

УДК 004.3

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-9

БАБЧУК С. М., РОМАНІВ І. Т.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРТОСТІ ОБЧИСЛЕННЯ 1 ГФЛОПС КЛАСТЕРНОЮ СИСТЕМОЮ НА БАЗІ RASPBERRY PI 3B+

На сьогодні суперкомп'ютери забезпечують високу швидкість за допомогою паралельних обчислень великих об'ємів даних. Проте вони дуже дорогі, складні в розробці, і потребують дуже багато електроенергії для живлення та охолодження. Розробка програм, які забезпечують розпаралелення виконання завдань, є дуже важливою в організації ефективної роботи суперкомп'ютерів. Оскільки для роботи з суперкомп'ютерами відводяться обмежені невеликі інтервали часу, то для розробника програми важливо бути впевненим, що вона буде правильно працювати в реальному багатопроцесорному середовищі, а розпаралелювання задач буде відбуватися належним чином. Для тестування та відлагоджування програм написаних для виконання на суперкомп'ютерах, навчання студентів програмування для реального багатопроцесорного середовища зараз є актуальною розробка кластерних систем з дешевих одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi. Під час попередніх досліджень кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi основна увага приділялася їх продуктивності. Проте, важливо також знати вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою, адже цей показник впливає на загальну ефективність роботи такої системи. Для проведення експериментів було розроблено кластерну систему з одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+. З метою визначення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних конфігураціях кластера під час експериментів проводилась зміна кількості плат в кластері від двох до чотирьох а також використовувались різні підходи до охолодження кластерної системи. Для забезпечення отримання достовірних даних про вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній та при різних підходах до охолодження кластера було проведено по 49 однотипних дослідів для кожної конфігурації кластера. В результаті проведених досліджень розроблено математичні моделі залежності вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при різних підходах до охолодження кластера. Визначені особливості та залежності зміни вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній, при різних підходах до охолодження кластера, що дозволить в подальшому вибирати конфігурацію кластерної системи, яка забезпечить її ефективну роботу.

Ключові слова: математична модель, кластерна система, кластер, Raspberry Pi 3B+, вартість обчислення 1 Гфлопс.

BAVCHUK S., ROMANIV I.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

MATHEMATICAL MODELS COST OF CALCULATION 1 GFLOPS CLUSTER SYSTEM BASED ON RASPBERRY PI 3B+

Nowadays, supercomputers provide high performance with parallel computing of large amounts of data. However, they are very expensive, difficult to develop, and require a lot of electricity to power and cool. Developing programs that provide parallel tasks is very important in organizing the efficient operation of supercomputers. Because there are limited time intervals for working with supercomputers, it is important for the developer of the program to be sure that it will work properly in a real multiprocessor environment, and the parallelization of tasks will take place properly. To test and debug programs written for execution on supercomputers, teaching students programming for a real multiprocessor environment, it is now important to develop cluster systems from cheap Raspberry Pi single-board computers. Previous research on Raspberry Pi single-board cluster systems has focused on their performance. However, it is also important to know the cost of calculating 1 Gflops cluster system, because this indicator affects the overall efficiency of such a system. A cluster system of Raspberry Pi 3B+ single-board computers was developed for the experiments. In order to determine the cost of computing 1 Gflops cluster system based on single-board computers Raspberry Pi 3B+ in different cluster configurations during the experiments, the number of boards in the cluster was changed from two to four and different approaches to cooling the cluster system were used. To provide reliable data on the cost of computing 1 Gflops cluster system based on single-board computers Raspberry Pi 3B+ with different number of Raspberry Pi 3B+ boards in it and with different approaches to cooling the cluster, 49 similar experiments were performed for each cluster configuration. As a result of the research, mathematical models of the dependence of the cost of calculating 1 Gflops cluster system based on single-board computers Raspberry Pi 3B+ on the number of Raspberry Pi 3B+ boards in it with different approaches to cluster cooling have been developed. Features and dependences of change of cost of calculation of 1 Gflops by the cluster system on the basis of single-board computers Raspberry Pi 3B+ on quantity of boards of Raspberry Pi 3B+ in it, at various approaches to cooling of a cluster are defined that will allow to choose the best configuration that will ensure efficient operation.

