

Г.А. Брякалов, А.И. Захаров, К.А. Неретина, Т.С. Швец

---

## МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

---

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам анализа причин опережающего роста производительности вычислительных средств мирового уровня по сравнению с отечественными, а также оценке факторов, параметров и элементной базы, оказывающих непосредственное влияние на повышение производительности лучших суперкомпьютеров мира. Статья предназначена для инженерно-технических работников, разрабатывающих и эксплуатирующих вычислительную технику.

*Ключевые слова:* суперкомпьютеры, производительность вычислительных средств, параллельное программирование.

G.A. Bryakalov, A.I. Zakharov, K.A. Neretina, T.S. Shvets

---

## METHOD OF COMPARATIVE ASSESSMENT OF CHARACTERISTICS PERFORMANCE OF MODERN SUPERCOMPUTERS

---

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the reasons for the advanced growth in the performance of world-class computing tools compared to domestic ones, as well as the assessment of those factors, parameters and element base that have a direct impact on improving the performance of the best supercomputers in the world. The article is intended for engineering and technical workers who develop and operate computing equipment.

*Keywords:* supercomputers, computing performance, parallel programming.

### *Введение*

Суперкомпьютер (далее – суперЭВМ) – вычислительная машина, значительно превосходящая по своим техническим параметрам большинство существующих компьютеров. Как правило, современные суперкомпьютеры представляют собой совокупность высокопроизводительных серверных компьютеров, соединенных друг с другом локальной высокоскоростной магистралью для достижения максимальной производительности в рамках подхода, связанного, например, с распараллеливанием вычислительных задач [13].

Производительность «обычных», или так называемых «больших» ЭВМ, порой оказывается недостаточной для ряда приложений, например, прогнозирования погоды, ядерной энергетики, обороны и др. Эти обстоятельства стимулировали создание сверхбольших или суперЭВМ. Такие машины обладают колоссальным быстродействием, основанном на выполнении параллельных вычислений и использовании многоуровневых иерархических архитектур.

Стоимость отдельной ЭВМ такого класса достигает сотен миллионов долларов, а само определение понятия «суперкомпьютер» не раз было предметом многочисленных споров и дискуссий.

Впервые термин «суперЭВМ» был использован в начале 60-х годов, когда группа специалистов Иллинойского университета (США) под руководством доктора Слоника предложила идею реализации первой в мире параллельной вычислительной системы. Проект, получивший название SOLOMON, базировался на принципе векторной обработки, который был сформулирован Дж. фон Нейманом в начале 50-х годов [13].

**Брякалов Геннадий Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, информатика, организация вычислительного процесса, программирование. Автор более 100 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vka\_kaf27\_1@mil.ru

**Захаров Анатолий Иванович**

кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, организация параллельного вычислительного процесса, параллельное программирование. Автор более 120 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vka\_kaf27\_1\_1@mil.ru

**Неретина Кристина Андреевна**

инженер учебной лаборатории, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, параллельное программирование. Автор пяти опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vka\_kaf27\_1\_2@mil.ru

**Швец Татьяна Сергеевна**

адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, параллельное программирование, искусственный интеллект.

Электронный адрес: vka\_kaf27\_1\_3@mil.ru

В общеупотребительный лексикон термин «суперкомпьютер» вошел благодаря распространности компьютерных систем Сеймура Крея, таких как, CDC 6600, Cray-1 и Cray-2. Сеймур Крей разрабатывал вычислительные машины, которые становились основными вычислительными средствами правительственных, промышленных и академических научно-технических проектов США с середины 60-х годов до 1996 года. Не случайно, что в то время одним из популярных определений суперкомпьютера было следующее – это «любой компьютер, который создал Сеймур Крей» [13]. Сам же Крей предпочитал использовать обычное название – «компьютер». Помимо перечисленных вариантов использования суперЭВМ важным направлением является их применение при организации параллельных вычислений. Поэтому кратко остановимся на основных положениях параллельного программирования.

*Основные понятия параллелизма*

Прежде всего нужно остановиться на вопросах, раскрывающих суть идеи параллелизма. Из описания систем, способных исполнять несколько программ параллельно, в первую очередь можно выделить следующие:

- многоядерные;
- многопроцессорные;
- многопоточные.

Разные виды параллелизма появлялись в разное время и в несколько непоследовательном порядке. Чаще всего используемый и неоднозначный вид параллелизма называли про-

цессором. В современном мире процессор, или package, – это уже неделимая сущность на материнской плате, представленная одним или несколькими чипами. Поддержка нескольких процессоров в одной системе требует многочисленных изменений в ее структуре [13].

