

Технічні науки

УДК 354:328.185

Кучер Денис Андрійович

*студент ОР Магістр кафедри комп'ютерної інженерії
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Київського національного університету імені Тараса Шевченка*

Kucher Denys

*Master's Degree at the Computer Engineering Department,
Faculty of Radio physics, Electronics and Computer Systems
Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0009-0007-9126-7323*

Слюсар Євген Андрійович

*кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем,
лауреат Премії Президента України для молодих вчених
Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

Sliusar Ievgen

*PhD in Engineering, Associate Professor of the
Computer Engineering Department,
Faculty of Radio physics, Electronics and Computer Systems,
Laureat of the President's Award for Young Scientists
Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-0002-1905-3810*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ВІРТУАЛІЗАЦІЇ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ОБЧИСЛЕНЬ НА
РОБОЧИХ ВУЗЛАХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КЛАСТЕРІВ**

RESEARCH ON THE IMPACT OF THE APPLICATION OF VIRTUALIZATION TECHNOLOGIES ON THE PRODUCTIVITY OF COMPUTATIONS ON WORKER NODES OF COMPUTING CLUSTERS

Анотація. У роботі представлено комплексне дослідження впливу технологій віртуалізації, контейнеризації та оркестрації на продуктивність обчислень на робочих вузлах обчислювальних кластерів. В умовах зростаючих потреб у високопродуктивних обчисленнях для наукових та бізнес-застосувань актуальним залишається питання оптимального вибору інфраструктурних технологій, які забезпечують балансу між гнучкістю управління ресурсами та збереженням максимальної обчислювальної потужності. Дослідження зосереджується на порівняльному аналізі чотирьох популярних відкритих рішень: OpenStack як представника технологій повної віртуалізації, Nomad як представника контейнерних технологій, OpenNebula як альтернативного рішення віртуалізації та OpenShift як платформи оркестрації контейнерів на базі Kubernetes. Розглядається їхній вплив на продуктивність у порівнянні з базовою конфігурацією без віртуалізації (Baremetal) з метою визначення кількісних показників зниження продуктивності для кожної з технологій. Методологічною основою дослідження є розроблений автором комплексний підхід до тестування, що включає оцінку ключових аспектів продуктивності обчислювальних систем. Для оцінки обчислювальної потужності використовуються спеціалізовані бенчмарки HEPscore та Linpack HPL, які є визнаними стандартами в галузі високопродуктивних обчислень. Для забезпечення достовірності результатів усі тести виконуються на ідентичному апаратному забезпеченні з однаковою операційною системою. Особлива увага в роботі приділяється аналізу результатів з точки зору

практичного застосування досліджуваних технологій у різних сценаріях використання. На основі отриманих даних формуються рекомендації щодо вибору оптимальних технологій для різних типів високопродуктивних обчислювальних кластерів залежно від їхніх специфічних вимог та пріоритетів. Дослідження має значну практичну цінність для наукових установ та комерційних організацій, які планують розгортання власних хмарних інфраструктур для високопродуктивних обчислень, допомагаючи їм приймати обґрунтовані рішення щодо вибору технологій з урахуванням компромісів між гнучкістю управління ресурсами та максимальною обчислювальною продуктивністю.

Ключові слова: високопродуктивні обчислення, віртуалізація, контейнеризація, оркестрація, обчислювальні кластери, OpenStack, Nomad, OpenNebula, OpenShift, HEPscore, Linpack, FIO, Iperf3, порівняльний аналіз, продуктивність обчислень, дискова підсистема, мережеві характеристики, приватні хмарні інфраструктури.

Summary. The paper presents comprehensive research on the impact of virtualization, containerization, and orchestration technologies on computing performance on workstations of computing clusters. In the context of growing needs for high-performance computing for scientific and business applications, the issue of optimal choice of infrastructure technologies that provide a balance between resource management flexibility and maintaining maximum computing power remains relevant. The research focuses on a comparative analysis of four popular open solutions: OpenStack as a representative of full virtualization technologies, Nomad as a representative of container technologies, OpenNebula as an alternative virtualization solution, and OpenShift as a container orchestration platform based on Kubernetes. Their impact on performance is considered in comparison with the basic configuration without virtualization (Baremetal) to determine quantitative indicators of performance

reduction for each of the technologies. The methodological basis of the study is a comprehensive testing approach developed by the author, which includes an assessment of key aspects of computing system performance. To assess computing power, specialized benchmarks HEPscore and Linpack HPL are used, which are recognized standards in the field of high-performance computing. To ensure the reliability of the results, all tests are performed on identical hardware with the same operating system. Particular attention is paid to the analysis of the results from the point of view of the practical application of the technologies studied in various usage scenarios. Based on the data obtained, recommendations are formed on the selection of optimal technologies for different types of high-performance computing clusters, depending on their specific requirements and priorities. The study has significant practical value for scientific institutions and commercial organizations that plan to deploy their own cloud infrastructures for high-performance computing, helping them make informed decisions on the choice of technologies, considering the trade-offs between resource management flexibility and maximum computing performance.

