

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОДУКТИВНОСТІ КЛАСТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ RASPBERRY PI 3B+

Бабчук С. М. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

Гуменюк Т. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

Романів І. Т. – студент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Для вирішення багатьох наукових задач та для роботи з складними прикладними завданнями необхідні високопродуктивні обчислювальні системи. Раніше реальну паралельну обробку даних підтримували тільки суперкомп'ютери, доступ до яких є дуже обмеженим і ускладненим. В даний час одним із шляхів вирішення даної проблеми є побудова невеликих дешевих кластерів на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi.

Мета. Розробити комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи, який би міг належним чином охарактеризувати роботу такої системи та знайти залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при різних системах охолодження.

Метод. Запропоновано застосовувати при аналізі невеликих кластерних комп'ютерних систем комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи, який буде враховувати загальну продуктивність кластерної комп'ютерної системи, продуктивність одного обчислювального елемента в кластерній комп'ютерній системі, споживання електроенергії кластерною системою, споживання електроенергії з розрахунку на один обчислювальний елемент, собівартість обчислення 1 Гфлос кластерною комп'ютерною системою, загальну вартість кластерної комп'ютерної системи.

Результати. Розроблений комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи використано при створенні дослідної кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+. Також розроблено математичні моделі залежності продуктивності невеликої кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в залежності від кількості плат в ній при різних системах охолодження.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили доцільність використання розробленого комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи та дозволяють рекомендувати його до використання на практиці при створенні невеликих кластерних систем. Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні вагових коефіцієнтів складових елементів комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи, а також в експериментальному вивченні запропонованих вагових коефіцієнтів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кластер, кластерна система, Raspberry Pi 3B+, математична модель, продуктивність комп'ютерної системи, критерій ефективності.

АБРЕВІАТУРИ

USB – Universal Serial Bus;

ПК – персональний комп'ютер;

США – Сполучені Штати Америки.

НОМЕНКЛАТУРА

E_{x_1} – ефективність використання кластерної системи;

$F(t)$ – зовнішні впливи;

$f_1(t)$ – завдання яке виконується;

$f_2(t)$ – температура навколишнього середовища;

$f_3(t)$ – інші фактори навколишнього середовища;

Ke – комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи;

p – кількість процесорів в комп'ютерній системі;

S_{x_1} – прискорення кластерної системи;

T_1 – час виконання завдання скалярною ЕОМ;

T_{x_1} – час виконання завдання кластерною системою;

$X(t)$ – група параметрів, що діють на вході об'єкта;

$x_1(t)$ – кількість обчислювальних елементів в кластерній комп'ютерній системі;

$x_2(t)$ – тип обчислювального елемента;

$x_3(t)$ – тип системи охолодження;

$Y(t)$ – показники процесу обчислень;

$y_1(t)$ – загальна продуктивність кластерної комп'ютерної системи;

$y_2(t)$ – продуктивність одного обчислювального елемента (наприклад, плати Raspberry Pi 3B+) в кластерній комп'ютерній системі;

$y_3(t)$ – споживання електроенергії кластерною системою;

$y_4(t)$ – споживання електроенергії з розрахунку на один обчислювальний елемент (наприклад, плату Raspberry Pi 3B+);

$y_5(t)$ – собівартість обчислення 1 Гфлопс кластерною комп'ютерною системою;

$y_6(t)$ – загальна вартість кластерної комп'ютерної системи;

$\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4, \bar{y}_5, \bar{y}_6$ – усереднені значення результатів експериментальних досліджень по кожному з показників $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$.

ВСТУП

Для вирішення багатьох наукових задач та для роботи з складними прикладними завданнями необхідні сучасні високопродуктивні обчислювальні системи [1].

Науковці, програмісти і тим більше студенти рідкісно мають можливість працювати з високопродуктивними обчислювальними системами і запускати на них свої програми. Як правило, такі обчислювальні системи цілодобово вже зайняті іншими програмами від урядів та великих компаній і т.п. Дуже важко знайти можливість працювати з такими системами: потрібно наперед писати заяву і ставати в чергу на очікування доступу до роботи з високопродуктивною обчислювальною системою.

Для того, що б забезпечити максимально ефективне використання високопродуктивних потужних обчислювальних систем необхідна розробка програмного забезпечення, яке забезпечить максимальне розпаралелення виконання завдань. Для розробника такого програмного забезпечення дуже важливо перевірити чи буде створений програмний продукт належним чином працювати в реальному багатопроцесорному середовищі, чи ефективно будуть розпаралелюватись завдання.

Об'єктом дослідження є кластерні системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+.

Предметом дослідження є ефективність та продуктивність кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+.

Метою роботи є визначення критерію ефективності роботи кластерної системи та розробка математичних моделей залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при різних системах охолодження.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Кластерні системи, як правило, спрощено описують функцією:

$$y_1 = f(x_1).$$

Для аналізу кластерної системи в даний час використовують критерії ефективності та прискорення.

Прискорення, яке отримують при використанні кластерної системи з паралельним обчисленням для x_1 обчислювачів, в порівнянні з послідовним виконанням обчислень, визначають за формулою [2]:

$$S_{x_1} = \frac{T_1}{T_{x_1}}.$$

Ефективність використання кластерної системи, яка забезпечує паралельні обчислення при вирішенні задачі, визначається відношенням [2]:

$$E_{x_1} = \frac{S_{x_1}}{x_1}.$$

Проблема використання існуючого математичного апарату для опису кластерних систем, які забезпечують паралельні обчислення, полягає в тому, що підвищення прискорення, зазвичай, може бути забезпечено за рахунок збільшення числа обчислювачів, що призводить, як правило, до падіння ефективності. І, навпаки, підвищення ефективності досягається в багатьох випадках при зменшенні числа обчислювачів (в граничному випадку ідеальна ефективність при використанні одного обчислювача) [2].