Одними из первых многопроцессорных систем на процессорах Intel стали системы, поставляемые с 1987 года организацией Sequent Computer Systems, а поддержка нескольких чипов в одной системе стала доступной с Intel® Pentium [4; 11].

На данном этапе выявился недостаток, характерный для многих многопроцессорных систем: чем в системе больше процессоров, тем выше ее производительность, однако при этом возрастает стоимость коммуникаций между процессорами, и передача общих данных осуществляется с большими задержками.

Выход из этой ситуации был найден за счет высокой интеграции элементов, когда схемы приблизили друг к другу, разместив их на одном кристалле в виде ядра. Исторически это вылилось в многоядерность, которая проявилась в системе Intel Hyper Threading (далее – НТ). Первые многоядерные процессоры IA-32 от Intel были представлены в 2005 году [5; 11], с тех пор среднее число ядер на разных платформах неуклонно растет, а в Intel Pentium 4 была представлена новая технология (гиперпоток). Как и ядра, гиперпоток делят между собой память с определенного уровня [6; 12]. К тому же НТ – это частный случай того, что в литературе именуется одновременной многопоточностью (SMT).

Наличие НТ позволяет быстро переключать свободные исполняющие узлы к другому архитектурному состоянию и исполнять его инструкции.

Следует отметить, что работа серверных приложений, рассчитанных на машинные архитектуры общего назначения, также имеет потенциал к параллелизму, реализуемому с помощью технологии НТ. Однако этот потенциал быстро «расходуется», поэтому число аппаратных гиперпоточков обычно не превышает двух. На типичных сценариях выигрыш от использования трех и более гиперпоточков невелик, а проигрыш в размере кристалла, его энергопотреблении и стоимости значителен.

Может оказаться так, что в конкретной системе из основных элементов, составляющих параллелизм (процессоры, ядра, гиперпоток, тактовая частота генератора), некоторые будут отсутствовать. На это влияют настройки BIOS (многоядерность и многопоточность отключаются независимо) – это особенности микроархитектуры. Этот многоуровневый параллелизм определяется операционной системой и в конечном счете – прикладными приложениями.

Для удобства количество процессоров, ядер и гиперпоточков в некоторой системе обозначают тройкой  $(x, y, z)$ , где  $x$  – это число процессоров,  $y$  – число ядер в каждом процессоре,  $z$  – число гиперпоточков в каждом ядре. При этом учитывается тактовая частота задающего генератора. Эта тройка называется топологией, а произведение  $p = x \times y \times z$  определяет число, именуемое логическими процессорами системы [7; 10]. Оно определяет полное число независимых прикладных процессов в системе с общей памятью, исполняющихся параллельно, и учитывается операционной системой.

#### *Определение величины производительности суперЭВМ*

Поскольку производительность современных суперЭВМ измеряется во флопсах, поясним сущность этой единицы.

FLOPS (флопс или флоп/с) от англ. **F**loating-point **O**perations per **S**econd – внесистемная единица, используемая для измерения производительности компьютеров, показывающая, сколько операций с плавающей запятой в секунду выполняет данная вычислительная система.

С появлением данных терминов среди специалистов существовали разные мнения: одни считают, что эти термины – синонимы, другие полагают, что FLOP – это количество операций с плавающей запятой, а FLOPS – мера производительности, или способность выполнять определенное количество операций с плавающей запятой за секунду [13].

Одним из важнейших достоинств измерения производительности во флопсах является то, что данная единица до некоторых пределов может быть истолкована как абсолютная величина и вычислена теоретически.

Кроме того, флопс подвержен влиянию очень многих факторов, напрямую не связанных с производительностью вычислительного модуля, таких как пропускная способность каналов связи, производительность основной памяти и синхронность работы памяти разных уровней.

Как и большинство других показателей производительности, данная величина определяется путем запуска на испытуемом компьютере тестовой программы, которая решает задачу с известным количеством операций и подсчитывает время, за которое она была решена.

Наиболее популярным тестом производительности на сегодняшний день являются тесты производительности LINPACK, в частности тест HPL, используемый при испытании и составлении рейтинга суперкомпьютеров TOP500.

При подсчете максимального количества флоп для процессора нужно учитывать, что современные процессоры в каждом своем ядре содержат несколько исполнительных операций (в том числе и для операций с плавающей запятой), работающих параллельно, и могут выполнять более одной инструкции за такт. Данная особенность архитектуры называется суперскалярностью и впервые появилась в ЭВМ CDC 6600 в 1964 году. Массовое производство компьютеров с суперскалярной архитектурой началось с выпуском процессора Pentium в 1993 году. Процессор конца 2000-х Intel Co 2 также является суперскалярным и в каждый такт позволяет достичь пиковой производительности до 4 операций за 1 такт в каждом ядре.