Key words: *high-performance computing, virtualization, containerization, orchestration, computing clusters, OpenStack, Nomad, OpenNebula, OpenShift, HEPscore, Linpack, FIO, Iperf3, comparative analysis, computing performance, disk subsystem, network characteristics, private cloud infrastructures.*

Постановка проблеми. В умовах сучасних обчислювальних потреб науки та бізнесу вибір кращої інфраструктури для високопродуктивних обчислень стає критичним фактором забезпечення швидкості та ефективності досліджень та операційної діяльності. Хмарні технології, віртуалізація та контейнеризація пропонують різноманітні можливості для організації обчислювальних середовищ, проте їхній вплив на

продуктивність залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі.

Зростання потреб у високопродуктивних обчисленнях вимагає переведення комп’ютерних систем на управління ресурсами через платформи оркестрації контейнеризації та віртуалізації. Попри активне використання технологій OpenStack, OpenShift, Nomad і OpenNebula у хмарних середовищах, відсутні комплексні дослідження, які б порівнювали їх вплив на продуктивність та формували розуміння наближених показників зменшення продуктивності для кожної з цих систем.

Особливо важливим є питання визначення компромісів між гнучкістю інфраструктури та її впливу на обчислювальну потужність при використанні різних підходів до управління обчислювальними ресурсами – від повної віртуалізації до контейнеризації. Такий аналіз дозволить науковцям та інженерам робити обґрунтований вибір інфраструктурних рішень, враховуючи їхні специфічні потреби та пріоритети у високопродуктивних обчисленнях.

Для вирішення цієї проблеми необхідно провести комплексне тестування ключових аспектів продуктивності системи при використанні різних технологій віртуалізації та контейнеризації. Це вимагає розробки методики порівняльного аналізу, що дозволить оцінити вплив хмарних платформ та застосувань на обчислювальну потужність, ефективність дискової підсистеми та мережеві характеристики кожного рішення для отримання повної картини їх впливу на роботу обчислювальної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливі аспекти роботи хмарних технологій та платформ віртуалізації детально розглядаються в документації провідних розробників таких рішень. Зокрема, основні принципи функціонування та розгортання OpenStack представлені на офіційному сайті проєкту [1] та у фундаментальній роботі Pepple K. [2],

яка залишається актуальним посібником з архітектури цієї платформи. Аналогічно, документація HashiCorp [3] детально висвітлює особливості налаштування та використання Nomad як технології оркестрації контейнерів. Функціональні можливості OpenNebula як інструменту управління хмарною інфраструктурою докладно описані на офіційному ресурсі [4], а документація Red Hat Developers [5] представляє повний огляд архітектурних особливостей OpenShift та її переваг у порівнянні з базовими рішеннями Kubernetes. Проте в цих джерелах недостатньо висвітлені питання кількісного впливу даних технологій на продуктивність обчислювальних систем. У контексті оцінювання продуктивності високопродуктивних обчислювальних систем важливими є роботи Giordano D. та співавторів [6], які розробили і описали бенчмарк HEPsScore, спеціально призначений для оцінки обчислювальних систем, що використовуються у фізиці високих енергій. Для загальної оцінки обчислювальної потужності широко використовується Linpack HPL, детально описаний у роботі Petitet A. та співавторів [7], який став індустріальним стандартом для порівняння високопродуктивних систем. Методики вимірювання мережевої продуктивності в хмарних середовищах докладно висвітлені в дослідженні Phaneekham D., Zaber M. і Nair S. [8], де автори представляють PerfKit Benchmark як інструмент для комплексної оцінки мережевих характеристик. Для оцінки продуктивності операцій введення-виведення Korn D. G. і Vo K.-P. [9] пропонують методологію та інструментарій, який дозволяє вимірювати ефективність дискової підсистеми.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі хмарних технологій, віртуалізації та контейнеризації, комплексний порівняльний аналіз впливу різних технологій на продуктивність обчислювальних систем залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі. Відсутні системні дослідження, які б кількісно оцінювали вплив на

продуктивність використання різних технологій та формували рекомендації щодо їх ефективного застосування в контексті високопродуктивних обчислень.