В зв'язку з вищевказаним, актуальною проблемою є пошук такого критерію ефективності роботи кластерної системи, який би міг належним чином охарактеризувати роботу такої системи. Для цього необхідно визначити всі параметри, які діють на вході кластерної системи x_1, x_2, \dots, x_n , показники процесу обчислень y_1, y_2, \dots, y_n та математичні моделі, які описують їх взаємозв'язок, зокрема, залежність продуктивності кластерної системи від кількості обчислювачів в ній при різних системах охолодження.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В даний час різні високотехнологічні компанії світу проводять роботи в напрямку створення кластерів на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi.

На конференції Oracle OpenWorld 2019, яка відбулась у вересні 2019 року, компанія-організатор Oracle представила кластер, що складався з 1060 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+. Плати Raspberry Pi

3B+ були встановлені в стійку, в модулях 2U. У кожному модулі 2U було розміщено 21 одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3B+.

В електронному бюлетні «New Atlas» (USA), який приділяє особливу увагу новим технологіям і який має близько 280 000 підписників по всьому світу Paul Ridder вказав, що суперкомп'ютери, як правило, дуже великі і дуже дорогі, і вони споживають дуже багато електроенергії для живлення і охолодження. У Національній Лос-Аламоській лабораторії (США) експлуатується один із 10 найпотужніших суперкомп'ютерів у світі – Trinity. Шукаючи більш дешевий спосіб дозволити розробникам створювати та тестувати високопродуктивне програмне забезпечення для суперкомп'ютера Trinity, Національна лабораторія Лос-Аламоса звернулася до австралійської компанії BitScore з проханням розробити тестовий стенд на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi. В результаті було створено кластер з 1000 вузлів (одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3). Вартість такого міні-кластера складає до 150 тис. дол. США. Звичайно це значно менше чим коштує суперкомп'ютер Trinity, але все одно дуже дорого, і придбати такий кластер зможе досить невелика кількість дуже великих дослідних організацій.

Відомі також розробки кластерів на базі 64 та 128 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi: проект Iridis-Pi (університет Саутгемптона: 64 Raspberry Pi), проект resin.io (128 Raspberry Pi) [3–10].

Професор S. J. Cox (Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, UK), Simon J. Cox, James T. Cox, Richard P. Boardman, Steven J. Johnston, Mark Scott, Neil S. O'Brien в праці "Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster" вказали, що створення кластерних комп'ютерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi дозволяє одержати дешеву кластерну систему [3].

Таким чином, дешеві кластерні системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi є ідеальним ресурсом для тестування програмного забезпечення яке розробляється для суперкомп'ютерів.

Підсумовуючи вищевказане можна відмітити, що напрямок розробки кластерів на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi є актуальним напрямком розробки альтернативної технічної бази для розробки і тестування програм які в подальшому забезпечать паралельні розрахунки в тому числі на суперкомп'ютерах. Важливим напрямком розробки і дослідження таких систем є визначення конфігурації даних систем, яка забезпечить кращу продуктивність та відповідно кращу ефективність.

Предметом дослідження в теорії комп'ютерних систем є комп'ютерні системи в аспектах їх продуктивності, надійності і вартості [11].

Аналіз комп'ютерних систем – це визначення властивостей, які властиві системі чи класу систем. Типова задача аналізу – це оцінка продуктивності і на-

дійності систем із заданою конфігурацією, режимом функціонування і робочим навантаженням [11].

При експлуатації комп'ютерних систем виникає необхідність у підвищенні їх ефективності шляхом підбору конфігурації і режиму функціонування. У цих випадках варто оцінити можливий ефект, для чого необхідні моделі продуктивності системи. Побудова моделі системи на основі наявних даних про систему та експериментальних даних називається ідентифікацією системи [11]. Порядок ідентифікації комп'ютерної системи охарактеризовано в праці Ларіонова А. М., Майорова С. А., Новікова Г. І. «Вычислительные комплексы, системы и сети». Відповідно до природи досліджуваних явищ для їх представлення пропонується функціональна модель, що їх описує. Процес створення такої моделі називається функціональною ідентифікацією системи. Як функціональні моделі можуть використовуватися різні математичні системи – диференціальні й алгебраїчні рівняння, що адекватно представляють досліджувані аспекти [11].

Таким чином, розробка математичних моделей залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при різних системах охолодження є важливим кроком на шляху підвищення ефективності кластерних систем на базі Raspberry Pi 3B+ шляхом підбору конфігурації і режиму функціонування, який забезпечить більш продуктивну роботу кластерної системи.

Воеводін В.В. та Воеводін Вл.В. в своїй праці «Параллельные вычисления» вказують, що комп'ютери постійно вдосконалюються і їх головний вектор розвитку продуктивність, тобто можливість виконувати більшу кількість операцій за одиницю часу [12]. Також в даній праці авторами відмічено, що ефективність роботи комп'ютерної системи це відношення реальної продуктивності до пікової продуктивності [12]. Воеводін В. В. та Воеводін Вл. В. в указаній праці також вказують що потрібно оцінювати ефективність роботи програмно-апаратного середовища на фіксованому наборі тестових програм (benchmark), який був сформований на основі різних критеріїв [12]. Враховуючи останнє твердження було прийнято рішення досліджувати створену кластерну систему на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ під час виконання тесту «High performance challenge benchmark», який використовується для тестування суперкомп'ютерів.

Гергель В. П. в праці «Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем» в якості критеріїв роботи кластерних систем використовує прискорення та ефективність [2]. Автор також вказує, що спроби підвищення якості паралельних обчислень по одному з даних показників (прискоренню або ефективності) може привести до погіршення ситуації за іншим показником, адже дані показники якості паралельних обчислень є суперечливими. Як результат, розробка методів паралельних обчислень часто передбачає вибір деякого

компромiсного варіанту з урахуванням бажаних показників прискорення і ефективності. Крім того, Гергель В.П. вказує, що при виборі належного паралельного способу вирішення завдання може виявитися корисною оцінка вартості обчислень, яка визначається як добуток часу паралельного рішення задачі і числа використовуваних процесорів [2].

