

## UOT 004.9

*Джафарзаде К.Э.*

Институт Информационных Технологий НАНА, Баку, Азербайджан

[kamran@science.az](mailto:kamran@science.az)

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

*В статье рассматривается классификация таких видов архитектуры суперкомпьютера, как кластер, MPP- и SMP-архитектуры, а также программных средств и интерфейсов программирования приложений MPI и PVM. Также предлагается сравнительный анализ программного обеспечения (ПО) при исследовании динамики распределения операционных систем (ОС) за последний год использования в суперкомпьютерных технологиях. Кроме того, производится анализ эффективности использования программного обеспечения CentOS в научной сети «AzScienceNet».*

**Ключевые слова:** суперкомпьютер, операционная система, программное обеспечение, кластер, SMP-архитектура, MPP-архитектура, MPI, PVM, CentOS ОС.

#### **Введение**

Суперкомпьютер – это компьютер с высоким уровнем вычислительной производительности по сравнению с компьютером общего назначения. Чаще всего суперкомпьютеры используются для научных и инженерных приложений, которые должны обрабатывать очень большие базы данных или выполнять большое количество вычислений. Производительность суперкомпьютера измеряется в операциях с плавающей запятой в секунду (FLOPS) вместо миллионов инструкций в секунду (MIPS). Начиная с 2015 года, начали создавать суперкомпьютеры, которые могут выполнять до квадриллионов FLOPS. Современные суперкомпьютеры представляют собой большое количество серверных компьютеров, обладающих высокой производительностью и связанных друг с другом локальной высокоскоростной магистралью для достижения наивысшей производительности [1].

Суперкомпьютеры первоначально были представлены в 1960-х годах и в течение последующих десятилетий такими компаниями, как Seymour Cray из Control Data Corporation (CDC), Cray Research, носящих его название или монограмму. К концу XX века уже выпускались массово-параллельные суперкомпьютеры с десятками тысяч доступных процессоров.

Суперкомпьютеры обычно используются для работы с приложениями, которые требуют более сложных вычислений, что и отличает их от серверов и мэйнфреймов – компьютеров с высокой производительностью, призванных решать исключительно типовые задачи. Исключительно суперкомпьютерным программным обеспечением в настоящее время можно называть лишь специализированные программные средства для контроля и мониторинга определенных типов компьютеров, а также уникальные программные среды, создаваемые в центрах вычислений под «собственные», уникальные конфигурации суперкомпьютерных систем [2].

#### **Архитектура суперкомпьютера**

В создании суперкомпьютеров широко используются следующие виды архитектур: MPP (massive parallel processing), SMP (symmetric multiprocessing) и кластер.

SMP-архитектура – это симметричная многопроцессорная архитектура. Важной особенностью системы с архитектурой SMP является общая физическая память, разделяемая всеми процессорами. Память служит, в особенности, для передачи сообщений между процессорами, при этом все вычислительные устройства при обращении к ней

имеют одинаковые права и одну и ту же адресацию для всех существующих ячеек памяти. Поэтому SMP-архитектуру называют симметричной. SMP включает в себя многопроцессорную аппаратную и программную архитектуру, в которой два или более одинаковых процессора, подключенных к одной общей памяти, имеют полный доступ ко всем устройствам ввода/вывода и управляются операционной системой, которая обрабатывает все процессоры одинаково. Вся система работает под управлением единой ОС (обычно UNIX-подобной, но для платформ Intel поддерживается Windows NT) [3].

В настоящее время SMP-архитектура не является такой актуальной, как MPP и кластер, и почти не используется в современных суперкомпьютерах. Динамика распределения архитектур суперкомпьютера: MPP и кластер, по данным из статистики ресурса top500.org на конец первого полугодия 2017 года, показаны на рисунке 1 [4].