Keywords: mathematical model, cluster system, cluster, Raspberry PI 3B+, cost of calculating 1 Gflops.

Постановка проблеми. На сьогодні суперкомп'ютери забезпечують високу швидкість за допомогою паралельних обчислень великих об'ємів даних. Проте вони дуже дорогі, складні в розробці, і потребують дуже багато електроенергії для живлення та охолодження [1].

Суперкомп'ютер Fugaku встановлений в Центрі обчислювальної науки RIKEN в японському місті Кобе. Розробка даного суперкомп'ютера розпочалась ще в 2014 році. Введення в повноцінну експлуатацію на запланованій потужності має відбутись тільки в 2021 році. Проте частина комп'ютера була введена в експлуатацію в червні 2020 р. В червні 2020 р. суперкомп'ютер Fugaku випередив інший суперкомп'ютер

Summit та став першим номером в переліку ТОП500 [2]. Таким чином розробка суперкомп'ютера Fugaku має скласти 7 років.

Суперкомп'ютер Summit (OLCF-4) розроблений компанією IBM для Oak Ridge National Laboratory. З 8 червня 2018 р. він був найпотужнішим суперкомп'ютером у світі та утримував першість до червня 2020 р., коли поступився суперкомп'ютеру Fugaku. Суперкомп'ютер Summit охолоджується системою, в якій циркулює 15150 л очищеної води. Необхідно відмітити, що суперкомп'ютер Summit споживає 15 МВт енергії, якої вистачило б на постачання 8100 середньостатистичних житлових будинків [3].

Науковці, програмісти, студенти майже не мають можливості працювати на суперкомп'ютерах і запускати на них розроблені ними програми. Як правило, суперкомп'ютери неперервно задіяні для виконання програм великих корпорацій та урядів великих держав. Дуже складно одержати дозвіл на роботу з суперкомп'ютером. Зазвичай, потрібно наперед написати звернення і очікувати в черзі на допуск до роботи із суперкомп'ютером [1]. Розробка програм, які забезпечують розпаралелення виконання завдань, є дуже важливою в організації максимально ефективної роботи дуже дорогих суперкомп'ютерів. Оскільки для роботи з суперкомп'ютерами відводяться обмежені невеликі інтервали часу, то для розробника програми важливо бути впевненим, що вона буде правильно працювати в реальному багатопроцесорному середовищі, а розпаралелювання задач буде відбуватися належним чином [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні великі компанії та науково-дослідні організації в пошуку дешевих та простих комп'ютерних систем на яких вони могли б тестувати та відлагоджувати програми написані для виконання на суперкомп'ютерах. Також провідні університети світу в пошуку дешевих та простих комп'ютерних систем на яких можна б було навчати студентів програмування для реального багатопроцесорного середовища.

Професор Simon Cox з університету Southampton (Великобританія) створив кластерну систему з 64 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi. Вартість даної системи склала 4000 дол. США [4]. В праці "Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster" вказано, що кластери подібні до вищевказаних є ідеальним ресурсом для освітнього використання, щоб надихнути студентів, які вивчають основи високопродуктивних та наукових обчислень. Інші вчені та компанії також займалися створенням кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi [5–11]. Зазвичай, створювались кластерні системи на базі 4, 8, 32, 64 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi.