Останнім часом замовники комп'ютерних систем як універсальних так і високопродуктивних ставлять перед розробниками вимоги, що б вони мали певні технічні характеристики та відповідали певним економічним вимогам. Як приклад можна навести замовлення Національною Лос-Аламоською лабораторією (США) в австралійській компанії BitScore розробки тестового стенду на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi. Тому актуальною науковою задачею є розробка комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи, який буде враховувати всі аспекти, які важливі для замовників і користувачів комп'ютерних систем.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Як правило, при аналізі кластерних комп'ютерних систем, як критерій ефективності їх роботи використовують продуктивність їх роботи та інколи прискорення. Звичайно, продуктивність і прикорення кластерної комп'ютерної системи є одними з важливих показників, які її характеризують. Проте, ефективність кластерної комп'ютерної системи характеризують і інші показники.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для аналізу і характеристики невеликих кластерних комп'ютерних систем краще застосовувати комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи, який буде враховувати загальну продуктивність кластерної комп'ютерної системи, продуктивність одного обчислювального елемента в кластерній комп'ютерній системі, споживання електроенергії кластерною системою, споживання електроенергії з розрахунку на один обчислювальний елемент, собівартість обчислення 1 Гфлопс кластерною комп'ютерною системою, загальну вартість кластерної комп'ютерної системи.

Можна виділити три групи параметрів, які характеризують процес роботи кластерної комп'ютерної системи.

До першої групи параметрів $X(t)$, що діють на вході об'єкта, можна віднести кількість обчислювальних елементів в кластерній комп'ютерній системі $x_1(t)$, тип обчислювального елемента $x_2(t)$ (технічні характеристики обчислювальних елементів впливають на показники роботи кластерної системи в цілому), тип системи охолодження $x_3(t)$. В подальшому, параметри $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ будемо вважати компонентами вектора вхідних керуючих впливів:

$$X(t) = X[x_1(t), x_2(t), x_3(t)]. \quad (1)$$

Другу групу складають зовнішні впливи $F(t)$: задання яке виконується $f_1(t)$, температура навколишнього середовища $f_2(t)$ та інші фактори навколишнього середовища $f_3(t)$:

$$F(t) = F[f_1(t), f_2(t), f_3(t)]. \quad (2)$$

До третьої групи відносяться показники процесу обчислень $Y(t)$: загальну продуктивність кластерної комп'ютерної системи $y_1(t)$, продуктивність одного обчислювального елемента (наприклад, плати Raspberry Pi 3B+) в кластерній комп'ютерній системі $y_2(t)$, споживання електроенергії кластерною системою $y_3(t)$, споживання електроенергії з розрахунку на один обчислювальний елемент (наприклад, плату Raspberry Pi 3B+) $y_4(t)$, собівартість обчислення 1 Гфлопс кластерною комп'ютерною системою $y_5(t)$, загальну вартість кластерної комп'ютерної системи $y_6(t)$:

$$Y(t) = Y[y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t), y_5(t), y_6(t)]. \quad (3)$$

Зважаючи на вищесказане, гіпотетичну модель процесу обчислень можна подати у вигляді:

$$Y(t) = Y[X(t), F(t)]. \quad (4)$$

Вищевказані показники процесу обчислень більш повно характеризують результати роботи кластерної комп'ютерної системи чим просто продуктивність її роботи, а комплексний критерій ефективності роботи кластерної системи, який буде їх враховувати, має вигляд:

$$Ke = Y[\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4, \bar{y}_5, \bar{y}_6]. \quad (5)$$

Використання комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи при дослідженні такої системи дозволить отримати більш об'єктивну інформацію про об'єкт дослідження.

Оскільки загальна продуктивність кластерної комп'ютерної системи є важливим елементом комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи, в даній роботі було досліджено даний показник та розроблено математичні моделі залежності продуктивності невеликої кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в залежності від кількості плат в ній при різних системах охолодження.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для виконання досліджень роботи кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ була створена система зображена на рисунку 1.

Створена для досліджень кластерна система на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ складається з:

– 4-х одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ ;

– гігабітного некерованого комутатора D-Link DGS-1005A ;

- блоку живлення 60 W;
- кулера DeepCool XFAN 120 L/W .

Основні характеристики одноплатних комп'ютерів Raspberry pi 3B+ , на базі яких побудовано кластер:

- процесор Cortex-A53 з частотою 1,4 GHz;
- оперативна пам'ять 1 Гбайт LPDDR2;
- Gigabit Ethernet.

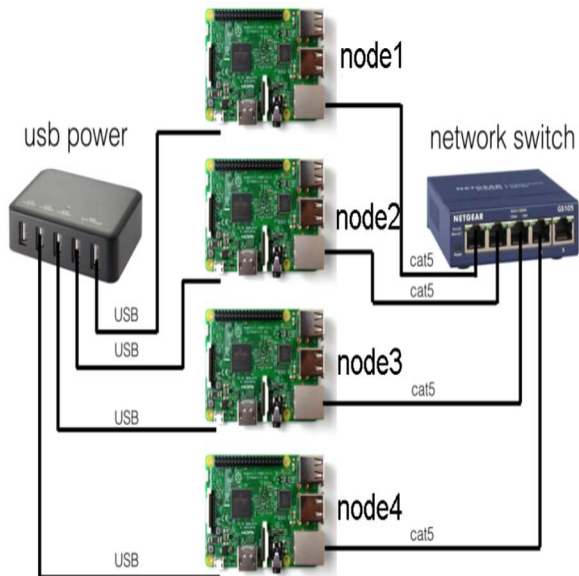


Рисунок 1 – Кластерна система на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+

Живлення одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластері здійснюється через USB-hub, який підключений до мережі електроживлення через блок живлення.

Одноплатні комп'ютери Raspberry Pi 3B+, з встановленою операційною системою Raspbian Stretch, об'єднані в кластер за допомогою гігабітного некерованого комутатора D-Link DGS-1005A. Вартість створеного кластера (чотири одноплатних комп'ютери Raspberry Pi 3B+, комутатор, блок живлення, кулер, проводи) становить до 155 дол. США.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

З метою досягнення поставленої мети було проведено експерименти з визначення продуктивності кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних кількостях плат Raspberry Pi а також при різних системах охолодження по 49 експериментів для кожної конфігурації. Тестування продуктивності розробленої кластерної системи проводилось за допомогою тесту «High performance challenge benchmark» [13].