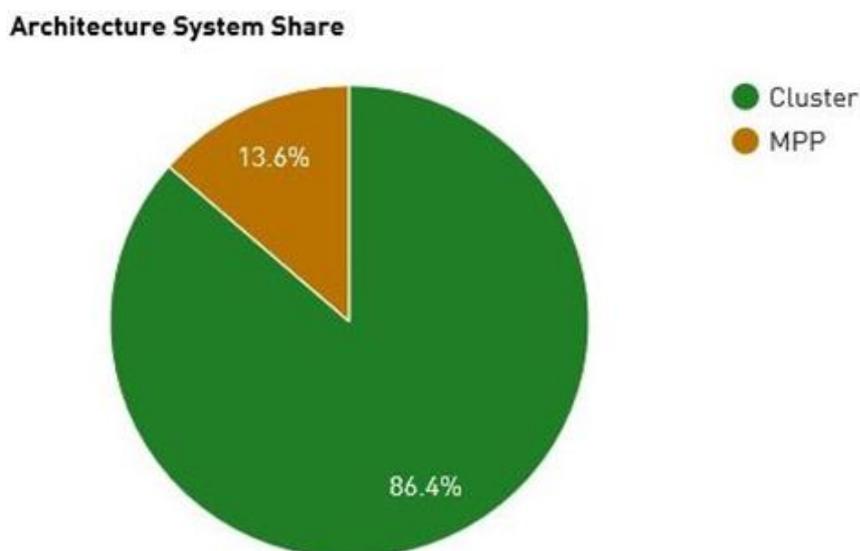


Рис.1. Динамика распределения архитектур суперкомпьютера: MPP и кластер

MPP-архитектура – это массивно-параллельная архитектура. Основная особенность этой архитектуры заключается в том, что память физически разделена. В данном случае система строится из отдельных модулей, содержащих процессор, локальный банк операционной памяти, два коммуникационных маршрутизатора или сетевой адаптер, иногда жесткие диски и/или другие устройства ввода/вывода.

Существуют два типа работы операционной системы на машинах MPP-архитектуры. В первом полноценная операционная система работает исключительно на управляющей машине, на каждом модуле работает минимальный вариант операционной системы, который обеспечивает работу расположенной в нем ветви параллельного приложения. Во втором на каждом модуле работает полноценная UNIX-подобная система, устанавливаемая в отдельности на каждом модуле.

Кластер – представляет собой группу серверов и других ресурсов, которые действуют как единая система и обеспечивают высокую работоспособность и в некоторых случаях балансировку нагрузки и параллельную обработку [5].

Существуют следующие основные виды кластера:

- отказоустойчивый кластер (High-availability cluster – HA, кластер с высокой доступностью);
- кластер с балансировкой нагрузки (Load balancing cluster);
- вычислительный кластер (Computing cluster);
- grid-системы [6].

В качестве вычислительных узлов в кластерах обычно используют однопроцессорные компьютеры, двух- или четырехпроцессорные SMP-серверы. Каждый узел работает под управлением своей копии операционной системы, в качестве которой чаще всего используются стандартные ОС: Linux, NT, Solaris и т.д.

### Организация параллельных вычислений

Для организации параллельных вычислений важную роль играют возможность распределения вычислительной нагрузки и организация передачи данных между процессорами.

Наиболее популярными программными средствами суперкомпьютера, так же как и параллельных или распределенных компьютерных систем, являются интерфейсы программирования приложений на основе MPI (Message Passing Interface) и PVM (Parallel Virtual Machine) и решения на базе ПО, позволяющего создавать суперкомпьютеры даже на базе обычных рабочих станций и ПК. Среди пользователей GNU/Linux наиболее распространены несколько программ:

- **distcc, MPICH** (Message Passing Interface CHameleon) – специализированные средства для распараллеливания работы программ.

- **Linux Virtual Server, Linux-HA** – узловое ПО для распределения запросов между вычислительными серверами.

- **MOSIX, openMosix, Kerrighed, OpenSSI** (Single-System Image) – полнофункциональные кластерные среды, встроенные в ядро, автоматически распределяющие задачи между однородными узлами, которые создают среду единой системы между узлами.