Необхідно відмітити, що розробка кластерних систем на базі дешевих одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi зацікавила не тільки університети, як дешева база для навчання студентів програмуванню для реального багатопроцесорного середовища. До таких пошуків та розробок долучилися великі всесвітньовідомі компанії як Oracle та Лос-Аламоська національна лабораторія в США. В 2019 році компанія Oracle представила розроблений нею кластер з 1060 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ [5]. А в Лос-Аламоській національній лабораторії було створено кластер з 1000 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3 вартістю 150 тис. дол. США [1]. Розроблений кластер в Лос-Аламоській національній лабораторії використовується для тестування програмного забезпечення, яке в подальшому має бути запущено на суперкомп'ютері Trinity, який теж експлуатується в Лос-Аламоській національній лабораторії. Звичайно, що вартість кластеру розробленого для даної лабораторії є досить високою, але вона значно менша вартості суперкомп'ютері Trinity. Крім того, кластер з 1000 одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3 споживає значно менше електроенергії чим суперкомп'ютері Trinity (25 МВт на живлення та вдвічі більше на охолодження).

При вище проаналізованих дослідженнях кластерних систем на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi основна увага приділялася їх продуктивності. Проте, важливо також знати вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою, адже цей показник впливає на загальну ефективність роботи такої системи.

Мета досліджень. Мета роботи полягає у встановленні вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат в кластері і при різних системах охолодження та розробка математичних моделей зміни вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі Raspberry Pi 3B+ залежно від різної кількості плат в ній та при різних системах охолодження.

Визначення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+. Для проведення експериментів було розроблено кластерну систему з чотирьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+, гігабітного некерованого комутатора D-Link DGS-1005A, блоку живлення 60 W, кулера DeepCool XFAN 120 L/W.

З метою визначення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різних конфігураціях кластера під час експериментів проводилась зміна кількості плат в кластері від двох до чотирьох а також використовувались різні підходи до охолодження кластерної системи:

- без охолодження;
- з пасивним охолодженням;
- з активним охолодженням за допомогою кулера DeepCool XFAN 120 L/W.

Для забезпечення отримання достовірних даних про вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній та при різних підходах до охолодження кластера було проведено по 49 однотипних дослідів для кожної конфігурації кластера.

Вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ досліджувалась за даними, які були отримані при проведенні тесту “High performance challenge benchmark” [12].

Під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” кластерною системою на базі чотирьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при використанні різних підходів до охолодження кластера було визначено вартість обчислення 1 Гфлопс (рис. 1).

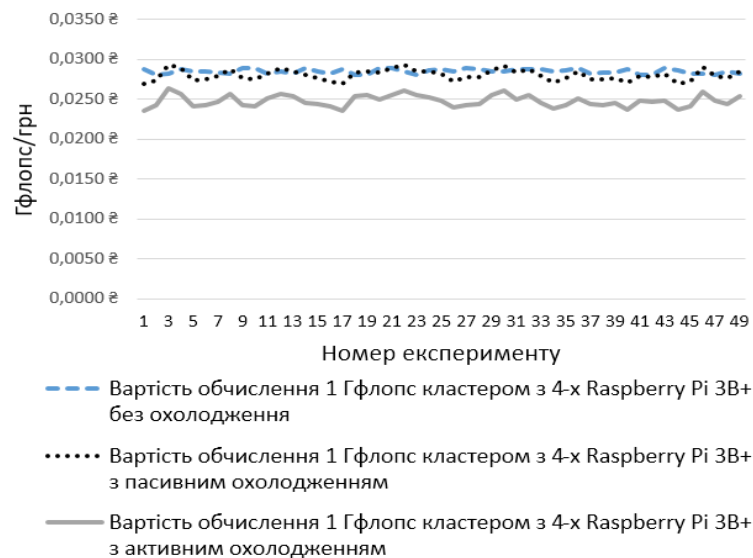


Рис. 1. Вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі чотирьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” та при використанні різних підходів до охолодження кластера



Рис. 2. Вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі трьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” та при використанні різних підходів до охолодження кластера

Під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” кластерною системою на базі трьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при використанні різних підходів до охолодження кластера було визначено вартість обчислення 1 Гфлопс (рис. 2).

Під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” кластерною системою на базі двох одноплатних комп’ютерів Raspberry Pi 3B+ при використанні різних підходів до охолодження кластера було визначено вартість обчислення 1 Гфлопс (рис. 3).