На рисунку 2 зображено графіки визначеної продуктивності створеної чотирьохплатної кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних типах охолодження плат (без охолодження, пасивне охолодження, активне охолодження за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W).

лодження, пасивне охолодження, активне охолодження за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W).



Рисунок 2 – Продуктивність кластера з чотирьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з різними системами охолодження

На рисунку 3 зображено графіки визначеної продуктивності створеної триплатної кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних типах охолодження плат (без охолодження, пасивне охолодження, активне охолодження за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W).

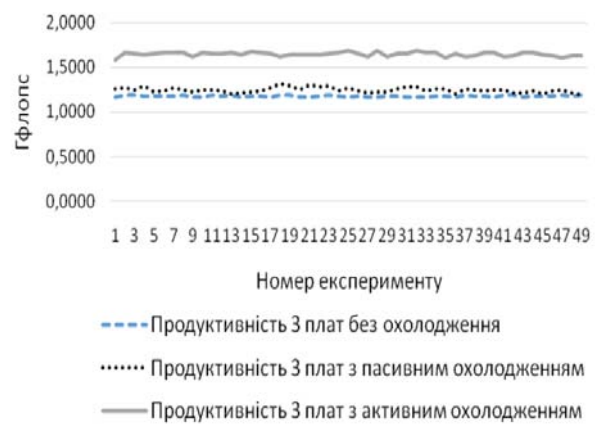


Рисунок 3 – Продуктивність кластера з трьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з різними системами охолодження

На рисунку 4 зображено графіки визначеної продуктивності створеної двоплатної кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних типах охолодження плат (без охолодження, пасивне охолодження, активне охолодження за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W).



Рисунок 4 – Продуктивність кластера з двох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з різними системами охолодження

На рисунку 5 зображено графіки визначеної продуктивності одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3B+ при різних типах охолодження плат (без охолодження, пасивне охолодження, активне охолодження за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W).

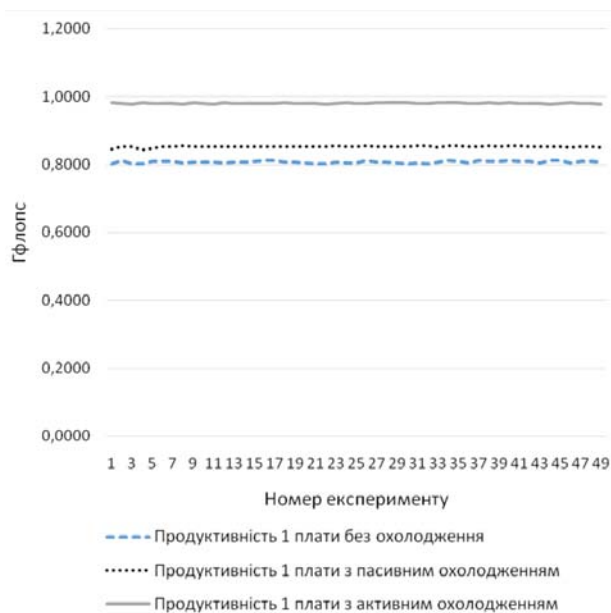


Рисунок 5 – Продуктивність одного одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3B+ з різними системами охолодження

Після проведення експериментів було здійснено опрацювання отриманих в них результатів. В таблиці 1 наведено середні значення продуктивності кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з різною кількістю плат та з різними системами охолодження.

Таблиця 1 – Середні значення продуктивності кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з різною кількістю плат та з різними системами охолодження

| Кількість плат Raspberry Pi 3B+ | Середні значення продуктивності (Гфлопс) при різних типах систем охолодження | | |
|---------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| | без охолодження | з пасивним охолодженням | з активним охолодженням |
| 1 | 0,807116 | 0,851778 | 0,980047 |
| 2 | 0,88222 | 0,898496 | 1,034144 |
| 3 | 1,179257 | 1,246531 | 1,647265 |
| 4 | 1,37011 | 1,394486 | 1,827639 |

Залежність середньої продуктивності кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості таких комп'ютерів в ній при різних системах охолодження показана на рисунку 6.

На рисунку 6 видно, що продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з пасивною системою охолодження дещо вища (від 2% до 6%) продуктивності такої ж кластерної системи, але без системи охолодження. Таким чином затрати на пасивну систему охолодження не дають значного приросту в продуктивності невеликої кластерної системи.

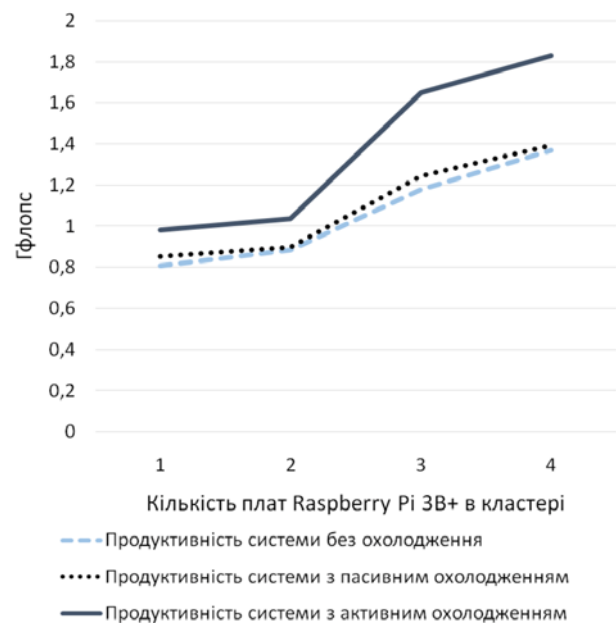


Рисунок 6 – Залежність середньої продуктивності кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості таких комп'ютерів в ній при різних системах охолодження

Продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з активною системою охолодження значно вища продуктивності таких самих кластерних систем без системи охолодження або з системою пасивного охолодження (від 15% до 40%). При чому особливо це перевищення відчутне при 3–4 платах (перевищення в продуктив-

ності від 31% до 40%, а при 2 платах перевищення в продуктивності від 15% до 21%). Таким чином, затрати на активну систему охолодження дають відчутний приріст продуктивності роботи невеликої кластерної системи.