MPI – это интерфейс передачи сообщений, представляющий собой стандартизованную и переносимую систему передачи сообщений. Стандарт определяет синтаксис и семантику ядра библиотечных подпрограмм, полезных для широкого круга пользователей, пишущих переносимые программы передачи сообщений в языках C, C++ и Fortran [7]. Целью MPI являются высокая производительность, масштабируемость и переносимость. MPI остается доминирующей моделью, используемой в современных высокопроизводительных вычислениях. Существует несколько проверенных и эффективных реализаций MPI, многие из которых являются открытыми или общедоступными. Для разных ОС и сетей передачи данных, используемых в кластерах, построены и продолжают создаваться специальные реализации MPI. Среди бесплатных реализаций MPI есть пакет MPICH.

PVM (параллельная виртуальная машина) – это пакет программ, позволяющий использовать связанный в локальную сеть набор разнородных компьютеров, работающих под операционной системой Unix, как один большой параллельный компьютер. Комплекс PVM обеспечивает работу параллельных программ в вычислительных средах. В системе возможно создавать приложения как типа SPMD (Single Program Multiple Data) – одна параллельная программа со множеством потоков данных, так и типа MPMD (Multiple Programs Multiple Data) – много параллельных программ со множеством потоков данных. Она совместима с приложениями, написанными на различных языках программирования, и точно преобразует данные при передаче их между узлами различной архитектуры. PVM считается открытой и свободно распространяемой системой, которая разрешает пользователям использовать существующие аппаратные средства для выполнения достаточно сложных задач с минимальными затратами. Сегодня PVM – это фактически стандарт для распределенных вычислений [8, 9].

## Операционные системы суперкомпьютеров

Большой популярностью в суперкомпьютерах используется система Linux – 64,2% от общего числа на конец первого полугодия 2017 года, по данным из статистики top500.org, как показано на рисунке 2 [4]. Далее распределились ОС с уже сравнительно меньшей долей использования CentOS и Cray Linux Environment с соответствующими процентными соотношениями 12,6% и 8,6%. Также все еще продолжает использоваться коммерческий дистрибутив Linux – SUSE Linux Enterprise Server, основанный компанией SUSE, который предназначается для корпоративного использования. Сравнительно ранее появившаяся Microsoft Windows Compute Cluster Server (CCS) 2008 является интегрированной платформой для проведения различных высокопроизводительных вычислений. С использованием этой платформы производят различные вычисления на кластерах, имеющих от нескольких до 100 и даже 1000 узлов [10].

