

Г.А. Брякалов, А.И. Захаров, И.С. Петров, Н.А. Гриднев

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Статья посвящена истории развития отечественной элементной базы для средств вычислительной техники. Элементная база используется в настоящее время в качестве основы при разработке современных ЭВМ и суперкомпьютеров. Более детально освещены вопросы, связанные с выбором архитектур микропроцессоров. Отмечена роль микроэлектроники в развитии науки и техники в нашей стране. Приведена типовая методика расчета производительности микропроцессоров для средств вычислительной техники. Материал статьи распространяется на широкий круг проблем и может быть полезен для специалистов, интересующихся вопросами создания элементной базы для средств вычислительной техники в плане его практического применения.

Ключевые слова: средства микроэлектроники, микросхемы, микропроцессоры.

G.A. Bryakalov, A.I. Zakharov, I.S. Petrov, N.A. Gridnev

DEVELOPMENT TRENDS OF DOMESTIC MICROELECTRONICS FOR COMPUTER EQUIPMENT

Abstract. The article addresses the history of the development of the domestic element base for computer equipment. It is currently used as the basis for the development of modern computers and supercomputers. The article highlights in more detail the issues related to the selection of microprocessor architectures, and notes the role of microelectronics in the development of science and technology in our country. The article gives a typical methodology for calculating the performance of microprocessors for computer applications. The article covers a wide range of problems and can be useful for specialists interested in the creation of an element base for computer equipment in terms of its practical application.

Keywords: microelectronics, microchips, microprocessors.

Введение

Упрощенно под интегральной схемой (далее – ИС) понимается собственно кристалл или пленка с нанесенной на них электронной схемой, а под микросхемой (далее – МС) – интегральная схема, заключенная в корпус. Не менее часто используется другой термин – чип. Чип (англ. chip «тонкая пластинка») – это микроэлектронное устройство, электронная схема произвольной сложности, изготовленная на полупроводниковой подложке и помещенная в неразборный корпус [1].

Идея интегральной микросхемы появилась в конце 50-х годов прошлого столетия. Она пришла в голову сразу нескольким талантливым инженерам, но лишь одного из них сегодня считают создателем интегральной микросхемы, а именно Джека Килби – сотрудника Texas Instruments, удостоенного в 2000 году Нобелевской премии по физике за изобретение интегральной микросхемы. 24 июля 1958 года идея нового прибора была им записана в рабочий дневник, 12 сентября он продемонстрировал работающий образец

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 120 опубликованных научных работ. SPIN-код: 7548-0940, AuthorID: 798908.

Электронный адрес: vka_kaf27@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. SPIN-код: 7421-0234, AuthorID: 798392.

Электронный адрес: vka_kaf27@mil.ru

Петров Иван Сергеевич

адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, информатика, программирование. Автор двух опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vka_kaf27@mil.ru

Гриднев Никита Андреевич

курсант 4-го курса кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, информатика, программирование.

Электронный адрес: vka_kaf27@mil.ru

микросхемы, подготовил и подал заявку на патент, а 6 февраля 1959 года получил долгожданный патент [2].

Справедливости ради следует признать, что конструкция германиевой микросхемы Килби была практически непригодна для промышленного освоения, чего нельзя сказать о разработанной Робертом Нойсом кремниевой планарной микросхеме. Роберт Нойс практически одновременно и независимо от Килби разработал свой вариант конструкции интегральной микросхемы и запатентовал его. 6 ноября 1969 года решением апелляционного суда США по делам патентов и таможенных сборов единственным изобретателем микросхемы был признан Роберт Нойс. Верховный суд США подтвердил это решение. Но еще до вынесения судебного решения, в 1966 году, компании договорились о признании друг за другом равных прав на интегральную микросхему, а оба изобретателя – и Килби, и Нойс – были удостоены одинаковых высших наград научного и инженерного сообществ США – National Medal of Science и National Medal of Technology [2].

Но были и другие последователи. Так, 7 мая 1952 года английский радиоинженер Джеффри Даммер описал принцип интеграции компонентов схемы в единый блок. В 1957 году он представил действующий образец первой в мире интегральной микросхемы-триггера на четырех транзисторах. Впоследствии Даммера на родине называли «пророком интегральной микросхемы» [3].