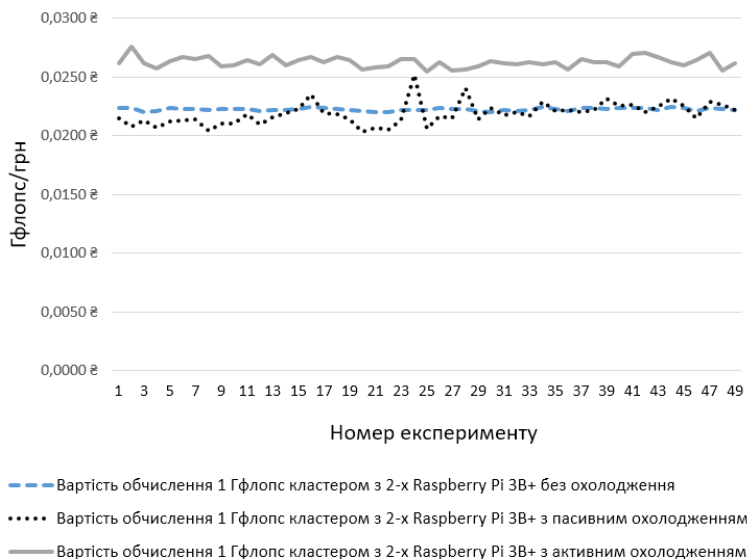


Рис. 3. Вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі двох одноплатних комп’ютерів Raspberry Pi 3B+ під час виконання тесту “High performance challenge benchmark” та при використанні різних підходів до охолодження кластера

Для зручності проведення аналізу результатів експериментів було розраховано середні значення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп’ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній та при різних підходах до охолодження кластера (рис. 4).

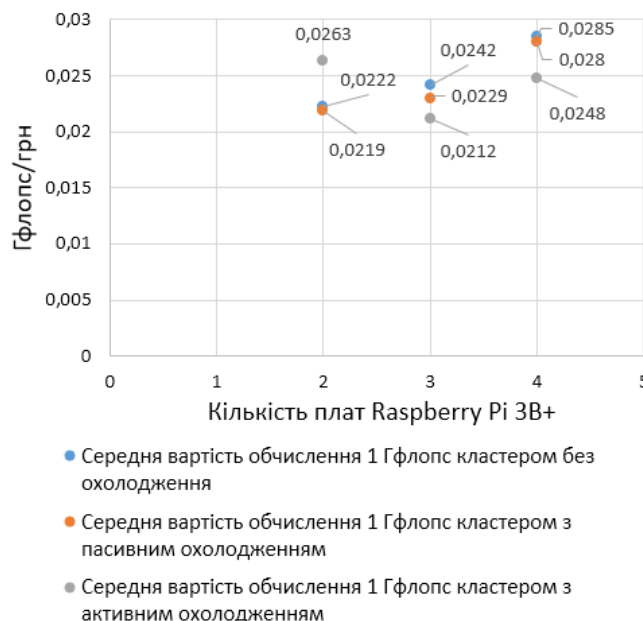


Рис. 4. Середні значення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп’ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній та при різних підходах до охолодження кластера

З рис. 4 видно, що середні значення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп’ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при пасивній системі охолодження і без системи охолодження майже однакові: при використанні пасивної системи охолодження вартість обчислення 1 Гфлопс нижча в межах від 1,35% до 5,37%:

- 1,35 % при 2 Raspberry Pi 3B+;
- 5,37 % при 3 Raspberry Pi 3B+;
- 1,75 % при 4 Raspberry Pi 3B+.

Таким чином, впровадження пасивної системи охолодження в кластерній системі на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ призводить до незначного зменшення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ (від 1,35 % до 5,37 %). Крім того, з рис. 4 видно, що із збільшенням кількості одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластері зростає вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою при пасивній системі охолодження і без системи охолодження.