Мета статті – дослідження впливу різних технологій та засобів віртуалізації на продуктивність роботи та оцінка застосовності згаданих технологій у високопродуктивних обчислювальних кластерах.

Виклад основного матеріалу. За результатами проведеного тестування кожної технології бенчмарками HEP-score в кількості 20 разів та Linpack HPL по 50 разів, було сформовано таблиці, наповнені значеннями отриманих характеристик кожного тесту. З даних результатів тестів було обчислено середні значення, що представлені надалі в роботі у вигляді порівняльних діаграм. У кожній діаграмі при порівнянні та аналізі даних виконуються проміжні висновки для загострення уваги читача на критично важливих аспектах дослідження.

Для забезпечення об'єктивності та всебічності оцінки впливу різних технологій віртуалізації на продуктивність обчислювальних систем було використано комплексний підхід до тестування:

Середовище тестування:

- Всі тести проводились на ідентичному апаратному забезпеченні
- Використовувалась операційна система Ubuntu LTS 24.04.02
- Конфігурація всіх платформ здійснювалась за рекомендованими параметрами виробників
- Для кожної технології було запущено по 2 контейнера або віртуальних середовища що працювали під час всіх тестів в залежності від можливостей технології для створення більш реальних умов використання

Система тестування та метрики обчислювальної продуктивності в даній роюоті представлені у вигляді тестів продуктивності та їх показників. HEP-score – галузевий стандарт для оцінки високоенергетичних фізичних обчислень. Linpack HPL – класичний

бенчмарк для оцінки FLOPS (операцій з плаваючою комою за секунду) що одночасно надає і час виконання і показники результатів тесту що є залежними один від одного.

Задля проведення аналізу даних відбувається створення за отриманими даними графіків-діаграм представлених у вигляді рисунків, що наявно демонструють різницю у впливі на продуктивність різних технологій.