Тенденции развития отечественной микроэлектроники для средств вычислительной техники

Первая микросхема в СССР была создана в 1961 году в Таганрогском радиотехническом институте (ТРТИ) под руководством Л.Н. Колесова. ТРТИ был утвержден головным вузом в системе Минвуза по проблеме создания микроэлектронной аппаратуры высокой надежности и автоматизации ее производства. Л.Н. Колесов был назначен председателем координационного совета по этой проблеме [4].

Первая гибридная толстопленочная интегральная микросхема «Тропа» была разработана в СССР в 1963–1965 годах в НИИ точной технологии, а серийное производство этой микросхемы началось с 1965 года. При этом в разработке принимали участие специалисты НИЭМ (ныне НИИ «Аргон») [4].

Первая полупроводниковая интегральная микросхема была создана в СССР на основе планарной технологии, разработанной в начале 1960 года коллективом НИИ-35, который в дальнейшем был переведен в НИИМЭ («Микрон»). Создание первой отечественной кремниевой интегральной схемы было сконцентрировано на разработке и производстве с военной приемкой серии интегральных кремниевых схем ТС-100. Работы проводились в НИИ-35 и на Фрязинском заводе полупроводников [5].

Разработка отечественных микросхем

В 2015 году Правительство РФ приняло Постановление № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации». Суть документа заключалась в том, чтобы при госзакупках отечественная продукция имела превосходство перед импортной. Также были определены принципы получения статуса отечественной и формирования реестра такой продукции.

Для отечественных микросхем были определены понятия первого и второго уровня. Постановление № 719 ввело критерии, относящие продукцию к тому или иному уровню. Так, чтобы микросхема была второго уровня, права на ее топологию должны были быть зарегистрированы на территории Российской Федерации. При этом сами микросхемы могли быть изготовлены на зарубежных фирмах. Микросхемы первого уровня должны были быть полностью изготовлены на отечественных предприятиях. Вся продукция, признанная отечественной, попадала в реестр отечественной продукции, который ведет Министерство промышленности и торговли.

На практике из общего числа микросхем наиболее часто используются микроконтроллеры, которые относятся к классу схем, применяемых во многих электронных устройствах для осуществления простых вычислительных и других операций [6].

Конструкции всех микроконтроллеров чаще всего формируются из процессора, состоящего из регистров, блока управления и запоминающего устройства, а также периферийных компонентов – портов, преобразователей и др. В соответствии с этим выделяют два вида микроконтроллеров:

- с широким диапазоном выполняемых команд – CISC;
- с простейшим набором команд – RISC.

При достаточно простом устройстве микроконтроллеры могут обеспечивать исправную работу самых разных устройств и используются в различной электронной технике:

- в компьютерах, мобильных и других персональных устройствах;
- в системах автомобилей, самолетов, судов и другого транспорта;
- в автоматически управляемых системах.

По общему назначению действия микроконтроллеров заключаются в контроле работы подключенных к их платформе устройств: включения и выключения, отклю-

чения при достижении определенных показателей, обеспечения бесперебойной работы при переменных параметрах сети.

Виды микроконтроллеров различаются по техническим характеристикам, необходимым для их работы:

- питание микроконтроллера - диапазон изменения напряжения;
- частота тока (чем выше этот показатель, тем выше скорость работы устройства);
- разрядность ядра;
- объем памяти;
- диапазон рабочих температур.

Для иллюстрации отдельные микроконтроллеры и ряд микросхем, применяемых для разработки вычислительных процессоров, серверов и других электронных устройств, приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Типовые отечественные интегральные микросхемы

№ п/п	Фирма	ИМС	Назначение	Количество ядер	Параметры
1	Миландр	K1901BЦ1QI	Микроконтроллер	2	100 МГц
2	Миландр	K1986BK214	Микроконтроллер	1	50 МГц
3	МЦСТ	1891BM01A8	Микропроцессор	8	2000 МГц
4	МЦСТ	1991BG2Я	Контроллер ввода-вывода	1	16 Гб/с
5	Микрон	МК51SC72D	Однокристалльный микропроцессор	1	256 Мб/с
6	Микрон	МК51AB144D-04	Для биометрических паспортов	1	160 Мб/с

Источник: [7].

