,18 долара США/кВт-год [10]. Крім того, вуглецевий склад варіюється залежно від того, які джерела енергії використовуються (наприклад, викопне паливо, сира нафта або сонячна енергія). Таким чином, очевидно, що існує потреба у зменшенні викидів вуглецю та витрат на енергію центрами обробки даних за допомогою ефективної системи [11].

У зв'язку з цим, широкий спектр робіт зосереджений на оптимізації центрів обробки даних з точки зору зниження споживання енергії, витрат на енергію, а також їхнього впливу на навколишнє середовище [12-15]. Наприклад, зв'язок балансування енергії для уникнення викидів вуглецю в центрах обробки даних обговорювався в [15]. Крім того, в [12, 16] досліджується вуглецево-усвідомлений підхід для управління споживанням енергії центрами обробки даних економічно ефективним способом, використовуючи відновлювану енергію. Аналогічно, представили вуглецево-усвідомлену систему, яка має на меті зменшення викидів вуглецю в електроенергію та витрат на енергію в розподілених центрах обробки даних. Однак ці дослідження здебільшого є теоретичними, використовують невеликі прототипи з певними застосуваннями та робочими навантаженнями.

Щодо економічного та екологічного впливу, представили оптимальну гіб

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ридну модель мікромережі, використовуючи традиційні та відновлювані джерела енергії. На основі результатів моделювання вони досягли значного зниження витрат на енергію та впливу на навколишнє середовище. Крім того, досліджували, як досягти сталого розвитку, вивчаючи вплив виробництва відновлюваної енергії на економіку та навколишнє середовище. Аналогічно, вивчали використання відновлюваної енергії океану для виробництва електроенергії та аналізували економічні та екологічні наслідки застосування свого підходу [20]. Результати показали, що запропонований підхід здатний генерувати необхідну енергію для задоволення потреб в енергії. Крім того, їхній підхід може значно заощадити кошти в довгостроковій перспективі порівняно з традиційними підходами.

Пропонується екологічний підхід до контролю викидів вуглецю, пов'язаних з центрами обробки даних, враховуючи реальну інфраструктуру разом з різними застосуваннями. Крім того, ми оптимізуємо енергоефективність розташування різних хмарних центрів обробки даних (у SNFN) з метою зменшення викидів вуглецю та витрат на енергію. Крім того, порівнюється NEOM (як потенційний варіант перенесення всіх локальних центрів обробки даних) з поточними місцями розташування центрів обробки даних. Основні висновки цієї роботи підсумовані наступним чином:

- Представлено екологічний підхід, який розглядає наскрізну архітектуру SNFN, що включає центральну хмару на одному кінці, а потім основну мережу, мережу метро та мережу доступу, розташовані в різних містах. Також порівняно два різні сценарії розташування центрів обробки даних. По-перше, ми аналізуємо традиційні розташування з точки зору енергоефективності, викидів вуглецю та витрат на енергію. По-друге, розглянуто NEOM як потенційне нове місце розташування хмарного центру обробки даних, щоб скористатися його інфраструктурою зеленої енергії.
- Розроблено оптимізаційну модель, яка використовує змішано-цілочислове лінійне програмування (MILP) для математичної оптимізації представленого підходу з метою вивчення енергоефективності та викидів вуглецю в

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

новому запропонованому місці (NEO M). Також сформульовано загальне споживання енергії з урахуванням коефіцієнта розподілу завдань (тобто обчислювальних та комунікаційних ресурсів). Крім того, ми оцінюємо функцію витрат на енергію та досліджуємо, як оптимально розмістити широкий спектр ІКТ-додатків у вуглецево-ефективному місці, яке використовує відновлювані джерела енергії. Як наслідок, це призведе до зниження витрат на електроенергію порівняно з місцями, які працюють лише на сирій нафті та інших джерелах викопного палива.

- Розроблено евристичний підхід, який може імітувати поведінку оптимізації MILP. Зокрема, ми отримуємо висновки з оптимізації MILP та пропонуємо правила проектування, яким повинні дотримуватися евристики, щоб мінімізувати викиди вуглецю та витрати енергії в хмарних центрах обробки даних, дотримуючись при цьому обмежень та вимог.

- Оцінено можливості та ефективність запропонованого підходу разом з його моделями, використовуючи середовище моделювання, та порівнюємо результати з поточною фізичною топологією хмари.

Решта цієї роботи структурована наступним чином [21]: представлено екологічно чистий підхід для центрів обробки даних. Представлено модель змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) для оптимізації споживання енергії, викидів вуглецю та витрат на енергію. Представлено проект моделі MILP разом з її параметрами та змінними. Обговорення результатів. Пропонується евристичне усвідомлення споживання енергії, викидів вуглецю та пов'язаних з ними витрат у центрах обробки даних.

Хмарні обчислення та їхні користувачі

Хмарні обчислення надають ресурси на вимогу (наприклад, процесори, сховища, мережі, сервіси та програми) кільком географічно розподіленим користувачам. Через масштабовану природу хмарних обчислень кількість ресурсів може збільшуватися або зменшуватися відповідно до попиту та запитів від користувачів [22]. Зазвичай хмарні користувачі запитують завдання/програми, які розміщуються в георозподілених хмарах [23], і ці хмари мають різне енергоспоживання та вартість мережі залежно від місцезнаходження користувачів. Однак

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

широкомасштабне впровадження хмарних сервісів головним чином залежить від мінімізації споживання енергії та викидів вуглецю в їхніх центрах обробки даних [24]. Таким чином, оптимізація розміщення Використання хмарних додатків може допомогти мінімізувати споживання енергії, викиди вуглецю та витрати на енергію центрів обробки даних.

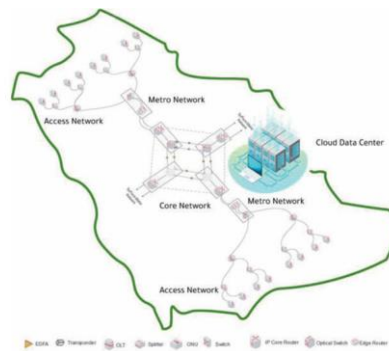


Рисунок 2.1 - Архітектура телекомунікаційної мережі з центром обробки даних

У цій роботі розміщення застосунків оптимізовано шляхом оркестрації хмарних центрів обробки даних, де враховуються конкретні обмеження (наприклад, споживання енергії, викиди вуглецю та витрати на енергію). Крім того, рішення щодо розміщення застосунків приймаються в режимі реального часу для ефективного розміщення застосунків у хмарних центрах обробки даних, розташованих у різних містах з різними викидами вуглецю та витратами на енергію.

Інфраструктура комунікаційних мереж

Інтернет-протокол (IP) з поділом по довжині хвилі (WDM) широко впроваджується в інфраструктурі базової мережі, яка складається з двох основних рівнів: IP-рівня та оптичного рівня. На IP-рівні IP-маршрутизатор підключений до оптичного комутатора та агрегує трафік даних з мережі доступу. Оптичний рівень забезпечує широку пропускну здатність для передачі даних між IP-маршрутизаторами, розташованими в мережі Metro.

Крім того, оптичні комутатори підключені до фізичних волоконно-оптичних каналів. На кожному волоконно-оптичному каналі транспондери забезпечують оптико-електронно-оптичну (ОЕО) обробку на кожному вузлі комутатора,

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

використовуючи пару WDM. Також для передачі на великі відстані використовуються волоконно-підсилювачі з ербієвим легуванням (EDFA) [25]. Багатопротокольна лямбда-комутація (MPLS) – це протокол маршрутизації в IP поверх оптичних основних мереж WDM, який маршрутизує пакети даних від вузла джерела до вузла призначення через сервіс, орієнтований на з'єднання, використовуючи найкоротший шлях [26]. Традиційний хмарний центр обробки даних складається з кількох серверів, які надають різні послуги кінцевим користувачам (наприклад, обчислювальну та сховищну потужність) [27]. Зазвичай хмарні центри обробки даних встановлюються поблизу вузла основної мережі, щоб скористатися перевагами великої пропускної здатності. Фундаментальна архітектура телекомунікаційної мережі, що підключається до центру обробки даних, проілюстрована на рис. 2.1.

2.4 Висновки по розділу

У другому розділі було досліджено методи та інструменти зниження енергоспоживання в дата-центрах. Розглянуто основні проблеми енергоспоживання та формування вуглецевого сліду у сучасних центрах обробки даних. Проаналізовано методи управління енергоспоживанням у хмарних середовищах, що дозволяють оптимізувати використання серверних ресурсів та зменшити витрати електроенергії. Також досліджено зелені інформаційно-комунікаційні технології та програмні підходи до підвищення енергоефективності інфраструктури. У результаті визначено ефективні технологічні рішення для мінімізації негативного впливу дата-центрів на навколишнє середовище.

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ, РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ

3.1 Архітектура та структура моделі оптимізації програмного коду

Дослідження пропонує архітектуру для зелених обчислень, в якій ми прагнемо досягти ефективного використання енергії за рахунок використання зелених центрів обробки даних. Як показано на рисунку 3.1, наша архітектура представляє кілька кінцевих пристроїв, які надсилають запити до центрів обробки даних на дані та інформацію. Між рівнями кінцевих пристроїв та зеленими центрами обробки даних ми використовуємо рівні хмарних даних, де буде кілька хмарних даних. Хмарні дані допоможуть швидше збирати інформацію з центрів обробки даних. Рівень хмарних даних містить систему кеш-сховища для частих та поширених запитів від кінцевих пристроїв. У рівні хмарних даних є система вимірювання робочого навантаження для рівномірного розподілу робочого навантаження. Рівень хмарних даних містить рівень шифрування та дешифрування для безпеки даних. Запит шифрується та надсилається до центрів обробки даних через рівень хмарних даних. рисунок 3.2 надає графічне відображення всієї запропонованої архітектури.

Коли кінцевий користувач робить запит до нашої архітектури, він проходить через різні рівні. На рисунку 3.1 зображено взаємодію між усіма рівнями хмарних технологій, включаючи шифрування та дешифрування, сховище кешу та вимірювання робочого навантаження. З міркувань безпеки, рівень шифрування та дешифрування є першим рівнем, через який проходить запит. Потім процес переходить до сховища кешу, звідки витягуються часто використовувані дані для пришвидшення їх отримання. Якщо даних немає в кеші, вони потрапляють до компонента управління робочим навантаженням рівня хмарних технологій, який контролює потужність та розподіл завдань хмарних технологій. Хмарні технології вибирають, який центр обробки даних оброблятиме запит, зменшуючи навантаження на рівень центру обробки даних. Відповідь таким самим

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чином повертається кінцевому користувачеві після того, як центр обробки даних завершить необхідну обробку. Механізм кешування зберігає відповіді для швидшої обробки в майбутніх операціях.