Прискорення (speedup), що отримується при використанні паралельного алгоритму для p процесорів, в порівнянні з послідовним варіантом виконання обчислень визначається, як відношення часу рішення задачі скалярною ЕОМ до часу виконання паралельного алгоритму [2].

З метою визначення прискорення розробленої кластерної системи було проведено по 49 експериментів під час яких задача з знаходження кількості простих чисел в заданому діапазоні (10000) [14] вирішувалась на звичайному персональному комп'ютері з процесором AMD Ryzen 5 з частотою 3,6 ГГц (вартістю 360 дол. США) та на створеному кластері з чотирма одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi 3B+ (кожна плата з одним процесором Cortex-A53 з частотою 1,4 ГГц) з активним охолодженням (вартістю до 155 дол. США). Результати експериментів відображені на рис. 7.

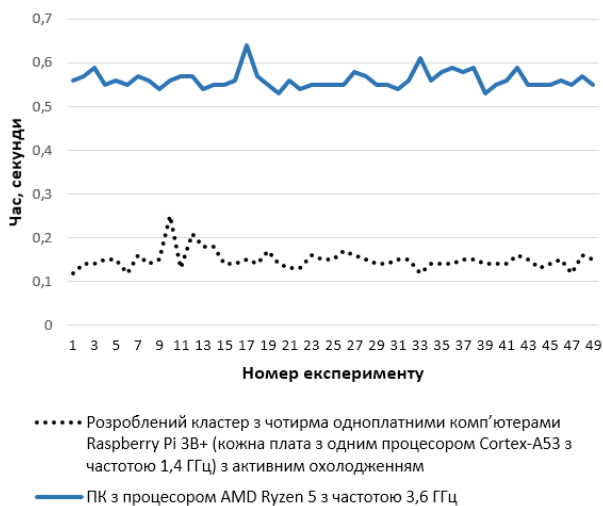


Рисунок 7 – Час виконання задачі з знаходження кількості простих чисел в заданому діапазоні (10000)

В результаті опрацювання експериментальних даних встановлено, що середній час рішення задачі з знаходження кількості простих чисел в заданому діапазоні (10000) [14] на звичайному персональному комп'ютері з процесором AMD Ryzen 5 з частотою 3,6 ГГц становить 0,56 секунди, а на створеному кластері з чотирма одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi 3B+ (кожна плата з одним процесором Cortex-A53 з частотою 1,4 ГГц) з активним охолодженням становить 0,15 секунди.

Прискорення розраховано у відповідності з працею Гергеля В. П. «Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем» становить 3,7. Крім того, розроблений кластер деше-

вший від звичайного персонального комп'ютера в 2,3 рази.

Ефективність розробленої кластерної системи з чотирма одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi 3B+ з активним охолодженням розрахована у відповідності з працею Гергеля В. П. «Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем» становить 0,925.

Вищевказані результати свідчать, що розроблений кластер ефективний в задачах, які можна розпаралелити і відповідно забезпечити паралельні обчислення.

Встановлена математична модель залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при відсутній системі охолодження має форму полінома третього порядку:

$$y_1 = -0,0547x_1^3 + 0,4391x_1^2 - 0,8593x_1 + 1,2821. \quad (6)$$

Графічне відображення розробленої математичної моделі залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при відсутній системі охолодження зображено на рисунку 8.

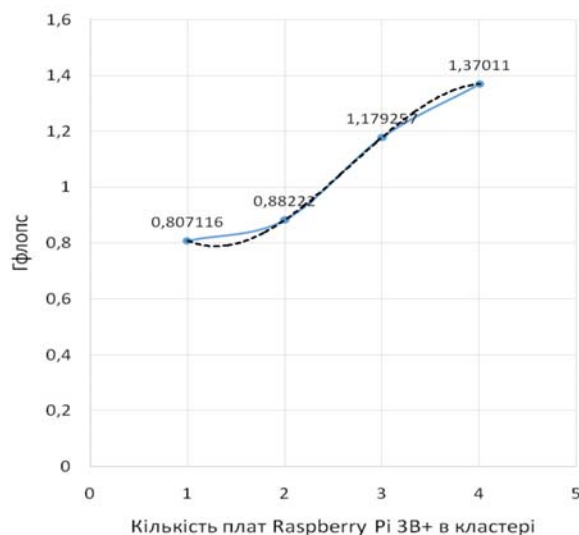


Рисунок 8 – Графічне відображення розробленої математичної моделі залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при відсутній системі охолодження

В таблиці 2 наведено результати аналізу середньої продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ з різною кількістю плат визначеної в результаті проведення експериментів, а також значення продуктивності кластерної системи в залежності від кількості плат в ній, яке знайдене за результатами обчислення при використанні розробленої математичної моделі (6).

Таблиця 2 – Порівняння значень продуктивності кластерної системи без системи охолодження отриманих під час експерименту та з використанням розробленої математичної моделі (1)

| Кількість плат Raspberry Pi 3B+ | Середнє значення продуктивності кластерної системи знайдене за результатами проведення експериментів, Гфлопс | Значення продуктивності кластерної системи знайдене з допомогою розробленої математичної моделі (1), Гфлопс | Похибка, Гфлопс | Похибка, % |
|---------------------------------|--|---|-----------------|------------|
| 1 | 0,807116 | 0,807200 | 0,000084 | 0,01 |
| 2 | 0,88222 | 0,882300 | 0,000080 | 0,01 |
| 3 | 1,179257 | 1,179200 | 0,000057 | 0,01 |
| 4 | 1,37011 | 1,369700 | 0,000410 | 0,03 |

Математична модель залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при пасивній системі охолодження має форму полінома третього порядку:

$$y_1 = -0,0836x_1^3 + 0,6521x_1^2 - 1,3245x_1 + 1,6078. \quad (7)$$

В таблиці 3 наведено результати аналізу середньої продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ з різною кількістю плат визначеної в результаті проведення експериментів, а також значення продуктивності кластерної системи в залежності від кількості плат в ній, яке знайдене за результатами обчислення при використанні розробленої математичної моделі (7).