Таким образом, для этого процессора, имеющего в своем составе 2 ядра (Co 2 Duo) и работающего на частоте 3 ГГц, предел производительности составляет

$$2 \times 4 \times 3 \text{ ГГц} = 24 \text{ гигафлопс};$$

для процессора, имеющего в своем составе 4 ядра (Co 2 Quad) и работающего на частоте 3,5 ГГц, теоретический предел производительности составляет

$$4 \times 4 \times 3,5 \text{ ГГц} = 56 \text{ гигафлопс}.$$

Продолжая рассуждать в той же последовательности, можно рассмотреть еще несколько примеров. Так, для процессоров Intel Co i7 2700 и Intel Co i7 3770 пиковая производительность одинарной точности составляет

$$4 \times 16 \times 3,9 \text{ ГГц} = 249,6 \text{ гигафлопс},$$

а для процессора Intel Co i7 4770

$$4 \times 32 \times 3,9 \text{ ГГц} = 499,2 \text{ гигафлопс},$$

что хорошо согласуется с практическими результатами, получаемыми на тесте LINPACK.

Для ряда процессорных микроархитектур известно максимальное количество операций с плавающей точкой, исполняемых за такт в одном ядре [1–3]. Как показал сравнительный анализ производительности мировых суперкомпьютеров, проведенный фирмой LINPACK и представленный в Таблице, в лучшую сторону выделяются первые три.

Расчет и сравнительный анализ производительности суперЭВМ рейтинга ТОП 500

№ п/п	Название	Страна	Производительность	Число ядер	Тактовая частота
1	Frontier	США	1102 Пф	8,7 млн	2,0 ГГц
2	Фугаку	Япония	442 Пф	7,6 млн	2,2 ГГц
3	LUMI	Финляндия	151 Пф	1,1 млн	2,0 ГГц
4	Червоненкис	Россия	21,5 Пф	5,1 млн	2,0 ГГц
5	Галушкин	Россия	16,02 Пф	2,4 млн	2,0 ГГц
6	Ляпунов	Россия	12,8 Пф	2,4 млн	2,0 ГГц

Суперкомпьютер FRONTIER национальной лаборатории Министерства энергетики США включает в себя процессор CPU AMD EPYC 64C 2GHz, 8,7 млн процессорных ядер, ускоритель AMD Instinct MI250X и имеет производительность 1,102 эксафлопс.

Суперкомпьютер FUGAKU производства Японии включает в себя процессор ARM на базе A64fx, 7,6 млн процессорных ядер и имеет производительность 442 петафлопс.

Суперкомпьютер LUMI, размещенный в EUROHPC (Финляндия), включает процессор AMD EPYC 64C 2GHz, 1,1 млн процессорных ядер, ускоритель AMD INSTINCT MI250X и имеет производительность 151 петафлопс.

Российские суперкомпьютеры аппаратно-программного комплекса «Яндекс» построены на базе процессоров AMD EPYC и графических ускорителей NVIDIA A100 с *интерконнектом* (межсоединения в интегральных схемах) INFINIBAND на базе коммутаторов Mellanox [8]. В их основе лежит архитектура NVIDIA HGX A100, оптимизированная для задач машинного обучения.

Суперкомпьютер «Червоненкис» назван так в честь Алексея Червоненкиса, одного из крупнейших теоретиков машинного обучения. Процессоры AMD EPYC включают 5,7 млн процессорных ядер, ускорители NVIDIA A100 80G (1592) и имеют производительность 21,5 петафлопс.

Суперкомпьютер «Галушкин» назван в честь Александра Галушкина, одного из главных исследователей теории нейронных сетей. Процессор AMD EPYC включает 2,4 млн процессорных ядер, ускоритель GPU NVIDIA A100 80G (1088) и имеет производительность 16,02 петафлопс.

Суперкомпьютер «Ляпунов» получил имя в честь Алексея Ляпунова, знаменитого математика, чьи работы лежат в основе компьютерных наук. Процессор AMD EPYC включает 2,4 млн процессорных ядер, ускоритель NVIDIA A100 40G (1096) и имеет производительность 12,8 петафлопс [9].

#### Сравнительная оценка характеристик производительности суперЭВМ

Для сравнительной оценки характеристик был проведен экспериментальный расчет производительности (далее – PR) суперЭВМ, указанных в таблице.