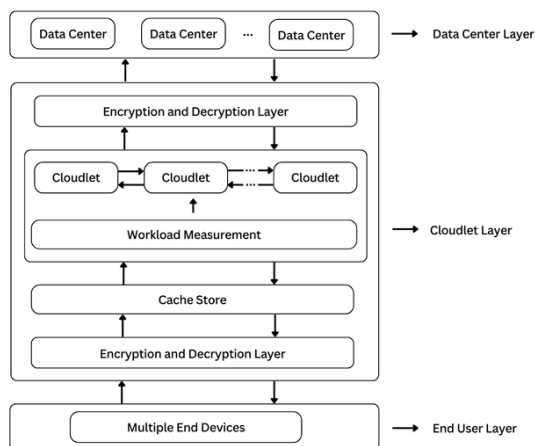


Рисунок 3.1 - Запропонована архітектура моделі.

Рівень кінцевого користувача

Рівень кінцевого пристрою складається з різноманітних споживчих пристроїв, включаючи комп'ютери, мобільні телефони та гаджети Інтернету речей, як зазначено на рисунках 3.1 та 3.2. Ці пристрої створюють запити на дані, які надсилаються на рівні хмарних технологій для обробки. Для захисту даних під час передачі кінцеві пристрої з'єднуються з рівнем хмарних технологій за допомогою протоколів безпечного зв'язку [39]. Між кінцевими точками та зеленими центрами обробки даних рівень хмарних технологій служить з'єднувальним рівнем. Він складається з багатьох хмарних технологій, які навмисно розміщені близько до кінцевих пристроїв, щоб зменшити затримку даних та пришвидшити час реакції.

Шар шифрування та дешифрування Cloudlet Layer

Критичним компонентом дизайну є безпека даних. Cloudlet-рівень включає рівень шифрування та дешифрування, щоб гарантувати секретність та цілісність даних під час їх надсилання. Запит даних шифрується за допомогою надійних криптографічних методів після завершення роботи пристрою. Використо-

ую чи cloudlet-рівень та «зелені» центри обробки даних, зашифрований запит гарантує захист критично важливих даних від потенційних загроз. Після досягнення місця призначення зашифрований запит даних ретельно дешифрується за допомогою передових криптографічних методів, що забезпечує безпечне та надійне отримання запитуваної інформації, як показано на рисунку 3.1.

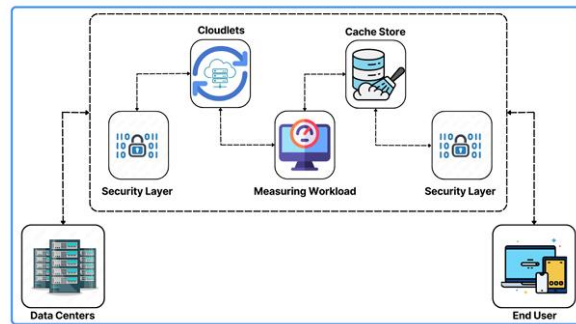


Рисунок 3.2 - Візуальне зображення архітектури моделі.

Система кеш-сховища

Механізм зберігання кешу кожного хмарного пристрою є важливим для підвищення швидкості отримання даних. Щоб задовольнити періодичні запити кінцевих пристроїв, він зберігає часто запитувані та поширені дані. Як показано на рисунку 3.1, завдяки підтримці локального кешу хмарний пристрій швидко відповідатиме на часті запити, не звертаючись до центрів обробки даних, заощаджуючи енергію та знижуючи накладні витрати, пов'язані з передачею даних.

Система вимірювання робочого навантаження рівномірного розподілу навантаження між хмарними системами використовується система динамічного вимірювання робочого навантаження. На рисунку 3.1 показано, що ця система періодично оцінює обчислювальну потужність та робоче навантаження кожної хмарної системи [40]. Згідно з цим дослідженням, вхідні запити на дані надсилаються до хмарної системи з найменшим навантаженням, що максимізує використання ресурсів та зменшує ймовірність виникнення вузьких місць.

Рівень центру обробки даних

Основою нашої енергоефективної обчислювальної інфраструктури є

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

рівень «зеленого» центру обробки даних, як показано на рисунку 3.1. Щоб зменшити свій вуглецевий вплив, ці центри обробки даних використовують енергоефективні методи, відновлювані джерела енергії та передові системи охолодження. «Зелені» центри обробки даних аналізують зашифровані запити даних після їх отримання від рівня хмарних технологій, отримуючи необхідні дані та шифруючи відповіді даних, перш ніж надсилати їх назад.

Розробка нашої моделі спрямована на вирішення нагальної проблеми високого енергоспоживання традиційними центрами обробки даних та зростаючого попиту на ефективну обробку та доставку даних в цифрову епоху. Ця технологія створює децентралізовану та розподілену обчислювальну архітектуру, що забезпечує безперебійне з'єднання між кінцевими пристроями та зеленими центрами обробки даних завдяки інтелектуальній інтеграції шарів хмарних технологій. Для максимізації ефективності використання ресурсів та заохочення балансування навантаження ця стратегія гарантує, що запити на дані інтелектуально пересилаються до найбільш відповідної хмарної технології на основі оцінки робочого навантаження. Окрім вирішення нагальної проблеми надмірного споживання енергії в традиційних центрах обробки даних, запропонована нами модель також враховує зростаючу потребу в ефективній обробці та передачі даних в цифрову епоху.

Методологія робить великий акцент на безпеці даних та конфіденційності, а також на економії енергії. Конфіденційні дані зберігаються в безпеці протягом усього процесу передачі завдяки рівням шифрування та дешифрування, реалізованим на рівні хмарних технологій. У цій моделі дані захищені від потенційних ризиків та незаконного доступу за допомогою надійних методів шифрування, які сприяють довірі користувачів до системи.

Використання зелених центрів обробки даних зміцнює нашу відданість екологічно чистим методам обчислень. Ці зелені центри обробки даних значно мінімізують свій вуглецевий слід, використовуючи енергоефективні технології, передові методи охолодження та відновлювані джерела енергії. Ця модель підтримує всесвітні зусилля щодо зменшення впливу інформаційних технологій на

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навколишнє середовище та сприяє більш сталому майбутньому шляхом інтеграції цієї конструкції із зеленими центрами обробки даних.

Блок-схема. Модуль інтерфейсу користувача

Завдання надходять до центру обробки даних з хмарних середовищ через модуль інтерфейсу користувача (UI). Модуль UI, найперший стан робочого процесу, як показано на рисунку 3.3, надає інтерфейс для взаємодії користувачів із центром обробки даних через хмарні технології. Він включає веб-портالي, інтерфейси командного рядка або графічні інтерфейси користувача (GUI), які дозволяють користувачам надсилати завдання, переглядати оновлення стану та отримувати доступ до різних послуг, що пропонуються центром обробки даних.

Модуль інтерфейсу користувача відіграє ключову роль в роботі центру обробки даних. Він збирає важливу інформацію про завдання, таку як тип завдання, необхідні ресурси, вхідні дані та пріоритет завдання, а потім безперешкодно надсилає цю інформацію на рівень хмарних технологій та рівень центру обробки даних для подальшої обробки, як показано на рисунку. 3.3. Модуль інтерфейсу користувача також надає зручний інтерфейс для відстеження статусу та перебігу надісланих завдань або проектів після їх надсилання. Користувачам надається інформація в режимі реального часу про виконання завдання, його завершення та будь-які помилки чи збої, що могли виникнути. Модуль також надає інструменти керування завданнями, які дозволяють користувачам призупиняти, скасовувати або змінювати завдання відповідно до правил та можливостей центру обробки даних.

Щоб гарантувати, що лише авторизовані користувачі мають доступ до ресурсів і послуг центру обробки даних, модуль інтерфейсу користувача керує автентифікацією користувачів та контролем доступу. Це здійснюється за допомогою таких процедур, як автентифікація за іменем користувача та паролем і багатфакторна автентифікація. Модуль інтерфейсу користувача миттєво пропонує попередження про помилки та методи звітності у випадках виникнення проблем або неполадок під час надсилання або обробки завдань, щоб інформувати користувачів та спрямовувати їх до життєздатних рішень.

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

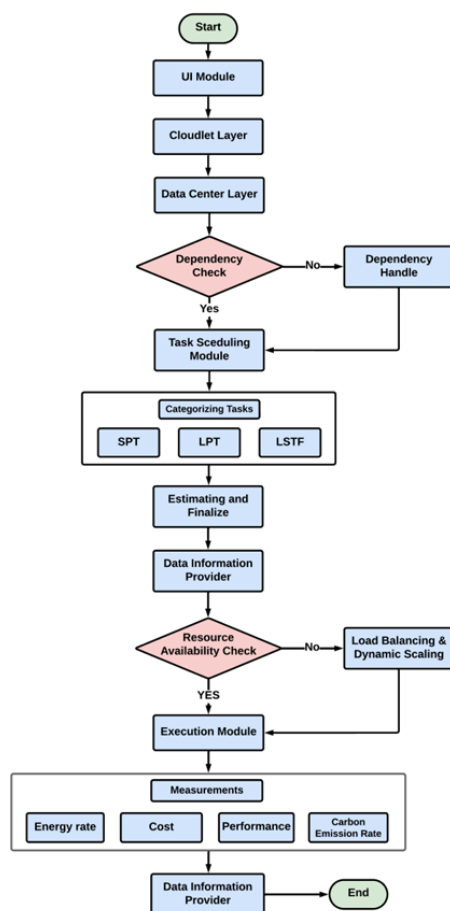


Рисунок 3.3 - Запропонована блок-схема роботи.

Шар хмар

Шар хмарних технологій на цій блок-схемі є вирішальним для вибору найкращого центру обробки даних для обробки запитів користувачів. Хмарні технології оцінюють поточне навантаження та потужність кількох центрів обробки даних, використовуючи механізм динамічного вимірювання робочого навантаження, як показано на рисунку 3.3. Cloudlet-рівень автоматично спрямовує запити користувачів до найбільш відповідного центру обробки даних на основі таких параметрів, як розташування, доступні ресурси та робоче навантаження, коли вони ініціюються користувачами. Ефективно розподіляючи обчислювальне навантаження між центрами обробки даних, цей метод зменшує навантаження на будь-який з них. Ця стратегія покращує загальну швидкість реагування системи, зменшуючи вимоги до інтенсивного взаємозв'язку між центрами обробки даних. Як розумний посередник, cloudlet-рівень оптимізує розподіл завдань та

додає безперебійної та ефективної роботи розподіленої інфраструктури.

Рівень центру обробки даних

Модель GEESO працює на рівні центру обробки даних. Цей рівень слугує центром, де обробляються та керуються всі запити користувачів, і є важливим для цієї операції. Його головна мета - керувати розподілом ресурсів для успішного задоволення запитів клієнтів. Це передбачає оцінку наявних ресурсів, вмілу класифікацію та впорядкування завдань, а також гарантування оптимального використання ресурсів. Він також керує залежностями завдань для збереження упорядкованого виконання подій, як показано на рисунку 3.3.

Крім того, постачальник інформації про дані та перевірка доступності ресурсів сприяють прийняттю обґрунтованих рішень. Якщо ресурсів недостатньо, використовується динамічне масштабування ресурсів та балансування навантаження. Фаза виконання відповідає за виконання завдання, а наступні модулі вимірювання вимірюють продуктивність, споживання енергії, вартість та викиди вуглецю.