Разработка микропроцессоров

Микропроцессор (далее – МП) – это устройство, которое отвечает за выполнение арифметических и логических операций, записанных в машинном коде, и реализуется в форме одной микросхемы. Кроме того, в архитектуру микропроцессора входит оперативная память, которая используется для хранения информации, и постоянное запоминающее устройство (далее – ПЗУ) для программного обеспечения. Сегодня без этого элемента сложно представить себе современный компьютер, хотя попытки его создания переносят нас в 70-е годы прошлого века, когда появился первый микропроцессор¹.

История началась в 1969 году, когда одна из японских фирм обратилась к фирме Intel с просьбой сконструировать ряд чипов для электронно-счетных машин. Эту разработку сначала вели инженеры компании Intel Гордон Мур, Роберт Нойс и Эндрю Гроув. В апреле 1970 года в команду Intel пришел итальянский физик Федерико Фаджин, который имел большой опыт работы в сфере логического проектирования компьютеров. Благодаря общим совместным усилиям инженеры Intel смогли соединить микросхемы в общий чип. Так в 1971 году был создан первый микропроцессор Intel 4004 [8].

¹ Процессор Intel® 4004 празднует 40-летие // Конференц-зал Intel. 2011. 15 ноября. URL: https://web.archive.org/web/20120914074545/http://newsroom.intel.com/community/ru_ru/blog/2011/11/15/процессор-intel-4004-празднует-40-летие (дата обращения: 14.06.2024).

Тенденции развития отечественной микроэлектроники для средств вычислительной техники

Впоследствии микропроцессоры Intel претерпели много изменений [9].

Следующие процессоры Intel появились в виде моделей 8008, 8080 и 8088.

Модель Intel 8008 появилась в начале 1970-х годов. По сути, чип представлял собой восьмибитный вариант процессора 4004.

Спустя некоторое время появилось еще одно обновление – чип 8080. Однако в этом случае изменения, внесенные в архитектуру процессора, были намного существеннее.

Микропроцессор Intel 8080 представили в апреле 1974 года, его производство было переведено на новый технологический процесс. В модели 8080 появился более широкий набор команд. Он включал 16 команд передачи и 31 команду для обработки информации. Тактовая частота процессора составила 2 МГц, что в 4 раза превосходило предшественников.

Важно, что был и отечественный аналог процессора 8080 – КР580ВМ80А, который был создан Киевским НИИ микроприборов. В общей сложности было изготовлено несколько версий микропроцессоров, которые за время своего существования претерпели много изменений.

Временем жесткой конкуренции нескольких компаний стал 1979 год. В это время был создан микропроцессор Intel 8088. Он был аналогом 8086, но обладал важным отличием – восьмиразрядной шиной данных. Таким образом, устройство стало связующим элементом между 8- и 16-разрядными процессорами.

Модель микропроцессора 80286, которую создали в компании Intel, обеспечила большую конкуренцию на рынке. Это устройство вышло в 1982 году. Процессор был в 5 раз быстрее, чем 8086, и мог работать со значительно большим объемом памяти. Пользователи могли не менять программное обеспечение. Это было важно, потому что его стоимость многократно превышала цену самого ПК.

Программы, которым требовалось больше 1 Мб оперативной памяти, переключали процессор в особый защищенный режим. В нем устройство могло обеспечивать одновременное функционирование нескольких приложений.

Развитие МП продолжается и в настоящее время.

Сегодня пальму первенства продолжает удерживать Intel. После выпуска очень удачного варианта IntelCore второго поколения компании удается быстро наращивать долю существующего сегодня рынка.

Появление таких микропроцессоров на рынке стало настоящим прорывом в области компьютерных технологий.

Кратко коснемся вопроса о типах МП. По характеру исполняемого кода и организации устройства управления выделяется несколько типов архитектур МП:

1. *Процессор со сложным набором инструкций.* Эта архитектура со сложным устройством управления.