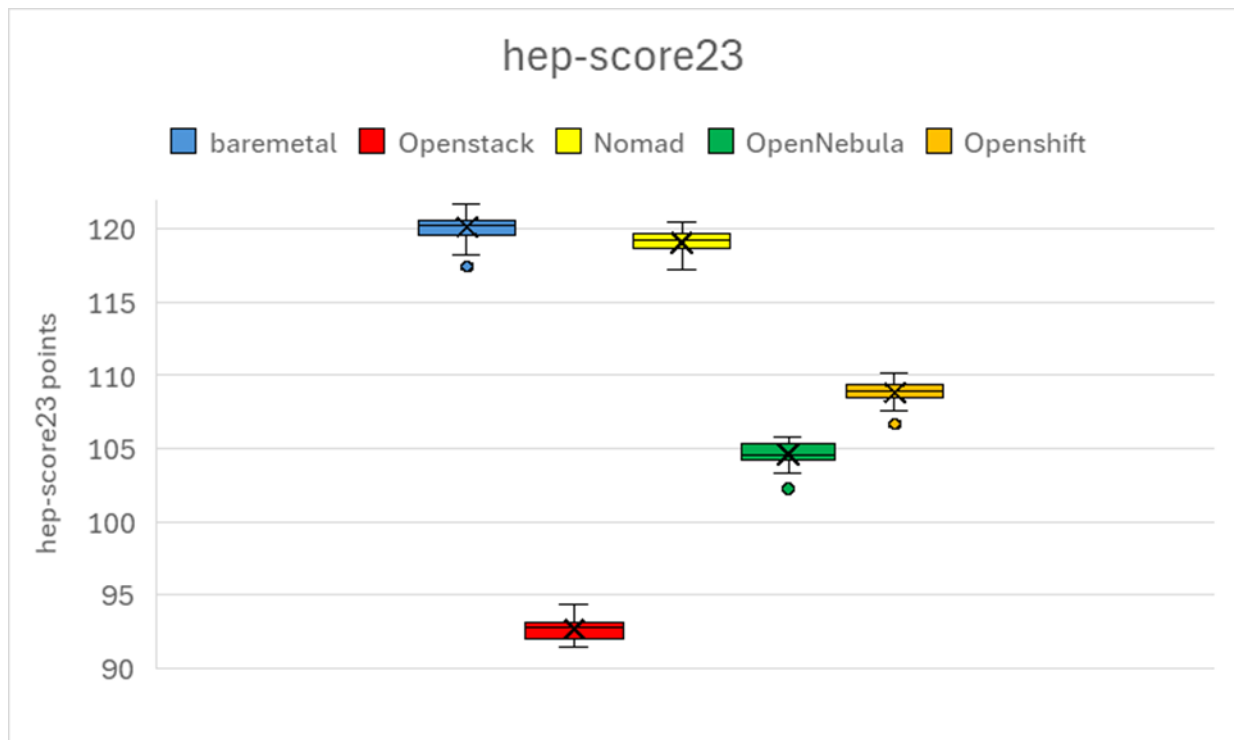


Рис. 1. Ілюстрація діаграми "ящик з вусами" порівняння показників отриманих в результаті роботи тесту Hep-score

Представлена діаграма "hep-score23" на Рис.1 ілюструє порівняльний аналіз обчислювальної продуктивності різних технологій віртуалізації та контейнеризації з використанням спеціалізованого бенчмарка NEPscore, який розроблений для оцінки високопродуктивних обчислень.

На діаграмі використано формат "box plot" (ящик з вусами), який показує:

- Медіанне значення (горизонтальна лінія всередині прямокутника)
- Міжквартильний розмах (висота прямокутника)
- Мінімальні та максимальні значення (вуса)
- Окремі викиди (точки поза вусами, якщо такі є)

Порівняння платформ:

Baremetal (синій) - ~120 - балів це базова конфігурація без віртуалізації, та контейнеризації яка слугує еталоном для порівняння. Дана технологія демонструє найвищу продуктивність серед усіх тестованих середовищ. Нативна система має невеликий розкид результатів, що свідчить про стабільність вимірювань.

Nomad (жовтий) - ~119 балів, показує результат у 99% від базової продуктивності (втрата всього 1%) Ця технологія має дуже подібний розкид значень до Baremetal чим підтверджує високу ефективність технології контейнеризації Nomad для вископродуктивних обчислювальних та кластерних систем.

Openshift (помаранчевий) - ~109 балів, демонструє продуктивність на рівні 91% від Baremetal та має дещо більший розкид значень порівняно з Baremetal і Nomad. Як платформа контейнеризації/оркестрації показує помірне зниження продуктивності.

OpenNebula (зелений) - ~105 балів - забезпечує 87% продуктивності від базової системи та має помітно більший розкид результатів, що свідчить про меншу стабільність роботи та вимірювань. Як технологія віртуалізації показує кращі результати, ніж Openstack.

Openstack (червоний) - ~93 бали, найнижча продуктивність серед усіх тестованих технологій 77% від Baremetal, тобто втрата продуктивності обчислень та робіт що залежать від роботи процесора становить близько 23%. Openstack демонструє стабільний розкид результатів, але з найнижчим середнім значенням.

Контейнерні технології (Nomad, Openshift) забезпечують суттєво вищу продуктивність порівняно з технологіями повної віртуалізації (OpenNebula, Openstack) для високопродуктивних обчислень.

Nomad як технологія показує особливо хороший результат порівняно з іншими платформами, який практично не має втрат продуктивності обчислень, що залежать від роботи процесора, порівняно з нативною системою, що робить його привабливим вибором для НРС-навантажень.

Діаграма чітко демонструє градацію зниження продуктивності від нативної системи через контейнерні рішення до рішень з повною віртуалізацією.

Для організацій, де критичним є збереження максимальної обчислювальної потужності, рекомендованими рішеннями будуть Baremetal або Nomad, тоді як інші технології варто розглядати лише у випадках, коли їхні додаткові функціональні можливості перекривають втрати в продуктивності.