Інфраструктура центру обробки даних є масштабованою та відмовостійкою, що дозволяє швидко реагувати на зміну вимог та відновлюватися після будь-яких збоїв. Загалом, рівень центру обробки даних діє як мозок робочого процесу, координуючи різноманітні завдання для забезпечення ефективних, безпечних та високоякісних послуг центру обробки даних.

Перевірка залежностей

У стані перевірки залежностей завдання перевіряються на наявність будь-яких залежностей або міжзадачних зв'язків, які можуть вплинути на планування. Залежності завдань та міжзадачні зв'язки досліджуються під час стану перевірки залежностей, щоб визначити, чи можуть вони впливати на планування, як показано на рисунку 3.3. На цьому вирішальному етапі виконання дій у належному порядку для виявлення та вирішення будь-яких обмежень або вимог допомагає оптимізувати робочий процес проекту та розподіл ресурсів.

Перевірка залежностей гарантує, що необхідні дії будуть виконані до того, як зможуть бути запущені залежні, що є критично важливим для управління

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завданнями. На основі цих залежностей система методично визначає порядок виконання. Завдання без залежностей або ті, вимоги яких вже виконані, переходять до модуля планування завдань, тоді як ті, чиї залежності ще не виконані, тимчасово призупиняються до виконання необхідних передумов. Це забезпечує безперебійний та організований процес виконання завдань.

Дескриптор залежності

На рисунку 3.3, стан дескриптора залежностей діє як пильний спостерігач за залежностями завдань, попереджаючи користувачів або адміністраторів за допомогою повідомлень про помилки або сповіщень, щойно виникають будь-які невіршені проблеми із залежностями. Використовуючи розподілений алгоритм виявлення блокувань для виявлення та м'якого вирішення ситуацій блокування, він ефективно керує складними сценаріями, такими як циклічні залежності або взаємозалежні процеси. Для забезпечення безперервного робочого процесу це спеціально розроблено для розподілених систем, де ресурси та процеси охоплюють кілька вузлів. Для виявлення блокувань цей підхід використовує розподілений зв'язок компонентів. Цей метод підходить для великого центру обробки даних, оскільки він масштабований.

Алгоритм виявлення тупикових блокувань у цьому розподіленому центрі обробки даних залежить від кількох ключових параметрів. Граф очікування, який має вузли для процесів та спрямовані ребра для з'єднань очікування, показує зв'язок між транзакціями. Wait-die та wound-wait – це два ключові методи, які контролюють транзакції відповідно до віку та пріоритету. Пріоритет транзакцій здебільшого визначається призначеними мітками часу. Статуси транзакцій, такі як активна, заблокована або перервана, надають інформацію про їхній статус. Залежності між транзакціями та ресурсами зображені на графі розподілу ресурсів. Тайм-аути пропонують часовий компонент, визначаючи тривалість часу, після якого транзакція вважається такою, що перебуває в тупиковій ситуації. Ефективність виявлення та контролю тупикових блокувань у нашій розподіленій системі підвищується завдяки цій комплексній методології.

Модуль планування завдань

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль планування завдань визначає пріоритетність завдань на основі різних критеріїв, таких як важливість, термін виконання та вимоги до ресурсів. Він гарантує, що критичним завданням надається вищий пріоритет для дотримання угод про рівень обслуговування та термінів. Впроваджуються алгоритми планування завдань для визначення порядку виконання завдань та розподілу ресурсів. Різні алгоритми планування, такі як «Найдовший час обробки», «Найкоротший час обробки» та «Найдовший час налаштування», використовуються на основі конкретних вимог центру обробки даних. Монітори штату використовують методи планування з урахуванням термінів виконання для визначення пріоритетності завдань, терміни яких наближаються.

Цей модуль включає енергоощадні методи планування для оптимізації споживання енергії в центрі обробки даних. Він може планувати завдання на енергоефективних серверах або консолідувати завдання для зменшення загального споживання енергії. Стан підтримує динамічне перепланування завдань у відповідь на зміни пріоритетів завдань, доступності ресурсів або завантаження системи. Стан відстежує хід виконання завдань та оновлює статус завдань після їх завершення, як показано на рисунку 3.3.

Категоризація завдань за найдовшим часом обробки (LPT)

На рисунку 3.3, алгоритм планування LPT та завдання з найдовшим часом обробки отримують вищий пріоритет. Такий підхід надає пріоритет завданням, які потребують більше ресурсів та часу обробки, потенційно зменшуючи загальний час обробки черги завдань. У контексті центру обробки даних цей алгоритм використовується, коли є завдання різної складності або коли деякі завдання мають вищі вимоги до обробки. Плануючи спочатку довші завдання, центр обробки даних може зосередитися на ранньому виконанні ресурсомістких завдань та потенційно зменшити час очікування для інших завдань у черзі.

Найкоротший час обробки (SPT)

Алгоритм планування SPT працює на відміну від LPT. Він надає пріоритет завданням з найкоротшим часом обробки та розкладами. Такий підхід мінімізує середній час очікування завдань у черзі та максимізує пропускну здатність

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдань, як показано на рисунку 3.3. У центрі обробки даних ми використовували алгоритм SPT , коли метою було швидко та ефективно обробляти завдання. Він особливо корисний для завдань з коротким часом виконання, оскільки гарантує їх своєчасне виконання, що може призвести до покращення загальної продуктивності та швидкості реагування центру обробки даних.

Найдовший час налаштування (LSTF)

Алгоритм планування LSTF враховує час налаштування, необхідний для кожного завдання перед його виконанням, як показано на рисунку 3.3. Час налаштування стосується часу, необхідного для підготовки ресурсів або контекстів до виконання завдання. У LSTF завданням з довшим часом налаштування надається вищий пріоритет. Такий підхід корисний, коли завдання мають значні накладні витрати на налаштування та коли завдання організовуються на основі часу налаштування. У центрі обробки даних ми використовували цей алгоритм, коли є завдання зі значними вимогами до запуску або підготовки перед фактичною обробкою. Плануючи завдання з довшим часом налаштування спочатку, центр обробки даних може оптимізувати використання ресурсів та зменшити час простою між виконаннями завдань.

Модуль оцінки ресурсів

Модуль оцінки ресурсів виконує ретельну оцінку після класифікації завдань на LPT, SPT або LSTF, як зазначено на рисунку 3.3 Він оцінює обсяг обчислювальної потужності, пам'яті, сховища та пропускної здатності мережі, необхідних для кожної діяльності. Крім того, модуль виконує оцінку витрат на постачання необхідних ресурсів, враховуючи такі елементи, як використання ресурсів, моделі ціноутворення та угоди про рівень обслуговування. Цей модуль оцінює розподіл ресурсів, а також вуглецевий слід, що виникає в результаті надання та використання цих ресурсів. Він враховує такі фактори, як джерела енергії, що використовуються в центрі обробки даних, їхні викиди вуглецю та загальну енергоефективність інфраструктури.

Перевірка доступності ресурсів, балансування навантаження та динамічне масштабування

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівномірний розподіл роботи між доступними ресурсами є ключовим компонентом балансування навантаження, як показано на рисунку 3. Балансування навантаження мінімізує небезпеку вузьких місць у ресурсах та максимізує їх використання завдяки правильному розподілу завдань. Завдяки цьому гарантується, що жоден ресурс не використовується надмірно, тоді як інші використовуються недостатньо. Як наслідок, робота центру обробки даних є ефективною, дії виконуються швидко, а загальна продуктивність оптимізована, що робить обчислювальне середовище більш надійним та чутливим.

Динамічне масштабування ресурсів є ключовою стратегією для підвищення ефективності центрів обробки даних та управління ресурсами, як показано на рисунку 3.3. Такий підхід дозволяє центру обробки даних динамічно реагувати на зміну вимог до робочого навантаження. Наприклад, у періоди високого робочого навантаження центр обробки даних може безперешкодно виділяти додаткові обчислювальні вузли, щоб забезпечити ефективне виконання завдань. В результаті, операційні витрати можуть бути зменшені, коли робоче навантаження зменшується, а ресурси можуть бути вивільнені. Підвищуючи ефективність та економічну ефективність, динамічне масштабування ресурсів оптимізує розподіл ресурсів, координуючи його з критичними вимогами.

Згідно з представленою блок-схемою на рисунку 3.4, процедура починається, коли запит отримується із зовнішніх джерел. Потім система визначає, чи доступні необхідні ресурси. Модель динамічно змінює розподіл робочого навантаження, щоб забезпечити ідеальне призначення завдань, якщо ресурси доступні. Потім система визначає, чи потрібно розподілити якісь завдання. Якщо завдання присутні, вони динамічно призначаються, що призводить до їх виконання. Після завершення завдання система вимірює продуктивність і переходить у стан постачальника інформації про дані. Цей стан передбачає постійне спостереження та архівування даних для прогнозування. За відсутності призначених завдань система стежить за вхідними запитамі. Якщо початкова доступність ресурсів низька, система виконує балансування навантаження, динамічне масштабування, виконання завдань та моніторинг продуктивності за допомогою

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основного управління, а потім переходить у стан постачальника інформації про дані. Блок-схема показує послідовні процеси, через які проходить запит, підкреслюючи динамічні зміни, що вносяться на цьому шляху для підвищення ефективності та продуктивності.

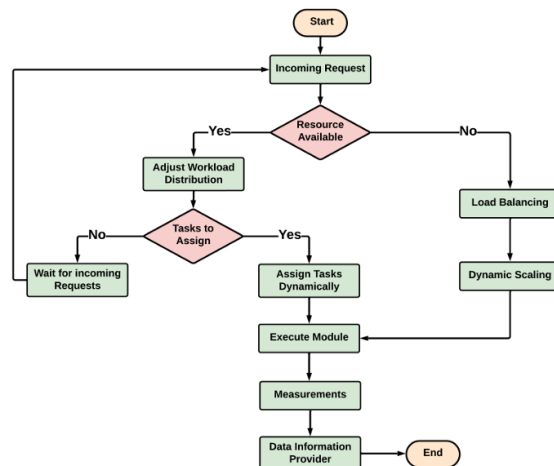


Рисунок 3.4 - Динамічно скоригований розподіл робочого навантаження та діаграма призначення завдань.

Вимірювання

Після виконання модуль вимірювання має кілька елементів і є важливим для завершення роботи. Він систематично оцінює виконання завдання, враховуючи час обробки, час відгуку та інші важливі показники ефективності для визначення ефективності, як зазначено на рисунку 3.3. Він ретельно аналізує використання енергії під час виконання завдання, ретельно відстежуючи його на всіх вузлах обробки та частинах для розрахунку споживання енергії. Ще одним важливим процесом є розрахунок витрат, який вимірює вартість кожної діяльності з урахуванням розподілу ресурсів, використання енергії та інших витрат. Крім того, модуль вимірює викиди вуглецю, що відносяться до виконання завдання, шляхом обчислення викидів вуглекислого газу, що виникають внаслідок споживання енергії, відповідно до принципів зелених обчислень .