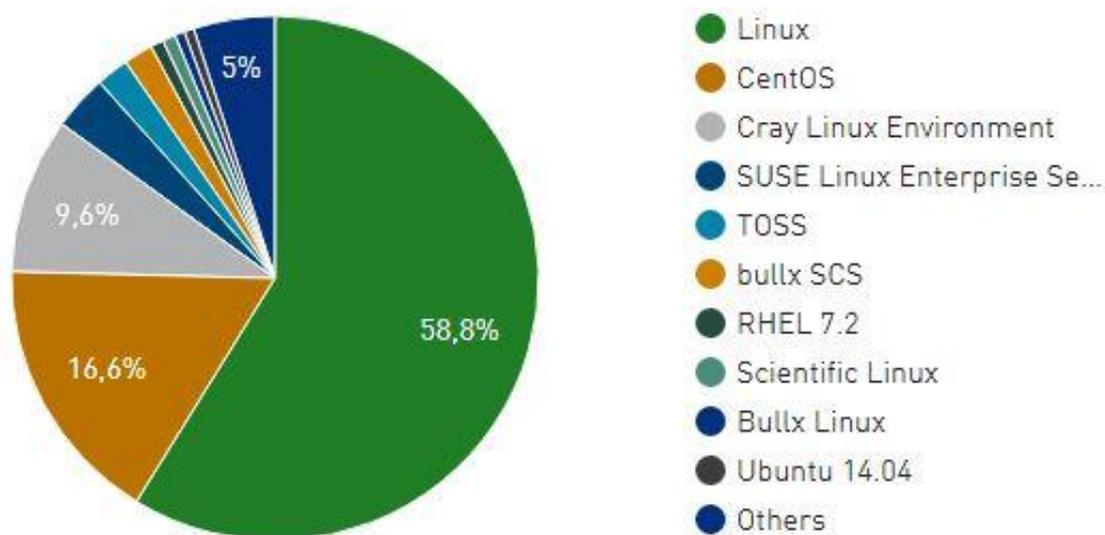


Рис.2. Динамика использования операционных систем в суперкомпьютерах

Linux. Операционная система Linux часто используется в версиях, специально оптимизированных под распределенные параллельные вычисления. В системе Linux имеется поддержка SMP-архитектуры, причем ее реализация не требовала специальных серьезных изменений в ядре; в рамках постепенной разработки ядра к нему был добавлен минимальный набор необходимых примитивов. Для абсолютно независимых процессов, которые не используют совместные ресурсы, поддержки SMP не требуется: они будут работать, по возможности используя каждый свой процессор со своим же объемом оперативной памяти, а их общая производительность в двухпроцессорной конфигурации будет почти в 2 раза превышать однопроцессорную конфигурацию. Использование специальных средств координации необходимо только в том случае, когда два процесса пытаются в одно и то же время получить доступ к одному ресурсу, обычно находящемуся в памяти. В таком случае операционная система должна организовать ему такой доступ, чтобы один процессор случайно не испортил результаты работы другого. Для этого в ОС Linux предусмотрена система контроля доступа к областям памяти и блокировок на запись и чтение [11].

Unicos (все буквы официально заглавные – UNICOS) – название разных вариантов операционной системы Unix, разработанных компанией Cray для своих суперкомпьютеров. Unicos является следующей операционной системой компании после выпуска Cray Operating System (COS). Она обеспечивала работу сетевых кластеров и совместимость на уровне исходного кода с некоторыми другими разновидностями Unix. Unicos впервые была

представлена в качестве операционной системы суперкомпьютера Cray-2, а позже была перенесена и на другие модели Cray. Cray выпускал несколько различных операционных систем под наименованием Unicos. Оригинальная версия Cray Unix, основанная на Unix System V, использовалась в суперкомпьютерах Cray-1, Cray-2, X-MP, Y-MP, C90 и т.д. Начиная с выпуска версии 2.1 UNICOS/lc официально получила название Cray Linux Environment (CLE).

Windows Compute Cluster Server 2008. Первым пробным продуктом в сфере суперкомпьютерных технологий корпорации Microsoft была разработка Windows Server Compute Cluster Edition 2003 (CCE) и Windows Compute Cluster Server 2003 (WCCS), призванных обеспечить осуществление требований широкого ряда HPC (High Performance Computing) приложений. WCCS отличаются от CCE исключительно наличием пакета Microsoft Compute Cluster Pack (CCP). Но ввиду недостаточной функциональности WCCS в Microsoft создали ОС для кластерных систем на базе последней своей разработки – Server 2008. Так был выпущен HPC Server 2008.

Обе системы CCE и WCCS выпущены только в виде 64-разрядных версий (x64), т.е. 32-разрядные версии (x86) этих продуктов не доступны. Аппаратные требования для CCE и WCCS близки к требованиям для 64-разрядной версии Windows Server 2003 Standard. Для обеспечения работы высокопроизводительного оборудования (x64-архитектуры) эти системы дополнительно имеют поддержку RDMA (Remote Direct Memory Access) для высокоскоростных подключений.

Вычислительные кластеры обладают рядом базовых требований, которые выполняются при помощи установки пакета Compute Cluster Pack – самостоятельного установочного пакета, в состав которого входят следующие компоненты:

- встроенный планировщик заданий;
- поддержка интерфейса MPI для стандарта MPICH2;
- инструменты пользователя и средства управления ресурсами кластеров [12].

### **Основные задачи операционной системы CentOS, используемой в «AzScienceNet»**

CentOS (Community Enterprise Operating System) представляет собой совершенно бесплатный дистрибутив операционной системы на основе ядра Linux, выпущенный в мае 2004 года компанией RedHat. Он полностью получен из дистрибутива Red Hat Enterprise Linux (RHEL). CentOS существует для обеспечения свободной вычислительной платформы класса предприятия и стремится поддерживать 100-процентную двоичную совместимость с исходным кодом Red Hat.