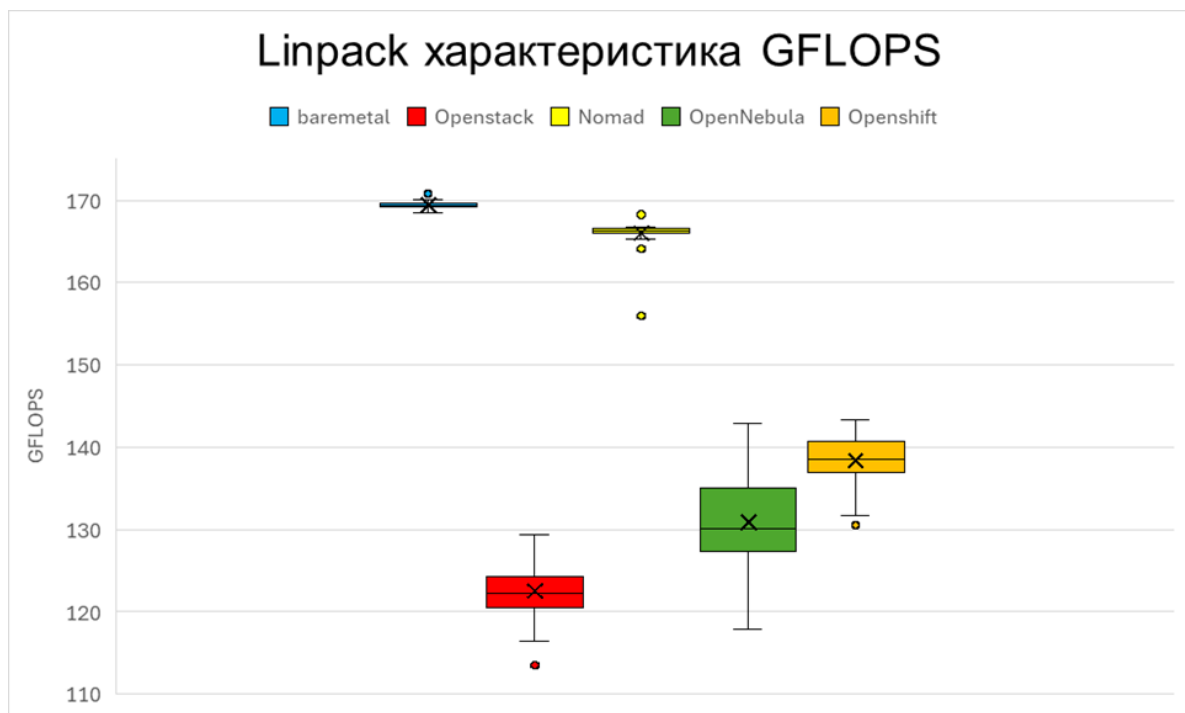


Рис. 2. Ілюстрація діаграми “ящик з вусами” порівняння показників GFLOPS отриманих в результаті роботи тесту LINPACK HPL

Представлена діаграма зображена на Рис.2 відображає результати тестування продуктивності різних технологій віртуалізації та контейнеризації за допомогою бенчмарка Linpack HPL, який вимірює обчислювальну потужність у GFLOPS (гігафлопс – мільярди операцій з плаваючою комою за секунду).

Baremetal (синій) - ~170 GFLOPS, базова або нативна система без віртуалізації демонструє найвищу продуктивність. Має дуже малий розкид результатів, що свідчить про стабільно високу продуктивність. Служить еталоном (100%) для порівняння з іншими технологіями

Nomad (жовтий) - ~166 GFLOPS, показує продуктивність на рівні 98% від базової системи, та має один викид зі зниженою продуктивністю близько 155 GFLOPS. В цілому демонструє мінімальні втрати продуктивності порівняно з нативною системою. Підтверджує високу ефективність контейнеризації Nomad для інтенсивних обчислень та результати аналізу і висновки з нього щодо Рис.1.

Openshift (помаранчевий) - ~138-140 GFLOPS. Забезпечує близько 82% продуктивності від Baremetal. Має помірний розкид результатів. Як платформа контейнеризації/оркестрації займає середню позицію за продуктивністю.

OpenNebula (зелений) - ~130-135 GFLOPS демонструє приблизно 77% продуктивності порівняно з базовою системою та має досить широкий розкид результатів вимірювань продуктивності (від ~118 до ~145 GFLOPS) Показує відносно високу варіативність продуктивності, що не можна віднести до хороших сторін даної технології.

Openstack (червоний) - ~122-123 GFLOPS має найнижчу продуктивність серед усіх тестованих технологій, показує лише 72% продуктивності від базової системи має один найнижчий викид близько 113 GFLOPS та загалом демонструє суттєві втрати продуктивності для

математично операцій пов'язаних з залученням обчислювальної потужності процесору та оперативної пам'яті.

Градація продуктивності:

Baremetal > Nomad > Openshift > OpenNebula > Openstack

Це підтверджує закономірність, що технології контейнеризації (Nomad, Openshift) забезпечують кращу продуктивність, ніж рішення з повною віртуалізацією (OpenNebula, Openstack)

Порівняння з HEP-score: результати Linpack підтверджують висновки, отримані при тестуванні HEP-score. В обох тестах Nomad показує мінімальне зниження продуктивності порівняно з нативною системою. Openstack стабільно демонструє найнижчу продуктивність в обох бенчмарках.