Постачальник інформації про дані

Постачальник інформації про дані має різноманітні обов'язки в умовах

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центру обробки даних. Спочатку він широко збирає інформацію з багатьох джерел, включаючи вимірювання щодо використання ресурсів, споживання енергії, часу виконання завдань та продуктивності. Він також може розширити джерела, з яких збирає дані, включаючи погоду та ціни на енергоносії. Потім дані ретельно обробляються та аналізуються за допомогою різних методів, включаючи аналітику даних та алгоритми машинного навчання. Його аналітичні навички дозволяють приймати рішення на основі даних, дозволяючи виявляти важливі тенденції, закономірності та аномалії.

З рисунка 3.4 видно, що постачальник інформації про дані також виконує вирішальну функцію в моніторингу продуктивності, контролюючи ефективність, використання ресурсів, час виконання завдань та час реакції центру обробки даних. Він ретельно контролює ключові показники ефективності (KPI) для оцінки ефективності центру обробки даних. Крім того, він спеціалізується на моніторингу та оцінці тенденцій споживання енергії в контексті зелених центрів обробки даних, використовуючи такі показники, як ефективність використання енергії (PUE), для оцінки заходів з енергозбереження. Крім того, він проводить аналіз впливу на навколишнє середовище та розраховує викиди вуглецю, спричинені використанням енергії, що сприяє ініціативам сталого розвитку.

Постачальник інформації про дані також надає корисну підтримку за допомогою звітності та візуалізації, використовуючи панелі інструментів, діаграми, графіки та інші інструменти візуалізації, щоб полегшити користувачам розуміння даних. Він розширює пропозиції щодо управління ресурсами на основі даних та аналізу, пропонуючи методи підвищення енергоефективності, скорочення витрат та покращення загальної продуктивності. Крім того, він прогнозує потреби в ресурсах, моделі споживання енергії та можливі вузькі місця в продуктивності, використовуючи історичні дані та прогнозне моделювання. У деяких випадках він навіть пропонує моніторинг у режимі реального часу, попереджаючи менеджерів про важливі події та допомагаючи вчасно реагувати для найкращої можливої роботи центру обробки даних. Зрештою, він надає адміністраторам центрів обробки даних допомогу в прийнятті рішень на основі даних щодо

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподілу ресурсів, управління робочим навантаженням та методів енергозбереження.

Інструменти моніторингу в режимі реального часу, методи збору даних та аналізу

Потужний набір інструментів з відкритим кодом під назвою Prometheus відомий своєю масштабованістю та надійністю в моніторингу та сповіщеннях. Він добре справляється зі збором та аналізом даних часових рядів. Поєднання цих двох інструментів забезпечує динамічний та візуально привабливий спосіб оцінки зібраних даних у поєднанні з Grafana, яка дозволяє налаштовувати панелі інструментів. Для даних журналів та подій корисним є стек ELK (Elasticsearch, Logstash та Kibana), оскільки він забезпечує централізоване ведення журналу та аналітику в режимі реального часу.

Такі технології, як Apache Kafka, забезпечують безперервне оновлення даних у міру виникнення подій для потокової передачі даних у режимі реального часу. Ця стратегія дозволяє системі адаптуватися до раптових змін. Крім того, ретельний та своєчасний підхід до збору даних включає періодичне опитування через певні проміжки часу, що стало можливим завдяки таким технологіям, як Telegraf, або спеціальним скриптам, для обробки метрик, які не потребують оновлення в режимі реального часу. Методи машинного навчання (ML) використовуються для покращення аналітичних навичок системи. Такі алгоритми, як кластеризація, регресія та виявлення аномалій, допомагають у прогнозуванні тенденцій, ідентифікації аномалій та оптимізації розподілу ресурсів. Використання методів статистичного аналізу також допомагає виявляти викиди, розуміти розподіл даних та підтримувати обґрунтовані процеси прийняття рішень. Зрештою, ці аналітичні методи дозволяють системі робити цінні висновки із зібраних даних.

Розробка надійної системи моніторингу включає низку важливих елементів. По-перше, легкий потік даних між компонентами системи стає можливим завдяки безперебійній взаємодії із системами управління завданнями через API. Це гарантує швидку реакцію на зміну ситуацій. Гнучкість та ефективність

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищуються завдяки використанню певних технологій баз даних, таких як InfluxDB для даних з часовими мітками та MongoDB або Cassandra для зберігання величезних обсягів гетерогенних даних. Створення циклу зворотного зв'язку також є важливим. Завдяки цьому циклу система може навчатися на основі минулих даних, що підтримується підходами постійного вдосконалення. В результаті алгоритми та налаштування регулярно оновлюються. Критичні показники відстежуються майже в режимі реального часу, тоді як інші показники аналізуються через регулярні проміжки часу відповідно до цілей та завдань продуктивності системи.

Алгоритм

```

1: function Categorize_Processes(Processes)
2:   spt, lpt, lstf
3:   for  $p \in processes$  do
4:      $syncedSPT \leftarrow p.p\_time + p.s\_time$ 
5:      $spt \leftarrow spt + syncedSPT$ 
6:   end for
7:   for  $p \in processes$  do
8:      $syncedLPT \leftarrow -p.p\_time + p.s\_time$ 
9:      $lpt \leftarrow lpt + syncedLPT$ 
10:  end for
11:  for  $p \in processes$  do
12:     $syncedLSTF \leftarrow -p.p\_time + p.s\_time$ 
13:     $lstf \leftarrow lstf + syncedLSTF$ 
14:  end for
15:  return spt, lpt, lstf
16: end function

```

Лістинг 3.1 - Алгоритм класифікації процесів

Функція *Categorize_Processes* в лістингу 1.1 класифікує процеси та приймає масив процесів як вхідні дані. Тут алгоритм показує, що SPT, LPT та LSTF ініціалізуються для зберігання категоризованих завдань для категорій Найкоротший час обробки, Найдовший час обробки та Найдовший час налаштування (Setup Time First) відповідно. Для кожного завдання, в ітеративному підході, процеси перераховані в порядку зростання їхнього часу обробки для категорії SPT; процеси сортуються в порядку спадання їхнього часу обробки, щоб надати пріоритет довшим завданням для категорії LPT та процесам на основі зменшення

часу налаштування, надаючи перевагу тим процесам з довшим часом налаштування.

Алгоритм категоризації процесів

Категоризуючи всі завдання, функція повертає три категорії процесів: SPT, LPT та LSTF. Така категоризація може допомогти у прийнятті рішень та плануванні завдань на основі вибраних критеріїв.

Найкращий алгоритм визначення процесу

В лістингу 3.2, функція *Determine_Best_Process* приймає список варіантів як вхідні дані та прагне визначити найкращий варіант на основі оцінених критеріїв. Для кожного варіанту значення споживання енергії, вартості, продуктивності та викидів вуглецю оцінюються за допомогою аналізу історичних даних, статистичного аналізу та алгоритмів машинного навчання. Після врахування необхідних аспектів, вона повідомляє постачальнику інформації про дані для подальшої обробки. Функція *report_data_information_provider*, згадана в лістингу 3.2, а потім надає повну інформацію про ресурси та іншу необхідну інформацію.

Лістинг 3.2 - Найкращий алгоритм визначення процесу

```
1: function Determine_Best_Process(processes)
2:   selected_process ← None
3:   for p ∈ all_processes do
4:     x ← estimated_energy_consumption(p)
5:     y ← estimated_cost(p)
6:     w ← estimated_performance(p)
7:     z ← estimated_carbon_emission(p)
8:   end for
9:   report_data_information_provider(x, y, w, z)
10:  return selected_process
11: end function
```

Алгоритм балансування навантаження та динамічного масштабування

Лістинг 3.3 - Балансування навантаження та алгоритм динамічного масштабування

```

1: function Perform_Load_Balancing(dc, n)
2:   final_resources  $\leftarrow$  0
3:   for i  $\leftarrow$  0 to n do
4:     final_resources  $\leftarrow$  final_resources + dc[i].a_resources
5:   end for
6:   avg_r  $\leftarrow$  final_resources / n
7:   for i  $\leftarrow$  0 to n do
8:     if dc[i].a_resources - avg_r then
9:       d  $\leftarrow$  dc[i].a_resources - avg_r
10:      dc[i].a_resources  $\leftarrow$  avg_r
11:      for j  $\leftarrow$  0 to n and d > 0 do
12:        if i  $\neq$  j and dc[j].a_resources < avg_r then
13:          t_resources  $\leftarrow$  avg_r - dc[j].a_resources
14:          if t_resources  $\leq$  d then
15:            dc[j].a_resources  $\leftarrow$  dc[j].a_resources + t_resources
16:            d  $\leftarrow$  d - t_resources
17:          else
18:            dc[j].a_resources  $\leftarrow$  dc[j].a_resources + d
19:            d  $\leftarrow$  0
20:          end if
21:        end if
22:      end for
23:    end if
24:  end for
25: end function
26: function Perform_Dynamic_Scaling(dc, n, ht, lt, tca)
27:   for i  $\leftarrow$  0 to n do
28:     if dc[i].a_resources > ht then
29:       dc[i].a_resources  $\leftarrow$  dc[i].a_resources - tca
30:     else if dc[i].a_resources < lt then
31:       dc[i].a_resources  $\leftarrow$  dc[i].a_resources + tca
32:     end if
33:   end for
34: end function

```

Функція балансування навантаження: Функція *Perform_load_balancing* виконує балансування навантаження, обчислюючи загальну кількість доступних ресурсів у всіх центрах обробки даних та надає середнє значення доступних ресурсів, ділячи загальну кількість ресурсів на кількість центрів обробки даних, як у алгоритмі 3.3 .

Якщо доступні ресурси центру обробки даних більші за середні ресурси, то в цьому центрі обробки даних є надлишок ресурсів. Алгоритм обчислює різницю між доступними та середніми ресурсами. Потім він розподіляє надлишкові

ресурси між іншими центрами обробки даних з ресурсами нижче середнього. Цей конкретний алгоритм працюватиме до завершення розподілу.

Функція виконання динамічного масштабування: Функція - *Perform_Dynamic_Scaling* контролює доступні ресурси кожного центру обробки даних і масштабує їх, якщо вони перевантажені, або масштабує їх, якщо вони використовуються недостатньо, як зазначено в лістингу 3.3.

Коли доступні ресурси центру обробки даних перевищують високий поріг, він вважається перевантаженим і потребує масштабування шляхом зменшення доступних ресурсів перевантаженого центру обробки даних на заздалегідь визначену величину масштабування. Зворотний випадок – коли доступні ресурси центру обробки даних нижчі за нижній поріг.