2. *Процессор с упрощенным набором инструкций.* Большинство инструкций RISC-процессора содержат малое число операций.

3. *Процессор с явным параллелизмом.* Отличается тем, что параллельность исполнения операций явно определяется программой.

4. *Процессор с изменяемым набором инструкций.* Архитектура позволяет изменять набор инструкций, каждый раз подстраивая процессор под решаемую задачу [1; 5].

Типы отечественных МП, связанных с количеством ядер и фирмами их производящими, представлены в Таблице 2.

Сводная таблица типовых отечественных микропроцессоров

Фирма	Процессор	Число ядер	Параметры
АО «МЦСТ»			
Линия МЦСТ-R	Эльбрус-1С+	1	24 Гфлопс
	Эльбрус-4СМ	4	50 ГФлопс
	МЦСТ-R2000	8	64 ГФлопс
	Эльбрус-8СМ	8	250 ГФлопс
Линия «ЭЛЬБРУС»			
	Эльбрус-4С	4	50 ГФлопс
	Эльбрус-8С	8	250 ГФлопс
	Эльбрус-16С	16	0.75 ТФлопс
	Эльбрус-32С	32	4 ТФлопс
НИИСИ РАН	КОМDIV-32	1	50 Мфлопс
НИИСИ РАН	КОМDIV-64М	2	90 Мфлопс
Байкал Электроникс	Байкал-Т1	2	1,2 ГГц
Байкал Электроникс	Байкал-М	2	1,5 ГГц
MALT	MALT-F	256	9,8 Тфлопс
МГТУ им. Баумана	Leonhard	24	200 МГц
АО НПЦ «ЭЛВИС»	Мультиком-02	6	1104 МГц

Источник: составлено авторами.

Методика приближенного расчета производительности микропроцессорных средств вычислительной техники

Актуальность разработки методики обусловлена тем, что в современной практике часто возникает необходимость прогноза и получения комплексной оценки максимальных вычислительных возможностей вычислительных средств спецтехники. В связи с этим возникает необходимость решать задачи анализа и расчета отдельных характеристик вычислительных средств [10].

Задача анализа решается для реального состава вычислительных средств, когда необходимо провести расчет их вычислительной мощности.

Содержательная *постановка задачи* анализа вычислительных средств может быть сформулирована следующим образом.

Дано

Вычислительный комплекс (далее – ВК) с соответствующими характеристиками.

Найти

Суммарную производительность реальной вычислительной системы.

В настоящее время понятие *вычислительная мощность ЭВМ* отождествляется с понятием *производительность ЭВМ*, обозначается *PR* и измеряется во флопсах (количество операций с плавающей запятой в секунду), а также производными от них.

Основы методики расчета производительности вычислительных средств включают в себя расчет производительности МП.

Тенденции развития отечественной микроэлектроники для средств вычислительной техники

Для подсчета максимальной производительности процессора нужно учитывать, что современные процессоры в каждом своем ядре содержат несколько микросхем, обрабатывающих потоки разного типа (в том числе и операции с плавающей точкой), работающие параллельно, что позволяет выполнять более одной инструкции за такт, то есть

$$PR = c \times m \times f, \quad (1)$$

где

c – количество ядер в процессоре;

m – количество потоков, работающих за счет ядра;

f – тактовая частота работы микросхемы.

Расчет мощности всей вычислительной системы (далее – ВС), состоящей из n однотипных процессоров, определяется по следующей формуле:

$$PR_{\text{вс}} = PR \times n, \quad (2)$$

где

PR – производительность одного процессора;

n – количество процессоров (серверов), установленных в ВС.

Полностью раскрытая формула расчета производительности многопроцессорных ЭВМ (суперЭВМ) может быть представлена в следующем виде:

$$PR_{\text{(суперЭВМ)}} = \text{количество серверов } (n) \times \text{количество микропроцессоров } (m) \times \\ \times \text{количество ядер } (c) \times \text{количество потоков } (t) \times \text{тактовая частота МП } (f).$$

Основы создания отечественных суперЭВМ первыми заложили наши российские ученые А.К. Ким, В.И. Перекаатов и В.М. Фельдман, которые в 2018 году изложили в открытой печати свои планы разработки аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для создания суперкомпьютера наивысшей производительности в мире [11].