Особливості для математичних обчислень: Linpack тестує саме математично інтенсивні операції з плаваючою комою. Результати свідчать, що для високопродуктивних математичних обчислень віртуалізація має більш негативний вплив, ніж контейнеризація. Втрати продуктивності досягають 28% для Openstack, що може бути критичним для HPC-систем

Практичні рекомендації: для математично інтенсивних обчислень найкраще використовувати Baremetal або Nomad. Якщо потрібні додаткові можливості оркестрації, Openshift є розумним компромісом. Технології повної віртуалізації варто використовувати лише тоді, коли їхні переваги в потребах або управлінні інфраструктурою перекривають суттєві втрати в обчислювальній потужності

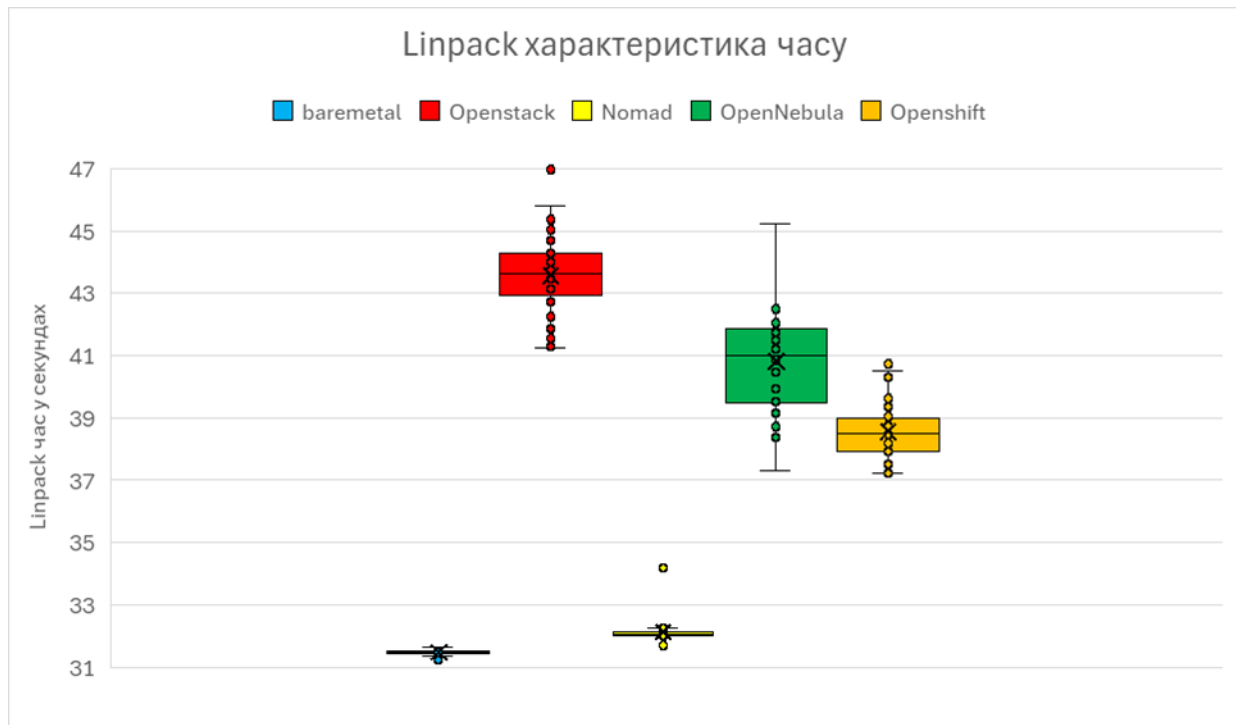


Рис. 3. Ілюстрація діаграми “ящик з вусами” порівняння показників часу отриманих в результаті роботи тесту LINPACK HPL

Представлена діаграма що на Рис. 3 показує результати вимірювання часу виконання тесту Linpack на різних платформах віртуалізації та контейнеризації. Оскільки йдеться про час виконання, менше значення є кращим або ж швидшим.

Baremetal (синій) - ~31.5 секунд. Базова або ж нативна система без віртуалізації демонструє найшвидше виконання та має мінімальний розкид результатів, що свідчить про стабільність продуктивності. Знову слугує еталоном (100%) для порівняння.