Метрики оцінювання

Під час ітерації для кожного виконання процесу код виконує обчислення, пов'язані зі споживанням енергії, вартістю, продуктивністю та викидами вуглецю, як показано в алгоритмі. 3.4

Лістинг 3.4 - Алгоритм вимірювання показників

```
1: function Measure_Metrics_After_Execution(ped)
2:   x ← 0
3:   y ← 0
4:   w ← 0
5:   z ← 0
6:   for each pe ∈ ped do
7:     e ← calculate_energy_consumption(pe)
8:     c ← calculate_cost(e)
9:     p ← calculate_performance(pe)
10:    cer ← calculate_carbon_emission(e)
11:    x ← x + e
12:    y ← y + c
13:    w ← w + p
14:    z ← z + cer
15:   end for
16:   avg_p ← w / ped.length
17:   report_data_information_provider(x, y, avg_p, z)
18: end function
```

Для поточного виконання процесу споживання енергії розраховується за допомогою спеціального методу розрахунку та зберігається. Воно також використовується для розрахунку вартості, пов'язаної зі споживанням енергії. Вартість розраховується на основі вартості енергії на одиницю та будь-яких додаткових операційних витрат і збережених даних. Продуктивність поточного виконання

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу розраховується за допомогою відповідних показників, таких як час виконання, пропускна здатність або час відгуку, які зберігаються. Споживання енергії, розраховане раніше, використовується для оцінки викидів вуглецю, що утворюються внаслідок споживання енергії. Розрахунок викидів вуглецю зберігається враховуючи вуглецеву інтенсивність використовуваних джерел енергії. Він також розраховує середній час відгуку для вимірювання продуктивності та інформує постачальника даних.

3.2 Методологія реалізації та алгоритми оптимізації енергоспоживання

Споживання енергії (EC) у нашій моделі відображає складний взаємозв'язок між споживанням енергії, ефективністю використання енергії (PUE) та загальним споживанням енергії (TEI) у центрах обробки даних. *PUE* представляє ефективність використання енергії, тобто відношення загального споживання енергії до енергії, споживаної виключно ІТ-обладнанням, включаючи інформаційно-технологічне (ІТ) обладнання та допоміжні системи. Це рівняння підкреслює, як споживання енергії суттєво залежить від взаємодії *PUE* та різних енергетичних ресурсів, підкреслюючи необхідність ефективного розподілу ресурсів та стратегій оптимізації для скорочення споживання енергії, підвищення продуктивності центрів обробки даних та зменшення викидів вуглецю.

Споживання енергії (EC):

$$EC = PUE \times TEI \quad (3.1)$$

$$PUE = \frac{(\sum_{i=1}^3(E_i))}{(cpu_{load})} \quad (3.2)$$

де $E1 = Ec$, $E2 = Le$, $E3 = Dl$.

PUE вказує на ефективність використання енергії, що визначається за допомогою різних параметрів, які є сумою E_i та навантаження на процесор. E_i стосується всіх джерел споживання енергії, що охоплюють усі компоненти, такі як споживання енергії (E_c). Це включає енергію освітлення (E_e), яка використовується для технічного обслуговування, безпеки та операційних завдань, а також інших функцій; будівлі центрів обробки даних повинні мати достатнє освітлення. Як і в будь-якому іншому комерційному або промисловому місці, системи освітлення центрів обробки даних залежать від електроенергії для роботи. Також включені втрати при розподілі (Dl) та інша інфраструктура; центральні процесори (навантаження на процесор) у центрі обробки даних підлягають загальному обчислювальному навантаженню або попиту, представленому цим показником. Його можна розрахувати за допомогою обчислювальних завдань, обчислювальної потужності або інших відповідних показників, що ілюструють навантаження, яке обробляють сервери.

$$TEI = c_{pu}_{load} + cooling_{energy} + distribution_{lose} + backup_{energy} \quad (3.3)$$

Загальне енергоспоживання (TEI) – це комбінація деяких параметрів: c_{pu}_{load} – загальне обчислювальне навантаження процесора, $cooling_{energy}$ – це енергія, яка використовується для охолодження серверів, $distribution_{lose}$ – це втрати енергії, що виникають під час розподілу електроенергії по всій системі. Втрати при розподілі, які знижують загальну ефективність розподілу енергії, зазвичай виникають через опір у кабелях, трансформаторах та інших частинах розподільчої мережі. Тут резервна енергія стосується енергії, що виробляється або зберігається резервними системами всередині будівлі. Джерела безперебійного живлення (ДБЖ), генератори або пристрої накопичення енергії (такі як акумулятори) часто використовуються як резервні джерела енергії.

Вартість

Рівняння витрат у нашій моделі має першорядне значення, оскільки воно кількісно визначає фінансові наслідки споживання енергії в центрах обробки

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних. Це дослідження підкреслює критичний зв'язок між споживанням енергії та експлуатаційними витратами, дозволяючи особам, які приймають рішення,

зрозуміти економічний вплив стратегій оптимізації енергоспоживання. Враховуючи фактори вартості, організації можуть робити обґрунтований вибір, який відповідає їхнім бюджетним обмеженням, одночасно дотримуючись енергоефективних практик. Кроки рівняння включають множення загального споживання енергії на вартість кіловат-години, що призводить до чіткого відображення прямого зв'язку між споживанням енергії та фінансовими витратами. Це розуміння допомагає визначити економічно ефективні підходи, які оптимізують споживання енергії, зберігаючи при цьому ефективне виконання завдань та операційну продуктивність.

Вартість (C),

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^3(E_i))}{(cpu_{load})} \times (cpu_{load} + cooling_{energy} + distribution_{lose} + backup_{energy}) \times cost_{per_{kWh}} \quad (3.4)$$

У цьому рівнянні функції витрат усі параметри вже введені з термінів *PUE* та *TEI*. *Вартість на кіловат- годину* (кВт·год) відноситься до вартості за кіловат-годину (кВт·год), тобто ціни, яку постачальник енергії або комунальна компанія оцінює за використання однієї кіловат-години електроенергії. Це поширений спосіб вимірювання кількості використаної енергії та її вартості.

Продуктивність

продуктивності (*p*) є ключовим аспектом нашої моделі та оцінює ефективність виконання завдань у центрах обробки даних. Вона дає уявлення про те, наскільки добре система може обробляти робочі навантаження та своєчасно реагувати на запити користувачів. Розраховуючи продуктивність за допомогою оберненої величини середнього часу відгуку (ART), ми фіксуємо швидкість реагування операцій центру обробки даних. Цей показник дозволяє нам оцінити

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатність системи швидко задовольняти потреби користувачів. Рівняння продуктивності та оцінка сприяють оптимізації розподілу ресурсів, забезпечуючи ефективне виконання завдань та підтримку задоволеності користувачів. Це також допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо балансування навантаження, планування завдань та інших стратегій для підвищення загальної продуктивності середовища центру обробки даних.

Продуктивність (р),

$$p = 1 \left(\frac{(\sum_{i=1}^n p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n)}{n} \right) \quad (3.5)$$

Викиди вуглецю

Коефіцієнт викидів вуглецю є критичним елементом нашої моделі, що враховує вплив діяльності центрів обробки даних на навколишнє середовище. Він кількісно визначає кількість викидів вуглецю, що утворюються на одиницю споживання енергії. Розкладаючи коефіцієнт викидів вуглецю (C_{ef}) на добуток вуглецевої інтенсивності джерела енергії (C_{iesi}) та інтенсивності споживання енергії (Edp), ми можемо охопити викиди, пов'язані як з використанням джерелом енергії, так і з енергоспоживанням центру обробки даних. Цей розклад пропонує детальне розуміння вуглецевого сліду, що дозволяє нам визначити конкретні сфери для покращення. Це узгоджується з метою нашої моделі щодо скорочення викидів вуглецю шляхом оптимізації використання енергії, впроваджуючи більш екологічні джерела енергії та енергоефективні практики. Маніпулюючи коефіцієнтом викидів вуглецю, ми можемо оцінити вплив різних стратегій на навколишнє середовище та вибрати найбільш стійкі варіанти для роботи центрів обробки даних.

Викиди вуглецю (CE),

$$C_{ef} = EC \times \sum_{i=1}^n C_{iesi} \times E_{di} \quad (3.6)$$

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз

У порівняльному аналізі ми оцінили чотири сценарії: «Збалансований підхід», «Енергоефективний фокус», «Стратегія, орієнтована на продуктивність» та «Вуглецево-нейтральна мета» порівняно з традиційним базовим рівнем. Кожен аспект (споживання енергії, вартість, продуктивність, викиди вуглецю) досліджується у традиційному центрі обробки даних.

Якщо розглядати збалансований підхід, центр обробки даних працює з помірними витратами, споживанням енергії та викидами вуглецю. Продуктивність є помірною, що свідчить про ефективне виконання завдань. Сценарій «Енергоефективний підхід» підкреслює енергоефективність, оскільки значно знижуються як споживання енергії, так і викиди вуглецю. Продуктивність залишається помірною, що демонструє ефективний розподіл ресурсів та планування завдань.

Впроваджуючи стратегію, орієнтовану на продуктивність, основна увага приділяється максимізації продуктивності, що призводить до вищих витрат, споживання енергії та викидів вуглецю. Сценарій «Вуглецева нейтральність» спрямований на досягнення вуглецевої нейтральності шляхом зменшення як споживання енергії, так і викидів вуглецю, за умови збалансованого співвідношення витрат та продуктивності. Порівняльний аналіз дає уявлення про компроміси між різними сценаріями, що дозволяє нам приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу ресурсів та стратегій оптимізації енергоспоживання в центрах обробки даних.

Анотації та пояснювальні примітки

У контексті нашого дослідження кілька ключових факторів відіграють ключову роль у формуванні сталості та продуктивності центрів обробки даних. Наприклад, ефективність використання енергії (PUE) служить орієнтиром енергоефективності, тоді як загальний показник споживання енергії (TEI) комплексно враховує споживання енергії. Наш підхід доповнюється індексом енергетичної залежності (EDI), який кількісно визначає залежність від відновлюваних джерел енергії, та вуглецевісткістю джерела енергії (CIES), яка відображає енергетичну стійкість. Для оцінки цілісної ефективності ми вводимо загальну

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективність (OE) – складену метрику, що включає PUE, середній час відгуку (ART) та коефіцієнт викидів вуглецю. У тандемі ці параметри впливають на наші методи планування завдань, оптимізуючи розподіл ресурсів для підвищення продуктивності, енергоефективності та загальної продуктивності системи.

3.3 Оцінювання ефективності оптимізації та аналіз результатів

У цій роботі розглядаються конкретні труднощі, з якими стикаються центри обробки даних, з особливим акцентом на використанні енергії та викидах вуглецю. Через поточні умови в цьому дослідженні використовується метод синтетичних даних, де екологічні проблеми не є основним пріоритетом діяльності центрів обробки даних у країні. Метою є моделювання ситуацій, оскільки прямі опитування чи інтерв'ю не нададуть повної інформації через низьку увагу керівництва центрів обробки даних до енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду. Ілюстративний кейс намагається надати детальний аналіз, що висвітлює потенційні труднощі та пропонує спекулятивні рішення за допомогою використання синтетичних даних. В умовах, коли екологічні проблеми ще не є помітними, презентація кейсу, яка базується на змодельованих важливих людях та подіях, забезпечує наративний фон для дискусійних рішень щодо підвищення енергоефективності та мінімізації викидів вуглецю. Переконливі та навідні рішення підкріплюються аналізом синтетичних даних, що пропонує основу для подальших роздумів щодо узгодження центрів обробки даних з цілями глобального сталого розвитку.

Наступна таблиця 3.1 наведено ретельний порівняльний аналіз чотирьох конкретних сценаріїв у нашій моделі, а саме: «Збалансований підхід», «Енергоефективний фокус», «Стратегія, орієнтована на продуктивність», «Вуглецево-нейтральна мета».