Современные суперЭВМ базируются, например, на МП типа «Эльбрус-16»; первый инженерный образец ВК «Эльбрус-16С» был представлен в октябре 2020 года на выставке «Микроэлектроника-2020».

Для примера приведем расчет производительности суперЭВМ-10П, исходя из характеристик МП «Эльбрус-16СВ», представленных в Таблице 3.

Таблица 3

Характеристики суперЭВМ на микропроцессорах «Эльбрус»

Суперкомпьютер	МП	Год выпуска	Количество серверов	Количество МП	Количество ядер	Производительность МП (Гфлопс)
СуперЭВМ-1П	«Эльбрус-8СВ», 2018	2019	1000	4000	32 000	280
СуперЭВМ-10П	«Эльбрус-16СВ», 2021	2022	3500	14000	220000	750
СуперЭВМ-100П	«Эльбрус-16СВ», 2021	2023	35000	140000	2200000	750

Источник: составлено авторами с привлечением материала [11].

Подставив необходимые значения, получим величину производительности суперЭВМ-10П:

$$PR_{\text{(суперЭВМ-10П)}} = 3,5 \cdot 10^3 \times 14 \cdot 10^3 \times 22 \cdot 10^4 \times 7,5 \cdot 10^2 = 8085 \cdot 10^{12} = 8,1 \cdot 10^{15} \text{ Пфлопс.}$$

Заключение

Анализ состояния и развития микроэлектроники показал, что в настоящее время резко встал вопрос о необходимости наращивания внутреннего потенциала страны в плане разработки и производства разнообразных микроэлектронных средств.

Правительство РФ ведет разработку программы развития микроэлектронной отрасли. Предполагается, что общее финансирование составит порядка 3,5 трлн руб. на период до 2030 года, так как создание всеохватывающей экосистемы по микроэлектронному производству в России требует больших финансовых вложений. К основным работам для развертывания собственного микроэлектронного производства специалистами относятся:

- оборудование;
- комплектующие и расходные материалы;
- рынок сбыта.

Согласно планам развития российской микроэлектроники до 2030 года, представленным Минпромторгом, уровень проектирования микросхем и чипов должен вырасти до мировых стандартов.

На прошедшем форуме «Микроэлектроника-2023» опрошенные специалисты в качестве серьезных проблем называли:

- нехватку экспертизы;
- недостаток квалифицированных специалистов в области микроэлектроники.

Это, конечно, не может помешать эффективно использовать инвестиции, запланированные на развитие отрасли и подготовку новых инженерных кадров.

Литература

1. Аванесян Г.Р., Беспалов А.А. Униполярные интегральные микросхемы : Справочное пособие. М. : Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2003. 220 с. ISBN 5-256-01690-3.
2. Kilby J. Origins of the Integrated Circuit // Huff H.R., Gösele U., Tsuya H. (Eds). Silicon Materials Science and Technology : Proceedings of the Eighth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology. San Diego, May 4–8, 1998. Vol. 98. No. 1. The Electrochemical Society, 1998. P. 342–349. ISBN 9781566771931.
3. Даммер Дж.У.А., Гриффин Н. Надежность радиоэлектронной аппаратуры : Пер. с англ. : В 2 кн. М. : Отд. науч.-техн. информации, 1961. Кн. 1. 190 с. Кн. 2. 160 с.
4. Колесов Л.Н. Введение в инженерную микроэлектронику. М. : Советское радио, 1974. 280 с.
5. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров, микросборок. 3-е изд. СПб. : Лань, 2009, 400 с. ISBN 978-5-8114-0766-8.
6. Шагурин И.И. Современные микроконтроллеры и микропроцессоры Motorola : Справочник. М. : Горячая линия – Телеком, 2004. 952 с. ISBN 5-93517-162-7.
7. Парфёнов О.Д. Технология микросхем : Учеб. пособие для вузов. М. : Высшая школа, 1986. 318 с.
8. Костров Б.В., Ручкин В.Н. Архитектура микропроцессорных систем. М. : Диалог-МИФИ, 2007. 304 с. ISBN 5-86404-214-5.
9. Палагута К.А. Микропроцессор INTEL 8086 (K1810BM86) и его программирование. М. : МГИУ, 2007. 104 с. ISBN 978-5-276-01321-3. EDN QMRWXT.
10. Брякалов Г.А., Захаров А.И., Неретина К.А., Швец Т.С. Методика сравнительной оценки характеристик производительности современных суперкомпьютеров // Вестник российского нового