Расчет проводился по следующей схеме:

(количество ядер) × (количество операций с плавающей точкой в одном ядре) × (тактовую частоту генератора) [10].

• Frontier:  $PR = (8,7 \cdot 10^6) \times (6,4 \cdot 10^1) \times (2,0 \cdot 10^9) = 111 \cdot 10^{16} = 1.11 \cdot 10^{18}$  флопс = 1,11 эксафлопс (Эф);

- Fugaku:  $PR = (7,6 \cdot 10^6) \times (3,2 \cdot 10^1) \times (2,2 \cdot 10^9) = 53,50 \cdot 10^{16} = 535 \cdot 10^{15}$  флопс = 535 петафлопс (Пф);
- LUMI:  $PR = (1,11 \cdot 10^6) \times (6,4 \cdot 10^1) \times (2,0 \cdot 10^9) = 14,2 \cdot 10^{16} = 142 \cdot 10^{15}$  флопс = 142 петафлопс (Пф);
- Червоненкис:  $PR = (5,1 \cdot 10^6) \times (0,2 \cdot 10^1) \times (2,0 \cdot 10^9) = 2,04 \cdot 10^{16}$  флопс = 20,4  $\cdot 10^{15}$  флопс = 20,4 петафлопс (Пф);
- Галушкин% PR =  $(2,4 \cdot 10^6 \text{posobie}) \times (0,4 \cdot 10^1) \times (2,0 \cdot 10^9) = 1,92 \cdot 10^{16}$  флопс = 19,2  $\cdot 10^{15}$  флопс = 19,2 петафлопс (Пф).
- Ляпунов:  $PR = (2,4 \cdot 10^6) \times (0,2 \cdot 10^1) \times (2,0 \cdot 10^9) = 0,96 \cdot 10^{16}$  флопс = 9,6  $\cdot 10^{15}$  флопс = 9,6 петафлопс (Пф).

#### *Заключение*

Экспериментальный анализ и расчеты, проведенные в данной работе, показали, что внутри системных средств любого суперкомпьютера всегда находится ряд элементов, которые формируют необходимую и требуемую функциональность всей вычислительной системы. Основой всей вычислительной системы являются: процессор, оперативная память и видеокарта, которые, как правило, подключаются к материнской плате.

Эти комплектующие элементы существенно влияют на производительность системы. Важнейшее и первостепенное место в увеличении производительности суперЭВМ играет число процессоров и их структура, которое определяется количеством ядер и количеством одновременно выполняемых операций (тактов), в том числе операций сложения с плавающей точкой. Чем больше ядер в каждом процессоре и чем больше тактов, выполняемых в каждом ядре, тем выше производительность вычислительных средств суперЭВМ.

Что касается влияния оперативной памяти на производительность системы, то всё сводится к величине емкости и пропускной способности памяти. Чем они больше в допустимых пределах, тем больше оказывают влияние на производительность вычислительных средств суперЭВМ. Оперативная память у каждого типа процессора по емкости немного отличается, но её суммарная пропускная способность сильно зависит от количества процессоров и оказывает негативное влияние на производительность.

Следующим компонентом, влияющим на производительность, является видеокарта. Ее основная задача состоит в формировании изображения на мониторе. Если процессор работает медленно, то основная причина кроется в недостаточной производительности видеокарты. Современные видеокарты являются сложными вычислительными устройствами и могут выполнять многие функции основного компьютера. На них устанавливается свой специализированный графический процессор и собственные микросхемы видеопамати. Так видеокарта A100 80 Гбайтов с технологией HBM2E по сравнению с A100 40 Гбайт обладает удвоенным объемом высокоскоростной памяти и обеспечивает полосу пропускания более 2 терабайт в секунду. Таким образом, объем и пропускная способность памяти влияют на производительность видеокарты. Если материнская плата оснащена сразу двумя разъемами, например, PCIe16, то это уже дает возможность, при желании и финансовых возможностях, устанавливать сразу две видеокарты одновременно в режимах NVIDIA или AMD, объединяя их вычислительные мощности.

Все перечисленные элементы, а именно: число процессоров, наличие в них определенного количества ядер, количество выполняемых в ядрах операций (тактов), оперативная память и видеокарты значительно влияют на производительность суперЭВМ, тем самым определяя их место в рейтинге ТОП 500.

Статья носит прикладной характер и может быть полезна для лиц, интересующихся вопросами разработки и эксплуатации вычислительных средств.