Таблиця 3 – Порівняння значень продуктивності кластерної системи з пасивною системою охолодження отриманих під час експерименту та з використанням розробленої математичної моделі (7)

| Кількість плат Raspberry Pi 3B+ | Середнє значення продуктивності кластерної системи знайдене за результатами проведення експериментів, Гфлопс | Значення продуктивності кластерної системи знайдене з допомогою розробленої математичної моделі (2), Гфлопс | Похибка, Гфлопс | Похибка, % |
|---------------------------------|--|---|-----------------|------------|
| 1 | 0,851778 | 0,851800 | 0,000022 | 0,002 |
| 2 | 0,898496 | 0,898400 | 0,000096 | 0,01 |
| 3 | 1,246531 | 1,246000 | 0,000531 | 0,04 |
| 4 | 1,394486 | 1,393000 | 0,001486 | 0,11 |

Математична модель залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при активній системі охолодження має форму полінома третього порядку:

$$y_1 = -0,1653x_1^3 + 1,2713x_1^2 - 2,6027x_1 + 2,4767. \quad (8)$$

В таблиці 4 наведено результати аналізу середньої продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ з різною кількістю плат визначеної в результаті проведення експериментів, а також значення продуктивності кластерної системи в залежності від кількості плат в ній, яке знайдене за результатами обчислення при використанні розробленої математичної моделі (8).

Таблиця 4 – Порівняння значень продуктивності кластерної системи з активною системою охолодження отриманих під час експерименту та з використанням розробленої математичної моделі (8)

| Кількість плат Raspberry Pi 3B+ | Середнє значення продуктивності кластерної системи знайдене за результатами проведення експериментів, Гфлопс | Значення продуктивності кластерної системи знайдене з допомогою розробленої математичної моделі (3), Гфлопс | Похибка, Гфлопс | Похибка, % |
|---------------------------------|--|---|-----------------|------------|
| 1 | 0,980047 | 0,980000 | 0,000047 | 0,005 |
| 2 | 1,034144 | 1,034100 | 0,000044 | 0,004 |
| 3 | 1,647265 | 1,647200 | 0,000065 | 0,004 |
| 4 | 1,827639 | 1,827500 | 0,000139 | 0,007 |

З таблиць 2–4 видно, що значення продуктивності кластерної системи в залежності від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в них обчислені за допомогою розроблених моделей відрізняються від середніх значень продуктивності кластерної системи з відповідною системою охолодження, які були отримані експериментальним шляхом, максимум на 0,11%.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Для того, що б мінімізувати ймовірність прийняття рішень на базі недостовірних випадково-помилкових даних, було проведено велику кількість однотипних дослідів (по 49 однотипних дослідів при однаковій кількості плат в кластері і при тій самій системі охолодження). Аналіз значень всіх дослідів (рис. 2 – рис. 5) свідчить, що значних «викидів» результатів не має. Для подальших теоретичних досліджень для кожного варіанту роботи кластерної системи за кількістю плат та типом охолодження в подальшому використовувалось усереднені значення показника продуктивності кластерної системи при даній кількості плат та даному типі системи охолодження. Вищевказане мало забезпечити максимально ймовірно дійсну інформаційну базу про реальну продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+.

З результатів досліджень (Рис. 6, Рис. 8) видно, що з моменту додавання четвертої плати продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3 B+ починає падати. Таким чином можна стверджувати, що для такої кластерної системи оптимальним за показником продуктивність/кількість плат є кількість плат – 4. Цю кількість різними чином, як

актуальну для кластерних систем такого типу як досліджувався відзначають і інші дослідники [1, 3–10].

Відмінністю, отриманих під час досліджень результатів, є те, що зміна продуктивності кластерної системи від кількості вузлів для створеного нами кластеру на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ має форму полінома третього порядку, а не прямої лінійної, як зазначено в [10]. Ймовірно, на результати досліджень і на модель [10] могло вплинути використання іншого мережевого обладнання для об'єднання в кластер одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ (для дротового зв'язку використовувався мережевий комутатор HPE OfficeConnect 1920S Series Switch JL385A, а для бездротової мережі Wi-Fi використовувався маршрутизатор Keenetic Giga KN-1010). Крім того, в даному дослідженні не вказано скільки проводилось експериментів при різних кількостях плат в кластері (можливо кількість таких експериментів була невеликою, і випадкові «викиди», які можуть мати місце при проведенні експериментів могли негативно вплинути на отримані ними результати, а згодом і на розроблену модель.

В праці [10] дослідники використовують активну вентиляцію елементів кластерів, деякі дослідники створювали кластери без систем охолодження [3], але в процесі аналізу літературних джерел не виявлено досліджень про вплив системи охолодження на продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+. Проведені в цій роботі дослідження були також направлені на виявлення впливу типу системи охолодження на продуктивність кластерної системи.

ВИСНОВКИ

Дане дослідження сприятиме більш ефективному створенню кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у визначенні комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи та в розробці математичних моделей залежності продуктивності кластерної системи на базі Raspberry Pi 3B+ від кількості плат в ній при різних системах охолодження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні структури кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+, яка дозволить отримати таку систему з кращим показником продуктивності / кількості плат. Результати досліджень показали, що це має бути кластерна система з чотирма одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi 3B+ з активним охолодженням. Відповідні рекомендації базуються на результатах експериментів та їх аналізі. Продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з пасивною системою охолодження дещо вища (від 2% до 6%) продуктивності такої ж кластерної системи, але без системи охолодження. Таким чином, затрати на пасивну систему охолодження не дають значного приросту в продуктивності невеликої

кластерної системи. Продуктивність кластерної системи на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ з активною системою охолодження значно вища продуктивності таких самих кластерних систем без системи охолодження або з системою пасивного охолодження (від 15% до 40%). Особливо це перевищення відчутне при 3–4 платах (перевищення в продуктивності від 31% до 40%, а при 2 платах перевищення в продуктивності від 15% до 21%). Таким чином, затрати на активну систему охолодження дають відчутний приріст продуктивності роботи невеликої кластерної системи

Ефективність і прискорення розробленої кластерної системи з чотирма одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi 3B+ з активним охолодженням розраховані у відповідності з працею Гергеля В. П. «Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем» становлять відповідно 0,925 і 3,7. Крім того, розроблений кластер дешевший від звичайного персонального комп'ютера в більш як два рази.