CentOS является одним из самых популярных дистрибутивов Linux в индустрии хостинга. Благодаря бинарной совместимости CentOS с RHEL он хорошо совместим с большинством Linux-программ. Большинство контрольных панелей хостинга используют CentOS в качестве предпочтительного дистрибутива Linux.

Помимо всего этого CentOS использовалась как ОС по умолчанию в проекте Cluster Compute Instance (CCI) от Amazon, суть которого заключается в аренде мощности большого числа стандартных стоечных серверов.

ОС CentOS имеет следующие преимущества:

- Высокий уровень безопасности. За последнее время CentOS для выделенного сервера используется на все большем количестве машин. Часть возможных упущений устраняется еще до выхода самого выпуска обновления.
- Высокая производительность. Как и большинство Linux-подобных систем, CentOS обладает высокой скоростной характеристикой, что является неременным фактором функционирования крупных проектов.
- Полностью бесплатная. Хотя Red Hat и обладает платной поддержкой, но CentOS все же является абсолютно бесплатной.

- Удобная графическая оболочка GUI – это не просто дружелюбный интерфейс, а также удобный инструмент для выполнения необходимых действий. CentOS полностью совместима с популярными GUI-пакетами GNOME и KDE.
- Функция создания собственного Live CD, которая помогает получить версию системы с параметрами под нужды определенного проекта.
- Простота обновления и поиска приложений благодаря модулю YUM (Yellow Dog Updater, Modified), что упрощает поиск необходимых файлов, программ, пакетов обновлений, который можно автоматизировать.
- Доступ к аппаратной части сервера, позволяющий производить более точные настройки, которые способны оптимизировать работу [13].

Файловая система CentOS имеет аналогичную иерархическую структуру с системой Linux, она организована в виде дерева с одной исходной вершиной, называемой корневым каталогом. Корневой каталог является родительским каталогом для всей файловой системы Linux. Для обозначения корневого каталога используют символ слеш "/". Рис.3 отражает иерархию данной файловой системы.

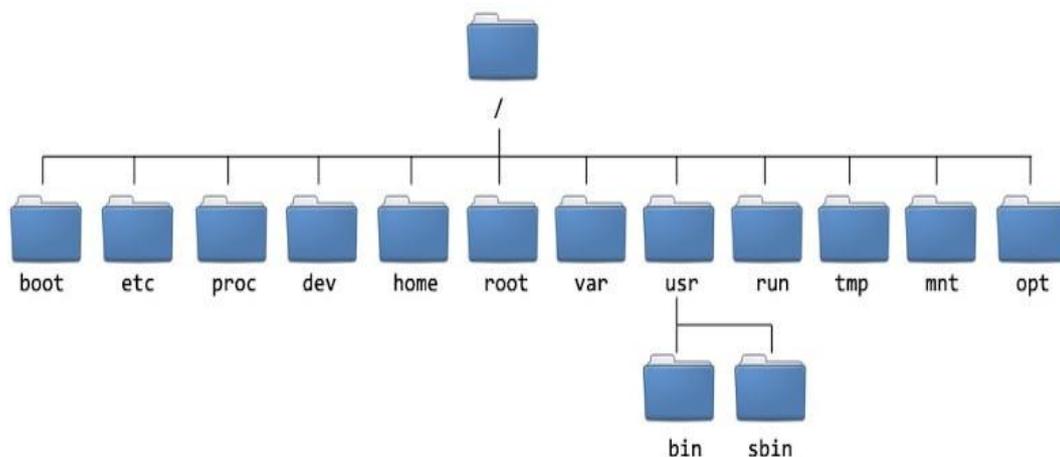


Рис.3. Иерархия файловой системы ОС Linux

Следует отметить, что на операционной системе CentOS работают серверы и центр обработки данных Дата-центра «AzScienceNet». Центр обработки данных играет важную роль при решении сложных задач, требующих больших вычислительных ресурсов и памяти, в институтах и организациях НАНА.