Тенденции развития отечественной микроэлектроники для средств вычислительной техники

университета. Серия: сложные системы: модели, анализ и управление. 2023. № 3. С. 128–135. EDN YSMKET. DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.03.P.128

11. Ким А.К., Перекатов В.И., Фельдман В.М. На пути к российской экзасистеме: планы разработчиков аппаратно-программной платформы «Эльбрус» по созданию суперкомпьютера экзафлопсной производительности // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 6–13. EDN YNHQGH.

References

1. Avanesyan G.R., Bepalov A.A. (2003) *Unipolyarnye integral'nye microskhemy* [Unipolar Integrated Circuits] : Reference Guide. Moscow : Radio i svyaz', Goryachaya liniya – Telekom Publ. 220 p. ISBN 5-256-01690-3. (In Russian).
2. Kilby J. (1998) Origins of the Integrated Circuit. In: Huff H.R., Gösele U., Tsuya H. (Eds). *Silicon Materials Science and Technology : Proceedings of the Eighth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology*. San Diego, May 4–8, 1998. Vol. 98. No. 1. The Electrochemical Society, 1998. Pp. 342–349. ISBN 9781566771931.
3. Dummer G.W.A., Griffin N.B. (1960) *Electronics Reliability – Calculation and Design: Electrical Engineering Division*. Wiley. 274 p. (Russian edition: Moscow : Science and Technology Information Division Publ., 1961. In 2 vols.)
4. Kolesov L.N. (1974) *Vvedenie v inzhenernyuyu microelektroniku* [Introduction to Engineering Microelectronics]. Moscow : Sovetskoe radio Publ. 280 p. (In Russian).
5. Koledov L.A. (2009) *Tekhnologiya i konstruksii microskhem, microprotessorov, microborok* [Technology and design of chips, microprocessors, microassemblies]. 3rd edition. St. Petersburg :Lan' Publ. 400 p. ISBN 978-5-8114-0766-8. (In Russian).
6. Shagurin I.I. (2004) *Sovremennye mikrokontrollery i microprotessory Motorola* [Modern Motorola microcontrollers and microprocessors]. Moscow : Goryachaya liniya – Telecom Publ. 952 p. ISBN 5-93517-162-7. (In Russian).
7. Parfenov O.D. (1986) *Tekhnologiya microskhem* [Microchip technology] : Textbook for universities. Moscow : Vysshaya shkola Publ. 318 p. (In Russian).
8. Kostrov B.V., Ruchkin V.N. (2007) *Arkhitektura microprotessornykh system* [Microprocessor system architecture]. Moscow : Dialog – MIFI Publ. 304 p. ISBN 5-86404-214-5. (In Russian).
9. Palaguta K.A. (2007) *Microprotessor INTEL 8086 (K1810BM86) i ego programmirovaniye* [Microprocessor INTEL 8086 (K1810BM86) and its programming]. Moscow : Moscow State Industrial University Publ. 104 p. ISBN 978-5-276-01321-3. (In Russian).
10. Bryakalov G.A., Zakharov A.I., Neretina K.A., Shvets T.S. (2023) Method of comparative assessment of performance characteristics of modern supercomputers. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management*. No. 3. Pp. 128–135. DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.03.P.128 (In Russian).
11. Kim A.K., Perekatov V.I., Fel'dman V.M. (2018) On the way to Russian Exasystems: Plans of the Elbrus hardware-software platform developers on creation of an exaflops performance supercomputer. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of Radio electronics]. No. 2. Pp. 6–13. (In Russian).