Nomad (жовтий) - ~32 секунди, показує час, дуже близький до базової системи ~98% продуктивності. Має один викид з погіршеною продуктивністю близько 34 секунд. Підтверджує мінімальні втрати швидкості при використанні контейнеризації Nomad.

Openshift (помаранчевий) - ~38-39 секунд, забезпечує близько 82% продуктивності від Baremetal. Має помірний розкид результатів явно

більший за попередні технології. Займає третє місце за швидкістю серед тестованих технологій.

OpenNebula (зелений) - ~40-41 секунда. Демонструє приблизно 77% продуктивності порівняно з базовою системою. Має ширший розкид результатів від ~37 до ~45 секунд. Це може вказувати на більше споживання ресурсів, або вплив на продуктивність роботи процесора та пам'яті безпосередньо. Показує помітне сповільнення порівняно з Baremetal і Nomad.

Openstack (червоний) - ~43-44 секунди. За результатами має найповільніше виконання серед усіх тестованих технологій. Забезпечує лише 72% продуктивності від базової системи. Має кілька викидів до 47 секунд та в цілому демонструє найбільше збільшення часу виконання серед усіх технологій.

Рекомендації щодо вибору технології. Тож хорошим найкраще в порівнянні впливу на продуктивність роботи комп'ютерної системи показала себе технологія Nomad. Вона забезпечує найкращий баланс між продуктивністю та функціональністю, демонструючи 98-99% продуктивності нативної системи. Ця технологія контейнеризації є найбільш ефективним рішенням для високопродуктивних обчислень, зберігаючи майже повну обчислювальну потужність базової системи з перевагами ізоляції та портативності середовищ.

Openshift пропонує збалансоване рішення для організацій, які потребують розширених можливостей оркестрації, забезпечуючи 82-91% базової продуктивності. Ця платформа добре підходить для корпоративних середовищ, які цінують DevOps-інтеграцію, автоматизоване масштабування та комплексний моніторинг поряд з достатньою обчислювальною потужністю. Openshift є досі хорошим вибором серед оглянутих технологій.

OpenNebula з продуктивністю 77-87% від базового рівня є прийнятним рішенням для організацій з різноманітною інфраструктурою. Ця технологія пропонує гнучку підтримку різних гіпервізорів і типів віртуалізації, що робить її відповідним вибором для середовищ, які потребують універсальності керування ресурсами більше, ніж максимальної продуктивності. OpenNebula має більший вплив на продуктивність роботи обчислювальної системи, тож є прийнятним вибором, якщо рішення про використання віртуалізації є усвідомленим або необхідним.

OpenStack демонструє найбільші втрати продуктивності (до 28%) і не рекомендується для високопродуктивних обчислювальних кластерів, якщо пріоритетом є обчислювальна потужність. Використання цієї технології виправдане лише за наявності попередніх значних інвестицій або коли уніфікація інфраструктури є важливішою за продуктивність.

Вибір технології має враховувати специфічні потреби конкретної організації, але загальна рекомендація полягає у використанні контейнерних технологій (Nomad, Openshift) замість повної віртуалізації для високопродуктивних обчислювальних середовищ

Висновки. На основі проведеного дослідження впливу різних технологій віртуалізації, контейнеризації та оркестрації на продуктивність обчислень у високопродуктивних кластерах можна зробити такі висновки:

Технології контейнеризації продемонстрували значно менші втрати продуктивності порівняно з технологіями повної віртуалізації. Зокрема, Nomad показав продуктивність, яка у більшості тестів майже не відрізнялася від нативної системи (baremetal), а в деяких випадках навіть перевершувала її.

Результати тестів HEPscore та Linpack підтвердили, що зниження продуктивності обчислювальної потужності становлять: для Nomad – лише 1-2%, для Openshift – 9-18%, для OpenNebula – 13-23%, для Openstack – 23-

28%. Це дозволяє рекомендувати Nomad як найкраще рішення для високопродуктивних обчислювальних задач.

Для різних типів НРС-навантажень можна рекомендувати: для чистих обчислень – baremetal, Nomad, OpenNebula або Openshift; для робочих навантажень з інтенсивним використанням дискової підсистеми – Nomad; для мережевих навантажень – будь-яку з тестованих технологій, окрім Openstack.

Вибір технології віртуалізації/контейнеризації повинен враховувати не лише продуктивність, але й функціональні вимоги: якщо пріоритетом є продуктивність – найкращим вибором буде Nomad; якщо важлива розширена функціональність оркестрації – Openshift; якщо потрібна підтримка різних гіпервізорів – OpenNebula.