У випадку використання кластерної системи на базі двох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою з активним охолодженням на 20,09 % вища ніж у такої системи з пасивним охолодженням і на 18,47 % вища ніж у такої системи без охолодження. Таким чином, для кластеру на базі двох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ найбільш економічно ефективно є робота кластеру з пасивною системою охолодження.

При збільшенні кількості одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластерній системі (від 3-х і більше) найбільш економічно ефективно стає робота кластеру з активною системою охолодження в порівнянні з аналогічними системами з пасивним охолодженням та без охолодження:

– в кластері з трьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою з активним охолодженням на 7,42 % нижча ніж у такої системи з пасивним охолодженням і на 12,40 % нижча ніж у такої системи без охолодження;

– в кластері з чотирьох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою з активним охолодженням на 11,43 % нижча ніж у такої системи з пасивним охолодженням і на 12,98 % нижча ніж у такої системи без охолодження.

Отже, при збільшенні числа одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластерній системі вище двох більш економічно ефективно роботу кластера забезпечує обладнання активною системою охолодження.

Розробка математичних моделей залежності вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при різних підходах до охолодження кластера. В результаті проведених досліджень встановлено математичні моделі залежності вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при активному охолодженні (1), при пасивному охолодженні (2) та без системи охолодження (3):

$$y = 0,0044x^2 - 0,0269x + 0,0626, \quad (1)$$

$$y = 0,0021x^2 - 0,0093x + 0,0322, \quad (2)$$

$$y = 0,0012x^2 - 0,0038x + 0,0251. \quad (3)$$

З встановлених математичних моделей 1–3 видно, що вони мають форму полінома другого порядку.

В порівнянні з середніми значеннями вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+, отриманими за результатами експериментів, похибка розрахунків вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ залежно від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній за допомогою моделей 1–3 не перевищує 2,5 % (0,0006 грн).

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено математичні моделі залежності вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при різних підходах до охолодження кластера (похибка розрахунків не перевищує 2,5 % – 0,0006 грн).

Встановлено, що середні значення вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ при різній кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній при пасивній системі охолодження і без системи охолодження майже однакові: при використанні пасивної системи охолодження вартість обчислення 1 Гфлопс нижча в межах від 1,35 % до 5,37 %. Із збільшенням кількості одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластері зростає вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою при пасивній системі охолодження і без системи охолодження.

У випадку використання кластерної системи на базі двох одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ вартість обчислення 1 Гфлопс кластерною системою з активним охолодженням на 20,09 % вища ніж у такої системи з пасивним охолодженням і на 18,47 % вища ніж у такої системи без охолодження. При збільшенні числа одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ в кластерній системі вище двох більш економічно ефективно роботу кластера забезпечує його обладнання активною системою охолодження.

Визначені особливості та залежності зміни вартості обчислення 1 Гфлопс кластерною системою на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3B+ від кількості плат Raspberry Pi 3B+ в ній, при різних підходах до охолодження кластера, що дозволить в подальшому вибирати конфігурацію кластерної системи, яка забезпечить більш ефективну роботу.