Крім того, для довідки в таблиці наведено сценарій, що представляє собою традиційний центр обробки даних. Важливо уточнити, що всі дані, представлені в таблиці, є синтетичними та цілеспрямовано згенерованими для імітації

реалістичних сценаріїв для ретельного аналізу. Це стосується штучно згенерованих даних, а не реальних даних, отриманих в результаті спостережень або вимірювань. За допомогою цих синтетично побудованих сценаріїв ми демонструємо ключові показники, що охоплюють споживання енергії, вартість, продуктивність та викиди вуглецю.

Таблиця 3.1

Значення оцінки ефективності.

Сценарій (Scenario)	Енергоспоживання, кВт-год (Energy Consumption)	Вартість, \$ (Cost)	Продуктивність (Performance)	Викиди вуглецю, кг CO2 (Carbon Emission)
Збалансований підхід	5050	562.5	0.20	1650
Орієнтація на енергоефективність	4025	393.75	0.25	1412.5
Стратегія, орієнтована на продуктивність	5500	775	0.145	2250
Ціль - вуглецева нейтральність	4400	450	0.1818	1200
Традиційний	6500	825	0.27	2400

Наші розрахунки включають відповідні рівняння, що враховують такі критичні фактори, як ефективність використання енергії (PUE), середній час відгуку (ART) та коефіцієнт викидів вуглецю (CEF). Цей синтетичний аналіз надає нюансоване розуміння компромісів та переваг, пов'язаних з різними стратегіями, тим самим сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень для компетентного управління ефективними та сталими центрами обробки даних.

Методологія генерації даних

Для моделювання сценаріїв ми використовували метод генерування даних, який дозволив нам виконати поглиблений аналіз. Синтетичні набори даних були створені з використанням підходу до виробництва статистичних даних, який включає рандомізацію в межах визначених меж для імітації характеристик реальних середовищ. Метод, що використовується для генерування даних, поєднує числове моделювання зі статистичними розподілами. Щоб відтворити

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мінливість, що спостерігається в реальних подіях, ми спеціально використову-вали методи теорії ймовірностей, такі як випадкова вибірка з чітко визначених розподілів. Для представлення динамічних характеристик та взаємодії між різ-ними факторами також використовувалися числові моделювання.

Для кожного сценарію процедура передбачає встановлення факторів, по-в'язаних із споживанням енергії, вартістю, продуктивністю та викидами вуг-лецю, як показано в таблиці 3.2. Потім до цих характеристик застосовується ко-нтрольована рандомізація, що гарантує різноманітний , але реалістичний набір даних для наших досліджень. Важливо пам'ятати, що метою є створення гнуч-кого набору даних, який відображає дух різних сценаріїв, а не відтворення конк-ретних реальних прикладів. Ми маємо намір вивчати потенційні результати та тенденції, пов'язані з різними методами, не обмежуючись поточними наборами даних, використовуючи підхід до створення синтетичних даних. Методологія пропонує глибоке розуміння наслідків альтернативних підходів та забезпечує гнучкість у дослідженні сценаріїв.

Порівняння споживання енергії

Сценарій «Енергоефективний фокус» з таблиці На рисунках 3.5 та 3.6 по-казано найнижче споживання енергії серед сценаріїв – 4025 кВт·год, що свідчить про сильний акцент на оптимізації енергоспоживання. З іншого боку, сценарій

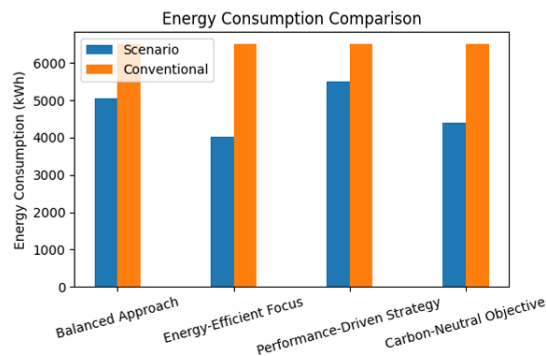


Рисунок 3.5 - Графік порівняння споживання енергії.

«Стратегія, орієнтована на продуктивність» демонструє вище споживання енергії – 5500 кВт·год, що свідчить про компроміс заради покращення виконання

завдань. У сценарії «Збалансований підхід» центр обробки даних прийнятно споживає 5050 кВт·год. Знову ж таки, «Вуглецево-нейтральна мета» споживає 4400 кВт·год, що також знаходиться в прийнятному діапазоні. Порівняно з традиційними центрами обробки даних, усі чотири сценарії споживають менше енергії. Порівняно з нашим підходом, традиційний центр обробки даних споживає 6500 кВт·год енергії, що є найбільшою кількістю серед усіх сценаріїв.

Порівняння вартості

Сценарій «Енергоефективний фокус» з таблиці 3.2 та рисунок 3.6 забезпечує найнижчі витрати завдяки зниженому споживанню енергії, яке становить 393,75 доларів США. І навпаки, сценарій «Стратегія, орієнтована на продуктивність» передбачає вищі витрати у розмірі 775 доларів США, що підкреслює наслідки пріоритетності продуктивності для витрат. У сценаріях «Збалансований підхід» та «Вуглецева нейтральність» центр обробки даних працює з помірними витратами у розмірі 562,5 та 450 доларів США. Традиційні центри обробки даних коштують 825 доларів США, що вище, ніж сценарії «Збалансований підхід», «Енергоефективність» та «Вуглецева нейтральність» нашого підходу.

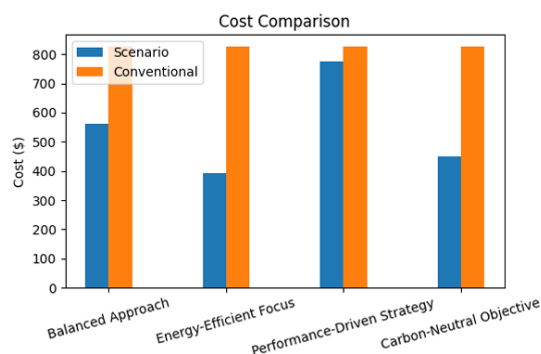


Рисунок 3.6 - Графік порівняння витрат.

2.1. Порівняння продуктивності

Сценарій «Стратегія, орієнтована на продуктивність» з таблиці На рисунку 3.7 досягається найнижчий показник часу відгуку 0,145 мс, що демонструє ефективний розподіл ресурсів. Натомість сценарій «Енергоефективний фокус» отримує таку ж продуктивність з показником 0,25 мс, що підкреслює

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потенційний компроміс щодо енергоефективності для покращеного виконання завдань. Сценарій «Збалансований підхід» демонструє помірний час відгуку 0,20 мс. У сценаріях «Вуглецево-нейтральна мета» центру обробки даних потрібно 0,1818 мс для досягнення своєї мети. У сценаріях «Збалансований підхід», «Стратегія, орієнтована на продуктивність» та «Вуглецево-нейтральна» центр обробки даних працює з високим часом відгуку порівняно зі звичайними центрами обробки даних, які мають час відгуку 0,27 мс.

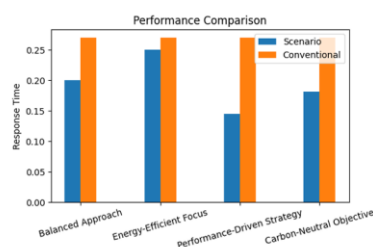


Рисунок 3.7 - Графік порівняння продуктивності.

Порівняння викидів вуглецю

З таблиці 3.2 та рисунок 3.8 проаналізовано, що сценарій «Вуглецево-нейтральна мета» досягає успіху в мінімізації викидів вуглецю, маючи обсяг 1200 кг CO₂, що відповідає його екологічній спрямованості. І навпаки, сценарій «Стратегія, орієнтована на продуктивність» призводить до вищих викидів вуглецю, які становлять 2250 кг, що свідчить про баланс між продуктивністю та сталим розвитком. У сценаріях «Збалансований підхід» та «Енергоефективний підхід» центр обробки даних виробляє 1650 кг та 1412,5 кг CO₂. Традиційні центри обробки даних виробляють 2400 кг CO₂ відповідно, що набагато більше, ніж підхід нашої системи.

Інтерпретація та короткий виклад оповіді

Аналіз цих сценаріїв з таблиці 3.2 висвітлено важливі компроміси між споживанням енергії, вартістю, продуктивністю та викидами вуглецю. Сценарій «Енергоефективний фокус» є кращим вибором для екологічно свідомих центрів обробки даних, оскільки він перевершує як енергоефективність, так і економічну

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективність. Сценарій «Стратегія, орієнтована на продуктивність», навпаки, надає оптимальному виконанню завдань та продуктивності вищий пріоритет, ніж енергоефективність. У сценарії «Вуглецево-нейтральна мета» викиди вуглецю ефективно скорочуються, сприяючи сталому розвитку. «Збалансований підхід» тим часом досягає посередині, підтримуючи розумні рівні в кожній із цих сфер. Як результат, це дослідження підкреслює важливість використання моделі оптимізації енергоспоживання для управління роботою центрів обробки даних, підкреслюючи необхідність узгодження рішень з конкретними цілями та використання стратегічного управлінського підходу до управління центром обробки даних.

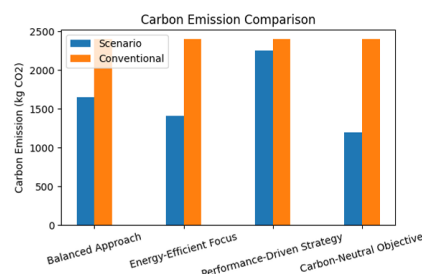


Рисунок 3.8 - Графік порівняння викидів вуглецю.

Запропонована методологія складається з чотирьох унікальних фокусних стратегій, адаптованих до певних потреб системи. Хоча кількісний аналіз синтетичних даних не точно відтворює реальні набори даних, він дав важливі висновки для цілей цього дослідження. Ми отримали синтетичні дані з таблиці 3.2 і порівнюючи наш підхід із традиційними системами, ми змогли визначити покращення використання ресурсів або відсоток споживання енергії та скорочення викидів вуглецю. Стратегія продемонструвала помітний прогрес у зниженні двох важливих аспектів цього дослідження, а саме використання енергії та викидів вуглецю, як представлено в таблиці 3.3. Збалансований підхід призвів до зменшення споживання енергії на 22,31% та скорочення викидів вуглецю на 31,25%. Стратегія, зосереджена на енергоефективності, продемонструвала вражаюче скорочення споживання енергії на 38,08% та викидів вуглецю на 41,15%. В результаті стратегії, орієнтованої на ефективність, споживання енергії було

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скорочено на 15,38%, а викиди вуглецю – на 6,25%. Зрештою, досягнення мети вуглецевої нейтральності призвело до помітного зменшення викидів вуглецю на 50 % та підвищення енергоефективності на 32,31 % .

Таблиця 3.2

Таблиця покращення продуктивності.