В Дата-центре «AzScienceNet» на базе ОС CentOS был построен вычислительный кластер Rocks cluster. Эта система включает в себя 10 вычислительных машин. Панель управления системы функционирует на установленной в машине ОС CentOS. Процесс присоединения к системе вычислительных узлов производится автоматически. В это время на присоединенные вычислительные узлы и загружается ОС CentOS. Данный процесс загрузки выполняется со стороны управляющей машины.

### Заключение

В статье было проведено исследование доступных видов архитектур суперкомпьютера, а также программных средств и интерфейсов программирования приложений. Был сделан сравнительный анализ программного обеспечения, а также была исследована динамика распределения операционных систем за последний год использования в суперкомпьютерных технологиях. Кроме того, был сделан анализ используемого программного обеспечения CentOS в научной сети «AzScienceNet».

## Литература

1. Воеводин В.В. Суперкомпьютеры: вчера, сегодня, завтра. // Наука и жизнь, 2000, №5, с.76–83.
2. Суперкомпьютеры. <http://wikipedia.org/wiki/Суперкомпьютер>
3. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. СПб. Питер, 2013, 704 с.
4. Суперкомпьютеры Top 500. <http://top500.org/statistics/>
5. Архитектура вычислительных систем. SMP- и MPP-архитектуры. <http://intuit.ru/studies/courses/45/45/lecture/1340>
6. Артемов И.Ю. Кластер высокой доступности программного комплекса автоматизации процедуры сбора данных. // Программные продукты и системы, 2013, №4, с.149–153.
7. Клименко В.П. Комухаев Э.И. Суперкомпьютеры: Тенденции и технологии последнего десятилетия. // Математические машины и системы, 2006, №3, с.146–151.
8. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления, Санкт-Петербург: БХВ, Петербург, 2002, 608 с.
9. Корнеев В.Д. Параллельное программирование мультикомпьютеров в MPI. Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2006, 126 с.
10. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. Питер, 2015.
11. Linux и параллелизм [www.osp.ru/os/2003/05/183012/](http://www.osp.ru/os/2003/05/183012/)
12. Windows HPC Server 2008, знакомство и первый кластер. <http://hpcru.wordpress.com/2011/08/29/whpc2008-first-glance/>
13. Преимущества и недостатки использования ОС CentOS. <http://realhosters.com/ru/vps-os-centos.php>

### UOT 004.9

#### Сəfərzadə Kamran E.

AMEA İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
[kamran@science.az](mailto:kamran@science.az)

**Superkompüter texnologiyalarında istifadə edilən proqram təminatlarının müqayisəli təhlili**  
Məqalədə superkompüterin klaster MPP və SMP kimi arxitektura növlərinin və eləcə də, MPI və PVM əlavələrinin proqram vasitələri və proqramlaşdırma interfeyslərinin təsnifatı nəzərdən keçirilir. Superkompüter texnologiyalarında əməliyyat sistemlərinin son istifadəsi üzrə paylanma dinamikasına görə proqram təminatının müqayisəli analizi təklif olunur. Bundan əlavə, CentOS proqramının "AzScienceNet" elmi şəbəkəsində istifadəsinin effektivliyi təhlil edilir.

*Açar sözlər:* superkompüter, əməliyyat sistemi, proqram təminatı, klaster, SMP arxitektura, MPP arxitektura, MPI, PVM, CentOS.

#### Kamran E. Jafarzada

Institute of Information Technology of ANAS, Baku, Azerbaijan  
[kamran@science.az](mailto:kamran@science.az)

#### Comparative analysis of the software used in supercomputer technologies

The article considers the classification of such types of supercomputer architectures as MPP, SMP and cluster, as well as software and application programming interfaces: MPI and PVM. We also offer a comparative analysis of software in the study of the dynamics of the distribution of operating systems (OS) in the last year of use in supercomputer technologies. In addition, the effectiveness of the use of CentOS software on the scientific network "AzScienceNet" is analyzed.

*Keywords:* supercomputer, operating system, software, cluster, SMP-architecture, MPP-architecture, MPI, PVM, CentOS.