Література

1. Мини-суперкомпьютер: 1000 Raspberry Pi объединили в кластер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/408695/>
2. Cutress I. New #1 Supercomputer: Fugaku in Japan, with A64FX, take Arm to the Top with 415 PetaFLOPs. - Anandtech. - [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.anandtech.com/show/15869/new-1-supercomputer-fujitsu-fugaku-and-a64fx-take-arm-to-the-top-with-415-petaflops>
3. Lohr S. Move Over, China: U.S. Is Again Home to World's Speediest Supercomputer. - The New York Times. - [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nytimes.com/2018/06/08/technology/supercomputer-china-us.html?hp&action=click&pgtype=Homepage&clickSource=story-heading&module=first-column-region®ion=top-news&WT.nav=top-news>
4. Simon J. Cox, James T. Cox, Richard P. Boardman, Steven J. Johnston, Mark Scott, Neil S. O'Brien Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster // Cluster Computing, June 2013, Volume 17, Issue 2, pp 349-358
5. Шиллинг А. Суперкомпьютерный кластер из 1.060 Raspberry Pi 3 B+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/hardware/prozessoren/47993-superkompyuternyj-klaster-iz-1-060-raspberry-pi-3-b.html>
6. Никольский И.М., Фурманов К.К. Об использовании кластеров из одноплатных компьютеров для анализа данных в Интернете вещей. Сборник CEUR Workshop Proceedings, том 1787, 2016. - с. 381-384
7. Moore J., Performance Benchmarking a Raspberry Pi Cluster, 2014
8. Babchuk, S. Classification of Specialized Computer Networks // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – Vol. 48. – P. 57-64.
9. Cloutier M. F., Paradis C., Weaver V. M., Design and Analysis of a 32-bit Embedded High-Performance Cluster Optimized for Energy and Performance // Co-HPC, 2014. – P.1–8.
10. Ellen-Louise Bleeker, Magnus Reinholdsson, Creating a Raspberry Pi-Based Beowulf Cluster, 2017. – P.66.
11. Abdurrachman M., Study of Raspberry Pi 2 Quad-core Cortex-A7 CPU Cluster as a Mini Supercomputer // 8th ICITEE. – Yogyakarta, Indonesia, 2016. – P.4.
12. High performance challenge benchmark [Electronic resource]. – Access mode: <https://icl.utk.edu/hpc/>

Reference

1. Mini-superkompyuter: 1000 Raspberry Pi obedinili v klaster [Electronic resource]. – Access mode: <https://habr.com/ru/post/408695/>
2. Cutress I. New #1 Supercomputer: Fugaku in Japan, with A64FX, take Arm to the Top with 415 PetaFLOPs. - Anandtech. - [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.anandtech.com/show/15869/new-1-supercomputer-fujitsu-fugaku-and-a64fx-take-arm-to-the-top-with-415-petaflops>
3. Lohr S. Move Over, China: U.S. Is Again Home to World's Speediest Supercomputer. - The New York Times. - [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nytimes.com/2018/06/08/technology/supercomputer-china-us.html?hp&action=click&pgtype=Homepage&clickSource=story-heading&module=first-column-region®ion=top-news&WT.nav=top-news>
4. Simon J. Cox, James T. Cox, Richard P. Boardman, Steven J. Johnston, Mark Scott, Neil S. O'Brien Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster // Cluster Computing, June 2013, Volume 17, Issue 2, pp 349-358
5. Shilling A. Superkompyuternyy klaster iz 1.060 Raspberry Pi 3 B+ [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/hardware/prozessoren/47993-superkompyuternyj-klaster-iz-1-060-raspberry-pi-3-b.html>
6. Nikolskiy I.M., Furmanov K.K. Ob ispolzovanii klasterov iz odnoplattnykh kompyuterov dlya analiza dannykh v Internetе veschey. Сbornik CEUR Workshop Proceedings, tom 1787, 2016. - P. 381-384
7. Moore J., Performance Benchmarking a Raspberry Pi Cluster, 2014.
8. Babchuk, S. Classification of Specialized Computer Networks // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – Vol. 48. – P. 57-64
9. Cloutier M. F., Paradis C., Weaver V. M., Design and Analysis of a 32-bit Embedded High-Performance Cluster Optimized for Energy and Performance // Co-HPC, 2014. – P.1–8.
10. Ellen-Louise Bleeker, Magnus Reinholdsson, Creating a Raspberry Pi-Based Beowulf Cluster, 2017. – P.66.
11. Abdurrachman M., Study of Raspberry Pi 2 Quad-core Cortex-A7 CPU Cluster as a Mini Supercomputer // 8th ICITEE. – Yogyakarta, Indonesia, 2016. – P.4.
12. High performance challenge benchmark [Electronic resource]. – Access mode: <https://icl.utk.edu/hpc/>

Надійшла / Paper received: 02.10.2020

Надрукована / Paper Printed : 02.12.2020