Сценарій (Scenario)	Скорочення енергоспоживання, кВт-год (Energy Consumption Reduction)	Скорочення викидів вуглецю, кг CO2 (Carbon Emission Reduction)
Збалансований підхід	22.31%	31.25%
Орієнтація на енергоефективність	38.08%	41.15%
Стратегія, орієнтована на продуктивність	15.38%	6.25%
Ціль - вуглецева нейтральність	32.31%	50%

Рішення

У сценарії «Збалансований підхід» основна увага приділяється всім необхідним аспектам, таким як енергоефективність, економічна ефективність, продуктивність та рівень викидів вуглецю. Цей підхід гарантує, що всі чотири аспекти надають прийнятні послуги. Сценарій «Енергоефективний фокус» робить сильний акцент на скороченні споживання енергії для підтримки прийнятного рівня продуктивності. Основна мета - мінімізувати споживання енергії центром обробки даних, що призводить до економії коштів та зменшення викидів вуглецю. Якщо розглядати сценарій стратегії, орієнтованої на продуктивність, то основною проблемою є максимізація продуктивності та швидкості реагування центру обробки даних. Енергоефективність та вартість можуть відійти на другий план, щоб забезпечити роботу програм та завдань на пікових рівнях. Цей підхід підходить для ситуацій, коли продуктивність є критично важливою, наприклад, для високопродуктивних обчислювальних середовищ. Однак сьогодні навколишнє середовище є великою проблемою в контексті викидів вуглецю. Сценарій з нейтральною цільовою діяльністю до вуглецю мінімізує вуглецевий слід та вплив центру обробки даних на навколишнє середовище. Докладаються зусилля для

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення викидів вуглецю, пов'язаних зі споживанням енергії. Це може включати використання відновлюваних джерел енергії, оптимізацію систем охолодження та впровадження енергоефективного обладнання.

Неможливо переоцінити важливість впровадження принципів сталого розвитку в сферах енергоефективності та скорочення вуглецевого сліду. Ми йдемо небезпечним шляхом через широко поширене зловживання енергією та необмежене виробництво викидів вуглецю. Дані показують сувору правду: надмірне споживання енергії не лише створило навантаження на наші обмежені ресурси, але й сприяло вражаючому зростанню викидів вуглецю, що прискорило зміну клімату до раніше нечуваних рівнів. Глобальні викиди CO₂, пов'язані з енергоємністю, зросли на 0,9% у 2022 році та досягли рекордного рівня приблизно в 36,8 мільярда метричних тонн у 2019 році, що є тривожним показником негативного впливу нашого енергоємного способу життя. Якщо ми продовжимо цим шляхом, це може призвести до незворотних екологічних катастроф, які поставлять під загрозу глобальні екосистеми, погодні умови та добробут людей. Тому впровадження принципів сталого розвитку є не лише необхідним, але й обов'язковим. Ми можемо створити більш сталий шлях для майбутніх поколінь, зосередившись на енергоефективності, впровадженні відновлюваних джерел енергії та скороченні викидів вуглецю. Це захистить крихкий баланс екосистеми нашої планети та зменшить наслідки кліматичної катастрофи, що насувається.

У рамках сталого розвитку енергоефективність є вирішальним елементом. Вона втілює тактичну стратегію виробництва аналогічної продукції з меншим споживанням енергії, що призводить до значних економічних вигод та очевидних екологічних переваг. Фундаментальний принцип енергоефективності, який стверджує, що невеликі витрати енергії призводять до сталого виробництва, набуває ще більшого значення, особливо враховуючи, що він бере на себе ініціативу у просуванні парадигми сталого розвитку в світі. Цей переважний акцент підкреслює важливість енергоефективності.

Ми забезпечуємо структуру для нашої стратегії, створюючи сталий та ефективний дизайн з оптимізацією енергії. Наша модель приймає похвальну

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мету зменшення вуглецевого сліду як симбіотичного супутника оптимізації енергії в міру її розвитку та змін. Ця співпраця є вирішальним кроком до мирнішого життя на нашій планеті, створюючи потужний фронт проти деградації навколишнього середовища та виснаження ресурсів.

Концепція сміливо входить у світ сталого розвитку, орієнтуючись на енергоефективність. Вона постає як рішення для підготовки до одночасної координації скорочення викидів вуглецю та оптимізації енергоспоживання. Наша методологія поєднує прагматичні економічні міркування з екологічно свідомими діями, ретельно враховуючи ці пов'язані аспекти. Окрім сприяння фінансовій економії, це зближення цілей сприяє ширшій меті захисту природних ресурсів нашої планети.

Обмеження та майбутня робота

У динамічному контексті може бути важко орієнтуватися в складнощах залежностей завдань, оскільки потрібні ефективні методи перевірки залежностей та вирішення без затримок. Крім того, важко розробити адаптивний планувальник, який оптимізує як ефективність, так і швидкість через складність планування діяльності, коли враховуються залежності, доступність ресурсів та пріоритезація. Для оцінки таких показників, як споживання енергії, вартість та продуктивність, необхідні прогнозні моделі, які забезпечують баланс між точністю та швидкістю реагування в режимі реального часу, оскільки вони додають ще один рівень складності. Може бути важко підтримувати систему моніторингу в режимі реального часу без шкоди для продуктивності, особливо в динамічних обставинах, коли постійний моніторинг може створювати навантаження на ресурси. Коли ресурсів недостатньо, проблема стає складнішою та вимагає ефективного балансування навантаження та динамічного масштабування для контролю змін робочих навантажень та покращення розподілу завдань. Необхідно знайти тонкий баланс між виконанням завдань та оптимізацією ресурсів, узгоджуючи пріоритет завдань з обмеженнями ресурсів, щоб уникнути недостатнього або надмірного використання ресурсів. Під час одночасного обчислення численних взаємопов'язаних показників, таких як енергія, вартість, викиди вуглецю та

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продуктивність, виникає обчислювальна складність, яка вимагає використання ефективних методологій. Остання проблема полягає у підтримці балансу між наданням даних у режимі реального часу та збереженням історичних даних. Це вимагає добре організованої та ефективної системи управління даними, яка забезпечить легкий доступ до даних у режимі реального часу, незважаючи на обсяг попередніх даних, які необхідно зберегти.

Для подолання цих перешкод необхідна реалізація багатьох стратегічних ініціатив. По-перше, потрібна розробка ретельного графа залежностей, який динамічно оновлюється в міру завершення діяльності з ефективними перевірками залежностей. Неочікувані залежності обробляються за допомогою резервних механізмів та інших шляхів, а методи вирішення проблем постійно оновлюються та налаштовуються для забезпечення своєчасності. Використання евристичних методів необхідне для розробки інтелектуального планувальника завдань, враховуючи залежності, рівні пріоритетів та обмеження ресурсів. Динамічне планування забезпечує оптимальне використання ресурсів із постійним удосконаленням на основі зворотного зв'язку щодо продуктивності. Воно адаптується в режимі реального часу до змінних ситуацій.

Поєднання історичних даних з вхідними даними в режимі реального часу є важливим для прогнозного моделювання. Алгоритми, які можна вивчити онлайн, відомі як алгоритми машинного навчання, постійно оновлюються залежно від найновіших даних та відгуків користувачів про продуктивність для забезпечення точності. Щоб зменшити цей вплив та забезпечити своєчасне оновлення, використовується розподілена архітектура моніторингу зі стратегічно розміщеними агентами моніторингу. Для справедливого використання ресурсів важливі методи прогнозного динамічного масштабування та інтелектуальні алгоритми балансування навантаження, які можуть швидко та ефективно адаптуватися до змін робочих навантажень. Прогнозна аналітика оптимізує розподіл ресурсів, тоді як підходи до виконання, які динамічно адаптуються на основі доступності ресурсів, розумно пріоритезують завдання, враховуючи залежності та критичність. Використовуючи оптимальні методології для швидких і точних обчислень,

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

паралельні процеси обчислення розділяють складні обчислення на паралельні завдання. Проектування багаторівневої системи зберігання вирішує проблему зберігання даних, зберігаючи дані в режимі реального часу на високопродуктивних рівнях та архівуючи старі дані масштабованим способом, що забезпечує легкий доступ до даних та їх пошук. Існують ще цікаві області для подальших досліджень і розробок, спрямованих на збільшення внеску цієї моделі в дисципліни енергоефективності, зменшення вуглецевого сліду та збалансованого підвищення продуктивності. Наші майбутні зусилля, спрямовані на створення ґрунтовної та надійної системи, яка без зусиль гармонізує ці цілі, зосереджені на взаємодії цих фундаментальних елементів.

Цілісна інтеграція параметрів

Надалі наше дослідження зосередиться на розробці єдиної моделі, яка б комплексно інтегрувала енергоефективність, зменшення вуглецевого сліду та збалансоване підвищення продуктивності. Зрозуміло, що ці три фактори тісно пов'язані, і що покращення в одній області можуть впливати на інші. Ми хочемо розробити модель, яка не лише оптимізує використання енергії та усуває викиди вуглецю, але й робить це, зберігаючи або навіть покращуючи показники продуктивності системи. Для досягнення цієї мети ми розробили складні алгоритми та нові підходи. Щоб забезпечити одночасне досягнення цих трьох важливих цілей, цей проект вимагає глибокого занурення в динамічний розподіл ресурсів, прогнозний аналіз та інтелектуальні методи балансування навантаження.

Розробка передових алгоритмів

Створення складних алгоритмів відіграватиме життєво важливу роль в успіху нашої моделі в міру розвитку дослідження. Ретельна розробка алгоритмів, які автоматично реагують на зміни робочого навантаження та доступності ресурсів у режимі реального часу, динамічно оптимізують споживання енергії, зменшують викиди вуглецю та підвищують продуктивність системи, буде в центрі нашої майбутньої роботи. Ця складна алгоритмічна оркестрація забезпечить основу для моделі, яка не лише задовольняє вимоги сучасних обчислень, але й слугуватиме стандартом для майбутніх зусиль у сфері екологічно чистих та ефек-

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тивних технологій.

Впровадження в реальних умовах та практична перевірка

Перевірка та використання розробленої нами моделі в практичному контексті буде ключовим компонентом наших майбутніх зусиль. Співпраця з лідерами галузі та центрами обробки даних матиме вирішальне значення протягом цього етапу, надаючи глибоку інформацію про реальні проблеми та можливості, які може вирішити наша модель. Ретельне тестування надасть емпіричні докази ефективності нашої методології у виконанні обіцянок щодо економії енергії, зменшення вуглецевого сліду та покращення продуктивності як у контрольованих середовищах, так і в операційних центрах обробки даних. Ця процедура перевірки підвищить легітимність нашої роботи та відкриє шлях для ширшого впровадження в галузі, стимулюючи перехід до більш екологічної та сталої роботи центрів обробки даних.

Ми прагнемо створити міцну базу, яка започаткує нову еру екологічно - відповідальних обчислень, використовуючи передові інструменти, методи та визначаючи рекомендації як для технічного прогресу, так і для екологічної відповідальності.

У цій роботі запропоновано енергоефективну та вуглецево-зменшувальну системну модель, засновану на плануванні завдань. Основними цілями цього дослідження було досягнення енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду роботи центрів обробки даних. Завдяки вичерпному аналізу різних сценаріїв ми ефективно продемонстрували значний потенціал для підвищення енергоефективності з одночасним пом'якшенням впливу на навколишнє середовище. Зокрема, у моделі GEECO сценарій «Збалансованого підходу» являє собою гармонійну рівновагу між споживанням енергії, економічною ефективністю, продуктивністю та викидами вуглецю. Цей підхід забезпечує надійну основу для організацій, які прагнуть комплексної оптимізації.