Вищевказані результати свідчать, що розроблений кластер ефективний в задачах, які можна розпаралелити і відповідно забезпечити паралельні обчислення.

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні вагових коефіцієнтів складових елементів комплексного критерію ефективності роботи кластерної системи.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Study of Raspberry Pi 2 Quad-core Cortex-A7 CPU Cluster as a Mini Supercomputer / [A. Mappuji, N. Effendy, M. Mustaghfirin et al.] // Empowering Technology for Better Future : Eight international conference, Eastparc, 5–6 October 2016 : proceedings. – Yogyakarta: ICITEE, 2016. – P. 161. DOI: 10.1109/ICITEE.2016.7863250
2. Гергель В. П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем: учебное пособие / В. П. Гергель. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2010. – 420 с. ISBN 5-85746-602-4
3. Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster / [S. Cox, J. Cox, R. Boardman et al.] // Cluster Computing. – 2013. – Vol. 17, № 2. – P. 349–358. DOI: 10.1007/s10586-013-0282-7
4. Cloutier M. Design and Analysis of a 32-bit Embedded High-Performance Cluster Optimized for Energy and Performance / M. Cloutier, C. Paradis, V. Weaver // Hardware-Software Co-Design for High Performance Computing, 17 November 2014 : proceedings. – New Orleans : Co-HPC, 2014. – P. 1–8. DOI: 10.1109/Co-HPC.2014.7
5. Pajankar A. Raspberry Pi Supercomputing and Scientific Programming / A. Pajankar. – Apress, 2017. – 198 p. ISBN: 978-1-4842-2877-7, DOI: 10.1007/978-1-4842-2878-4
6. Performance analysis of single board computer clusters / [P. Basford, S. Ossont, C. Perkins et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2019. – № 14. – P. 102. DOI: 10.1016/j.future.2019.07.040
7. Single-Board-Computer Clusters for Cloudlet Computing in Internet of Things / [D. Cerero, U. Sevilla, J. Fernández-Rodríguez et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 13. – P. 26. DOI: 10.3390/s19133026
8. Sagkriotis S. Energy Usage Profiling for Virtualized Single Board Computer Clusters / S. Sagkriotis, C. Anagnostopou-

- Ios, D. Pezaros // Conference: 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) : proceedings. – Barcelona : IEEE, 2019. – P. 326. DOI: 10.1109/ISCC47284.2019.8969611
9. Papakyriakou D. Benchmarking Raspberry Pi 2 Beowulf Cluster / D. Papakyriakou // International Journal of Computer Applications. – 2018. – № 179. – P. 21–27. DOI: 10.5120/ijca2018916728
10. Исследование кластерной системы на основе одноплатных компьютеров Raspberry Pi 3B+ / [К. Э. Францкевич, М. О. Деменковец, Р. А. Тавтын и др.] // Инженерные решения. – 2019. – № 9. – С. 44. DOI: 10.32743/2658-6479.2019.9.10.199
11. Ларионов А. М. Вычислительные комплексы, системы и сети: учебник для вузов / А. М. Ларионов, С. А. Майоров, Г. И. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
12. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с. ISBN 5-94157-160-7
13. Dongarra J. HPC Challenge Benchmark / J. Dongarra, P. Luszczek, Padua D. // Encyclopedia of Parallel Computing. – 2011. – Chapter 26. – P. 844–850. DOI: 10.1007/978-0-387-09766-4_156
14. Home automation system using Raspberry Pi Zero W / [V. Yadav, K. Mishra, P. Singh et al.] // International Journal of Advanced Intelligence Paradigms. – 2020. – Vol. 16, № 2. – P. 216. DOI: 10.1504/IJAIP.2020.107023
- Стаття надійшла до редакції 22.10.2020.
Після доробки 05.01.2021.

УДК 004.3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КЛАСТЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ RASPBERRY PI 3B +

Бабчук С. М. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина.

Гуменюк Т. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина.

Романів І. Т. – студент кафедры компьютерных систем и сетей Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Для решения многих научных задач и для работы со сложными приложениями нужны высокопроизводительные вычислительные системы. Ранее реальную параллельную обработку данных поддерживали только суперкомпьютеры, доступ к которым очень ограничен. В настоящее время одним из путей решения данной проблемы является построение небольших дешевых кластеров на базе одноплатных компьютеров Raspberry Pi.

Цель. Разработать комплексный критерий эффективности работы кластерной системы, который бы мог должным образом охарактеризовать работу такой системы и найти зависимости производительности кластерной системы на базе Raspberry Pi 3B+ от количества плат в ней при различных системах охлаждения.

Метод. Предложено применять при анализе небольших кластерных компьютерных систем комплексный критерий эффективности работы кластерной системы, который будет учитывать общую производительность кластерной компьютерной системы, производительность одного вычислительного элемента в кластерной компьютерной системе, потребление электроэнергии кластерной системой, потребление электроэнергии из расчета на один вычислительный элемент, себестоимость вычисления 1 Гфлопс кластерной компьютерной системой, общую стоимость кластерной компьютерной системы.