Openstack показав найнижчу продуктивність у майже всіх тестах, тому його використання для високопродуктивних обчислень рекомендоване лише у випадках, коли управління інфраструктурою є пріоритетнішим за обчислювальну потужність.

Література

1. *OpenStack: офіційний сайт*. 2025. URL: <https://www.openstack.org/> (дата звернення: 15.04.2025).
2. Pepple K. *Deploying OpenStack*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2011.
3. Nomad Installation: документація. *HashiCorp*. 2025. URL: <https://developer.hashicorp.com/nomad/install> (дата звернення: 15.04.2025).
4. *OpenNebula: офіційний сайт*. 2025. URL: <https://opennebula.io/> (дата звернення: 15.04.2025).
5. OpenShift Overview: документація. *Red Hat Developers*. 2025. URL: <https://developers.redhat.com/products/openshift/overview#kubernetesclusterservices5937> (дата звернення: 15.04.2025).

6. Giordano D., Barbet J. -M., Boccali T., Borge G. M., Hollowell Ch., Innocente V., Lampl W., Michelotto M., Meinhard H., Ondris L., Sciabà A., Schnepf M. J., Sobie R. J., Southwick D., Sullivan T. S., Valassi A., Wenzel S., Willis J. L., Yan X. HEPsScore: Новий бенчмарк процесора для WLCG. EPJ Web of Conferences 295, 07024 (2024). URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2024/05/epjconf_chep2024_07024/epjconf_chep2024_07024.html (дата звернення: 15.04.2025).

7. Petitet A., Whaley R. C., Dongarra J., Cleary A. HPL – A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers. URL: <https://www.netlib.org/benchmark/hpl/> (дата звернення: 15.04.2025).

8. Phanekham D., Zaber M., Nair S. Measuring Cloud Network Performance with PerfKit Benchmark. URL: https://services.google.com/fh/files/misc/measuring_cloud_network_performance_with_perfkit_new.pdf (дата звернення: 15.04.2025).

9. Korn D. G. SFIO: Safe/Fast String/File IO / David G. Korn, Kiem-Phong Vo. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8014266693afda38a0a177a9b434fedce98eb7de> (дата звернення: 15.04.2025).

References

1. OpenStack. (2025). Retrieved from <https://www.openstack.org/>.
2. Pepple, K. (2011). Deploying OpenStack. Sebastopol: O'Reilly Media.
3. HashiCorp. (2025). Nomad Installation: dokumentatsiia [Nomad Installation: documentation]. developer.hashicorp.com. Retrieved from <https://developer.hashicorp.com/nomad/install>.
4. OpenNebula. (2025). opennebula.io. Retrieved from <https://opennebula.io/>.

5. Red Hat Developers. (2025). OpenShift Overview: dokumentatsiia [OpenShift Overview: documentation]. developers.redhat.com. Retrieved from <https://developers.redhat.com/products/openshift/overview#kubernetesclusterservices5937>.

6. Giordano, D., Barbet, J.-M., Boccali, T., Menéndez Borge, G., Hollowell, C., Innocente, V., Lampl, W., Michelotto, M., Meinhard, H., Ondris, L., Sciabà, A., Schnepf, M. J., Sobie, R. J., Southwick, D., Sullivan, T. S., Valassi, A., Wenzel, S., Willis, J. L., & Yan, X. (2024). HEPsScore: Novyi benchmark protsesora dlia WLCG [HEPsScore: A new CPU benchmark for the WLCG]. EPJ Web of Conferences, 295, 07024. Retrieved from https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2024/05/epjconf_chep2024_07024/epjconf_chep2024_07024.html.

7. Petitet, A., Whaley, R. C., Dongarra, J., & Cleary, A. (n.d.). HPL - A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers. netlib.org. Retrieved from <https://www.netlib.org/benchmark/hpl/>.

8. Phanekham, D., Zaber, M., & Nair, S. (n.d.). Measuring Cloud Network Performance with PerfKit Benchmark. services.google.com. Retrieved from https://services.google.com/fh/files/misc/measuring_cloud_network_performance_with_perfkit_new.pdf.

9. Korn, D. G., & Vo, K.-P. (n.d.). SFIO: Safe/Fast String/File IO. citeseerx.ist.psu.edu. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8014266693afda38a0a177a9b434fedce98eb7de>.