Більше того, сценарії «Енергоефективний фокус» та «Вуглецево-нейтральна мета» глибше заглиблюються в енергоефективні практики, демонструючи здатність цієї моделі суттєво скоротити споживання енергії та викиди вуглецю.

					БР.ІП - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці висновки бездоганно узгоджуються з цілями сталого та екологічно свідомого управління центрами обробки даних, що робить нашу модель безцінним інструментом для організацій, які надають пріоритет сталому розвитку. Вона дає змогу менеджерам центрів обробки даних приймати обґрунтовані рішення, оптимізуючи не лише споживання енергії та витрати, але й значно зменшуючи свій вуглецевий слід.

Модель постійно контролює споживання енергії, щоб усунути неефективність, оцінює продуктивність для забезпечення оптимальної оперативності та включає оцінки витрат для прийняття економічно обґрунтованих рішень. Крім того, ретельне відстеження рівня викидів вуглецю відповідає нашій відданості екологічній свідомості, поєднуючи сталий розвиток з операційним успіхом. На завершення, наш підхід відповідає зростаючому попиту на підвищення енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду в інфраструктурі центрів обробки даних. Завдяки стратегічній інтеграції енергоефективних практик, прогнозних даних та динамічного розподілу ресурсів, наша концепція сповіщає про зміну парадигми в роботі центрів обробки даних.

3.4 Висновки по розділу

У третьому розділі було розглянуто проєктування, реалізацію та оцінювання моделі оптимізації програмного коду для зниження енергоспоживання. Проведено розробку архітектури та структури моделі оптимізації, орієнтованої на ефективне використання обчислювальних ресурсів дата-центрів. Досліджено методологію реалізації та алгоритми оптимізації енергоспоживання, що дозволяють зменшити навантаження на серверну інфраструктуру та скоротити вуглецевий слід. Також виконано оцінювання ефективності запропонованих рішень та проаналізовано результати їх застосування. Отримані результати підтверджують доцільність використання сучасних технік оптимізації програмного коду для підвищення енергоефективності дата-центрів і підтримки концепції зелених обчислень.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було досліджено техніки оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах та проаналізовано сучасні підходи до побудови енергоефективних програмних систем. Робота охопила вивчення теоретичних основ зелених обчислень, методів оптимізації програмного забезпечення, підходів до управління енергоспоживанням у хмарних дата-центрах, а також дослідження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. У процесі дослідження було визначено основні фактори, які впливають на енергоспоживання програмних систем, та встановлено важливість оптимізації програмного коду для підвищення ефективності використання серверних ресурсів.

На початковому етапі роботи було проведено аналіз предметної області та сучасних підходів до енергоефективного програмування. Розглянуто принципи функціонування дата-центрів, особливості використання хмарних обчислень і вплив програмного забезпечення на рівень енергоспоживання серверної інфраструктури. Особливу увагу приділено дослідженню сучасних підходів до оптимізації алгоритмів, управління пам'яттю, ефективного використання процесорних ресурсів та мінімізації надлишкових обчислень.

У процесі роботи було досліджено методи та інструменти зниження енергоспоживання у хмарних центрах обробки даних. Проведено аналіз технологій управління живленням серверів, динамічного розподілу ресурсів, балансування навантаження та віртуалізації. Також розглянуто можливості використання зелених інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення енергоефективності програмних систем. У роботі досліджено підходи до оптимізації програмного коду, які дозволяють зменшити навантаження на процесор, скоротити використання оперативної пам'яті та підвищити ефективність виконання програм у високонавантажених середовищах.

Важливим етапом дослідження стало вивчення архітектурних підходів до побудови моделей оптимізації програмного забезпечення та оцінювання їх

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективності. Було проаналізовано методології реалізації алгоритмів оптимізації енергоспоживання, підходи до моніторингу використання ресурсів та методи оцінювання вуглецевого сліду програмних систем. Особливу увагу приділено питанням масштабованості, продуктивності та сумісності програмних рішень із сучасними хмарними платформами та дата-центрами. Результати аналізу показали, що впровадження технік оптимізації програмного коду дозволяє суттєво знизити енергоспоживання обчислювальної інфраструктури та підвищити ефективність використання серверних ресурсів.

У результаті виконаної роботи встановлено, що техніки оптимізації програмного коду мають важливе значення для забезпечення сталого розвитку сучасних інформаційних систем і зниження негативного впливу дата-центрів на навколишнє середовище. Перевагами такого підходу є підвищення продуктивності програмного забезпечення, більш ефективне використання апаратних ресурсів та підтримка екологічно орієнтованих принципів розробки.

Подальший розвиток даного напрямку може бути пов'язаний із використанням технологій штучного інтелекту для автоматичного аналізу та оптимізації коду, інтеграцією систем моніторингу енергоспоживання та впровадженням інтелектуальних механізмів управління ресурсами у дата-центрах.

Отже, поставлена мета роботи була досягнута, а проведене дослідження підтвердило доцільність використання технік оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку енергоефективних програмних систем, удосконалення хмарної інфраструктури та впровадження екологічно орієнтованих технологій у сфері інформаційних технологій.

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. ACM Digital Library. (2025). Green Computing and Sustainable Software Engineering. dl.acm.org. <https://dl.acm.org/>

2. AMD Developer Guides for Power Optimization. (2024). amd.com. <https://www.amd.com/en/developer>

3. Andrae, A., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology. Challenges, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>

4. Azure Sustainable Software Engineering. (2025). learn.microsoft.com. <https://learn.microsoft.com/en-us/devops/plan/sustainable-software-engineering-overview>

5. Baliga, J., Ayre, R., Hinton, K., & Tucker, R. (2011). Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport. Proceedings of the IEEE, 99(1), 149–167. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060451>

6. Berkeley Lab. (2024). Energy Efficient Data Centers. lbl.gov. <https://eta.lbl.gov/topics/data-centers>

7. Clean Code Principles in .NET. (2023). devblogs.microsoft.com. <https://devblogs.microsoft.com/dotnet/clean-code-principles/>

8. Cloud Carbon Footprint Documentation. (2025). cloudcarbonfootprint.org. <https://www.cloudcarbonfootprint.org/>

9. Debnath, B., Bose, S., & Pal, A. (2024). Energy-aware optimization techniques for cloud data centers. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 42, 100987. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2024.100987>

10. Docker Documentation. (2025). docs.docker.com. <https://docs.docker.com/>

11. Energy Efficient Computing Working Group. (2024). ieee.org. <https://www.ieee.org/>

12. Fowler, M. (2002). Patterns of Enterprise Application Architecture. martinowler.com. <https://martinfowler.com/eaCatalog/>

13. Freeman, E., & Robson, E. (2021). Head First Design Patterns. oreilly.com. <https://www.oreilly.com/library/view/head-first-design/9781492077992/>
14. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1994). Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. pearson.com. <https://www.pearson.com/store/p/design-patterns-elements-of-reusable-object-oriented/P100000252058>
15. Google Cloud Sustainability. (2025). cloud.google.com. <https://cloud.google.com/sustainability>
16. Green Software Foundation. (2024). Software Carbon Intensity Specification. greensoftware.foundation. <https://greensoftware.foundation/projects/software-carbon-intensity-specification>
17. Green IT Best Practices. (2024). ibm.com. <https://www.ibm.com/topics/green-it>
18. Hellerstein, J., & Patterson, D. (2019). Serverless Computing: One Step Forward, Two Steps Back. arxiv.org. <https://arxiv.org/abs/1812.03651>
19. Humaira, F., & Khan, A. (2023). Energy-efficient scheduling in cloud data centers. IEEE Access, 11, 85421–85439. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3298754>
20. Intel Power Management Technologies. (2024). intel.com. <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/topic-technology/power-management/overview.html>
21. ISO/IEC 30134 Series for Data Centres. (2024). iso.org. <https://www.iso.org/standard/68031.html>
22. Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. Nature, 561, 163–166. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>
23. Kubernetes Documentation. (2025). kubernetes.io. <https://kubernetes.io/docs/>
24. Kumar, S., & Sharma, R. (2023). Resource optimization techniques for sustainable cloud computing. Journal of Cloud Computing, 12(1), 44–61. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00421-8>

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ІІЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Martin, R. C. (2017). Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design. pearson.com. <https://www.pearson.com/store/p/clean-architecture-a-craftmans-guide-to-software-structure-and-design/P100001465201>
26. Microsoft Azure Documentation. (2025). learn.microsoft.com. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/>
27. MongoDB Performance Best Practices. (2025). mongodb.com. <https://www.mongodb.com/resources/products/capabilities/performance-best-practices>
28. .NET Performance Best Practices. (2025). learn.microsoft.com. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/core/performance/>
29. OpenTelemetry Documentation. (2025). opentelemetry.io. <https://opentelemetry.io/docs/>
30. OWASP Top Ten Security Risks. (2024). owasp.org. <https://owasp.org/www-project-top-ten/>
31. Patterson, M. (2008). The Effect of Data Center Temperature on Energy Efficiency. ASHRAE Journal, 50(1), 62–66. <https://www.techstreet.com/ashrae/standards/the-effect-of-data-center-temperature-on-energy-efficiency>
32. PowerAPI Documentation. (2025). powerapi.org. <https://powerapi.org/>
33. Rodriguez, M., & Perez, J. (2024). Sustainable software optimization in distributed systems. Future Generation Computer Systems, 156, 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.01.018>
34. Schneider Electric. (2024). EcoStruxure Data Center Solutions. se.com. <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/for-business/data-centers-and-networks/>
35. Sustainable Computing: Informatics and Systems Journal. (2025). sciencedirect.com. <https://www.sciencedirect.com/journal/sustainable-computing-informatics-and-systems>
36. The Green Grid. (2024). Data Center Energy Efficiency Metrics. thegreengrid.org. <https://www.thegreengrid.org/>

					БР.ІІІ - 91.00.00.000 ІІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

37. Wang, L., & Zhang, Y. (2025). Energy-aware code optimization for cloud-native applications. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 34(2), 1–26. <https://doi.org/10.1145/3702145>
38. Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G. (2014). Assessing the environmental impact of data centres. *Building and Environment*, 82, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.017>
39. Xu, H., & Fortes, J. (2010). Multi-objective virtual machine placement in virtualized data center environments. *IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications*, 179–188. <https://doi.org/10.1109/GreenCom-CPSCoM.2010.137>
40. Zhang, Q., Cheng, L., & Boutaba, R. (2010). Cloud Computing: State-of-the-art and Research Challenges. *Journal of Internet Services and Applications*, 1(1), 7–18. <https://doi.org/10.1007/s13174-010-0007-6>

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: " Техніки оптимізації програмного коду для зниження вуглецевого сліду в дата-центрах"

Обсяг пояснювальної записки: 74 аркушів

Дата закінчення бакалаврської роботи 10 червня 2026р.

Підпис студента _____