### Литература

1. Балашов Е.П., Пузанков Д.В. Микропроцессоры и микропроцессорные системы: учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1981. 321 с.
2. Гуртовцев А., Гудыменко С.В. Программы для микропроцессоров: справочное пособие. Минск: Высшая школа, 1989. 352 с.: ил.
3. Кэган Б.М., Сташин В.В. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 303 с.: ил.
4. Костров Б.В., Ручкин В.Н. Архитектура микропроцессорных систем. М.: Диалог-МИФИ, 2007. 304 с.
5. Микропроцессоры: учебное пособие для вузов / под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Высшая школа, 1984–1985. 220 с.
6. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. Structured Computer Organization. 5-е изд. СПб.: Питер, 2007. 848 с.
7. Токхайм Р. Микропроцессоры: Курс и упражнения / пер. с англ. В. Н. Грасевича, Л. А. Ильяшенко. М.: Энергоатомиздат, 2001. 335 с.: ил.
8. <http://parallel.ru/computers/taxonomy/handler.html>
9. <https://naukatehnika.com/tri-superkompyutera-ot-yandeksa.html> (Червоненкис, Галушкин, Ляпунов). naukatehnika.com
10. Эффективное программирование современных микропроцессоров: учебное пособие / В.П. Марков, С.Е. Киреев, М.Б. Остапкевич, В.А. Перепелкин. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 148 с. ISBN 978-5-7782-2391-2
11. Intel Corporation. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. 2014. Vol. 3. [www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html](http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html)
12. Kuo Shih. Intel® 64 Architecture Processor Topology Enumeration, 2012, [software.intel.com/en-us/articles/intel-64-architecture-processor-topology-enumeration](http://software.intel.com/en-us/articles/intel-64-architecture-processor-topology-enumeration) (Ядра. Поток).
13. Charles J. Murray. The Supermen: The Story of Seymour Cray and the Technical Wizards Behind the Supercomputer (англ.). Wiley. 1997. 232 p. ISBN 9780471048855

### Literatura

1. Balashov E.P., Puzankov D.V. (1981) *Mikroprotsessory i mikroprotsessornyye sistemy* [Microprocessors and microprocessor systems]. Moscow, Radioi svyaz' Publishing, 321 p. (in Russian).
2. Gurtovtsev A.L., Gudymenko C.B. (1989) *Programmy dlya mikroprotsessorov* [Programs for microprocessors]. Minsk: Vysshaya Shkola Publishing, 352 p. (in Russian).
3. Kagan B.M., Stashin V.V. (1987) *Osnovy proektirovaniya mikroprotsessornykh ustroystv avtomatiki* [Fundamentals of designing microprocessor-based automation devices]. Moscow, Jenergoatomizdat Publishing, 303 p. (in Russian).
4. Kostrov B.V., Ruchkin V.N. (2007) *Arkhitektura mikroprotsessornykh sistem* [Architecture of microprocessor systems]. Moscow, Dialog MIFI Publishing, 304 p. (in Russian).
5. Presnuhina L.N. (ed.) *Mikroprotsessory* [Microprocessors]. Moscow, Wysshaya Shkola Publishing, 1984–1985, 220 p. (in Russian).

6. Tanenbaum E. (2007) *Arhitektura kompyutera* [Computer architecture] Structured Computer Organization. SPb.: Piter Publishing, 848 p. (in Russian).
7. Tokkhaym R. (2001) *Mikroprotsessory: Kurs I uprazhneniya* [Microprocessors: Course and Exercises]. Moscow, Energoatomizdat Publishing, 335 p. (in Russian).
8. <http://parallel.ru/computers/taxonomy/handler.html>
9. <https://naukatehnika.com/tri-superkompyutera-ot-yandeksa.html> (Chervonenkis, Galushkin, Lyapunov). naukatehnika.com
10. Markov V.P., Kireev S.E., Ostapkevich M.B., Perepelkin V.A. (2014) *Effektivnoe programmirovaniye sovremennykh mikroprotsessorov* [Efficient programming of modern microprocessors]. Novosibirsk: NGTU, 148 c. ISBN 978-5-7782-2391-2 (in Russian).
11. Intel Corporation. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. 2014. Vol. 3. [www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html](http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html)
12. Kuo Shih. Intel® 64 Architecture Processor Topology Enumeration, 2012, [software.intel.com/en-us/articles/intel-64-architecture-processor-topology-enumeration](http://software.intel.com/en-us/articles/intel-64-architecture-processor-topology-enumeration).
13. Charles J. Murray. The Supermen: The Story of Seymour Cray and the Technical Wizards Behind the Supercomputer (англ.). Wiley. 1997. 232 p. ISBN 9780471048855