Результаты. Разработанный комплексный критерий эффективности работы кластерной системы использовано при создании экспериментальной кластерной системы на базе одноплатных компьютеров Raspberry Pi 3B+. Также разработаны математические модели зависимости производительности небольшой кластерной системы на базе одноплатных компьютеров Raspberry Pi 3B+ в зависимости от количества плат в ней при различных системах охлаждения.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили целесообразность использования разработанного комплексного критерия эффективности работы кластерной системы и позволяют рекомендовать его к использованию на практике при создании небольших кластерных систем. Перспективы дальнейших исследований заключаются в определении весовых коэффициентов составных элементов комплексного критерия эффективности работы кластерной системы, а также в экспериментальном изучении предложенных весовых коэффициентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кластер, кластерная система, Raspberry Pi 3B+, математическая модель, производительность компьютерной системы, критерий эффективности.

UDC 004.3

MATHEMATICAL MODELS PRODUCTIVITY OF CLUSTER SYSTEM BASED ON RASPBERRY PI 3B+

Babchuk S. M. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

Humeniuk T. V. – PhD, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

Romaniv I. T. – Student of the Department of Computer Systems and Networks Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

ABSTRACT

Context. High-performance computing systems are needed to solve many scientific problems and to work with complex applied problems. Previously, real parallel data processing was supported only by supercomputers, which are very limited and difficult to access. Currently, one way to solve this problem is to build small, cheap clusters based on single-board computers Raspberry Pi.

Objective. The goal of the work is the creation of a complex criterion for the efficiency of the cluster system, which could properly characterize the operation of such a system and find the dependences of the performance of the cluster system based on Raspberry Pi 3B+ on the number of boards in it with different cooling systems.

Method. It is offered to apply in the analysis of small cluster computer systems the complex criterion of efficiency of work of cluster system which will consider the general productivity of cluster computer system, productivity of one computing element in cluster computer system, electricity consumption by cluster system, electricity consumption per one computing element, the cost of calculating 1 Gflops cluster computer system, the total cost of the cluster computer system.

Results. The developed complex criterion of cluster system efficiency was used to create an experimental cluster system based on single-board computers Raspberry Pi 3B+. Mathematical models of the dependence of the performance of a small cluster system based on single-board computers Raspberry Pi 3B+ depending on the number of boards in it with different cooling systems have also been developed.

Conclusions. The conducted experiments confirmed the expediency of using the developed complex criterion of efficiency of the cluster system and allow to recommend it for use in practice when creating small cluster systems. Prospects for further research are to determine the weights of the constituent elements of the complex criterion of efficiency of the cluster system, as well as in the experimental study of the proposed weights.

KEYWORDS: cluster, cluster system, Raspberry Pi 3B +, mathematical model, computer system performance, efficiency criterion.

REFERENCES

1. Mappuji A., Effendy N., Mustaghfirin M. et al. Study of Raspberry Pi 2 Quad-core Cortex-A7 CPU Cluster as a Mini Supercomputer, *Empowering Technology for Better Future : Eight international conference, Eastparc, 5–6 October 2016 : proceedings*. Yogyakarta, ICITEE, 2016, P. 161. DOI: 10.1109/ICITEED.2016.7863250
2. Gergel V. P. Vysokoproizvoditelnyye vychisleniya dlya mnogoyadernykh mnogoprotsessornykh sistem: uchebnoye posobiye. Nizhniy Novgorod, Izd-vo NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2010, 420 p. ISBN 5-85746-602-4
3. Cox S., Cox J., Boardman R. et al. Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster, *Cluster Computing*, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349–358. DOI: 10.1007/s10586-013-0282-7
4. Cloutier M., Paradis C., Weaver V. Design and Analysis of a 32-bit Embedded High-Performance Cluster Optimized for Energy and Performance, *Hardware-Software Co-Design for High Performance Computing, 17 November 2014 : proceedings*. New Orleans, Co-HPC, 2014, pp. 1–8. DOI: 10.1109/Co-HPC.2014.7
5. Pajankar A. Raspberry Pi Supercomputing and Scientific Programming. Apress, 2017, 198 p. ISBN: 978-1-4842-2877-7, DOI: 10.1007/978-1-4842-2878-4
6. Basford P., Ossont S., Perkins C. et al. Performance analysis of single board computer clusters, *Future Generation Computer Systems*, 2019, No. 14, P. 102. DOI: 10.1016/j.future.2019.07.040
7. Cerero D., Sevilla U., Fernández-Rodríguez J. et al. Single-Board-Computer Clusters for Cloudlet Computing in Internet of Things, *Sensors*, 2019. Vol.19, No. 13, P. 26. DOI: 10.3390/s19133026
8. Sagkriotis S., Anagnostopoulos C., Pezaros D. Energy Usage Profiling for Virtualized Single Board Computer Clusters / S. Sagkriotis, // *Conference: 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), proceedings*. Barcelona, IEEE, 2019, P. 326. DOI: 10.1109/ISCC47284.2019.8969611
9. Papakyriakou D. Benchmarking Raspberry Pi 2 Beowulf Cluster, *International Journal of Computer Applications*, 2018, No. 179, P. 21–27. DOI: 10.5120/ijca2018916728
10. Frantskevich K. E., Demenkovets M. O., Tavtyn R. A. i dr. Issledovaniye klasternoy sistemy na osnove odnoplattnykh kompyuterov Raspberry Pi 3B+, *Inzhenernyye resheniya*, 2019, No. 9, P. 44. DOI: 10.32743/2658-6479.2019.9.10.199
11. Larionov A. M., Mayorov S. A., Novikov G. I. Vychislitelnyye komplekсы, sistemy i seti: uchebnyk dlya vuzov. Leningrad, Energoatomizdat, 1987, 288 p.
12. Voyevodin V. V., Voyevodin V. V. Parallelnyye vychisleniya. SPb, BKhV-Peterburg, 2002, 608 p. ISBN 5-94157-160-7
13. Dongarra J., Luszczek P., Padua D. HPC Challenge Benchmark, *Encyclopedia of Parallel Computing*, 2011, Chapter 26, pp. 844–850. DOI: 10.1007/978-0-387-09766-4_156
14. Yadav V., Mishra K., Singh P. et al. Home automation system using Raspberry Pi Zero W, *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 2020, Vol. 16, No. 2, P. 216. DOI: 10.1504/IJAIP.2020.107023