

# Многокритериальный выбор вычислительных кластеров\*

Г. В. Ройзензон<sup>1</sup>

Рассматривается задача сравнения и выбора вычислительных кластеров, обладающих требуемыми для прикладных применений параметрами, как задача многокритериального стратегического выбора. Выбор варианта кластера производится на основе многих критериев, среди которых могут быть как количественные, так и качественные. Предложены способы формирования набора таких критериев, исходя из технических и стоимостных характеристик аппаратных средств, составляющих кластер. Показана схема применения нового метода вербального анализа решений для многокритериального выбора вычислительного кластера.

## Введение

В настоящее время существует достаточно много прикладных и научных задач, требующих для своего решения больших вычислительных мощностей, предоставляемых суперкомпьютерными технологиями. Высокопроизводительные вычисления необходимы в самых различных областях, в таких как обработка потоков информации в распределенных базах данных, автоматизация проектирования, компьютерное управление производственными процессами, анализ фондового рынка, управление сотовой связью, моделирование погоды, биоинформатика, биохимия, биофизика, теплофизика, динамика жидкостей и газов, электромагнетизм, исследование генома человека, исследование прочности материалов и др. Необходимость в разработке более дешевой аппаратной части суперкомпьютеров побудила обратить более пристальное внимание на кластерные технологии.

---

\* Работа частично поддержана грантом Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ 1964.2003.1, Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 04-01-00290, 05-01-00666), Российской академией наук (программы фундаментальных исследований РАН «Математическое моделирование и интеллектуальные системы» и ОИТВС РАН «Фундаментальные основы информационных технологий и систем»).

<sup>1</sup> 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 9, ИСА РАН, [rgv@isa.ru](mailto:rgv@isa.ru), [royzenzon@yahoo.com](mailto:royzenzon@yahoo.com).

Впервые термин «кластер» ввела компания Digital Equipment Corporation (DEC). По определению DEC, кластер — это группа вычислительных машин, которые связаны между собою и функционируют как один узел обработки информации [Савяк, 2002]. Кластеры можно разделить на две большие категории. Первая категория — кластеры высокой готовности или отказоустойчивые кластеры [Климанов, 2002]. Для таких кластерных систем на первое место выходит понятие надежности. Вторая категория — высокопроизводительные или вычислительные кластеры. Для этой категории главным является производительность. Кластеры можно также разделить на однородные и неоднородные. Кластеры, состоящие из вычислительных узлов одной и той же конфигурации, называются однородными. Кластеры, состоящие из вычислительных узлов различной конфигурации — неоднородными.

В данной работе акцент сделан на однородные вычислительные кластеры (далее вычислительные кластеры). По способам объединения вычислительные кластеры можно разделить на две группы. К первой группе относятся тесно связанные вычислительные кластеры или многопроцессорные рабочие станции. Ко второй — умеренно связанные вычислительные кластеры или вычислительные кластеры, которые используют технологии построения локальных сетей. В качестве узлов умеренно связанных вычислительных кластеров могут выступать как обычные однопроцессорные персональные компьютеры, так и многопроцессорные рабочие станции.

Активное развитие кластерных технологий обусловлено тем, что, используя стандартные компоненты: — обычные процессоры, материнские платы, сетевые компоненты, и т. п., которыми буквально «завален» весь мировой рынок, — стало возможным создание значительно более дешевых вычислительных комплексов не только не уступающих, но и порой превосходящих по производительности продукцию известных фирм, например, таких как Cray. С учетом изменения политической ситуации в мире в России стали доступны современные суперкомпьютерные технологии. Начиная с 2001 г. существенно упрощен процесс экспорта из США суперкомпьютерных технологий и аппаратных платформ, пригодных для создания суперкомпьютеров.

Очень важным моментом для продвижения на рынке вычислительных кластеров является явная тенденция к снижению стоимости аппаратных решений для сетевых высокоскоростных протоколов передачи данных, в частности, Gigabit Ethernet. Другим существенным моментом служит совершенствование и удешевление микропроцессоров, являющихся основными компонентами вычислительных узлов кластеров. Удалось заметно

повысить их быстродействие и одновременно понизить энергопотребление и тепловыделение, что также очень важно для построения больших вычислительных кластеров. Во второй половине 2003 г. появились массовые микропроцессоры, имеющие аппаратную поддержку 64-разрядных вычислений. Применение в процессорах Intel Itanium технологии EPIC (архитектура с явным параллелизмом исполнения команд) весьма перспективно для проведения параллельных вычислений. В этом году должны появиться процессоры, содержащие несколько ядер и т. д.

Все это сделало возможным создавать из стандартных и относительно недорогих компонентов достаточно производительные вычислительные кластеры, имеющие производительность 15–25 Гфлопсов (1 млрд вычислений с плавающей запятой в секунду), что еще несколько лет назад было и очень дорого, и технологически сложно. Модульная структура вычислительного кластера позволяет гибко и последовательно наращивать его производительность за счет добавления новых вычислительных узлов. При этом даже морально устаревшие модули могут использоваться и в дальнейшем. В отличие от рабочих станций, у которых существует «потолок» по модернизации, для вычислительных кластеров такая проблема стоит не настолько остро.

Принимая во внимание многообразие процессоров, сетевых технологий, программных продуктов для выполнения расчетов и т. п., перед конечным пользователем, заинтересованным в использовании вычислительного кластера для решения своих конкретных вычислительных задач, стоит достаточно непростая задача выбора конфигурации вычислительного кластера. В то же время любые инвестиции в данное направление являются достаточно долгосрочными (5–7 лет). Это, в свою очередь, накладывает дополнительную ответственность на лицо, принимающее решение (ЛПР), которое осуществляет выбор подобного вычислительного комплекса для своих целей. В данной работе рассматривается многокритериальная задача сравнения и выбора вычислительных кластеров, предназначенных для решения прикладных задач пользователя.

## **1. Содержательная постановка задачи**

### **1.1. Составление перечня выбираемых кластеров**

Предварительным этапом выбора вычислительного кластера является составление перечня возможных вариантов, из которого будет выбран наиболее предпочтительный вычислительный кластер. Выбор вычислительного кластера зависит от следующих основных факторов:

**Используемая прикладная программа** предъявляет определенные требования к характеристикам аппаратной платформы, что накладывает ограничения на выбор конфигурации вычислительных кластеров или отдельных компонентов вычислительных кластеров. Прикладная программа обуславливает также выбор операционной системы и кластерного программного обеспечения. Важность этого фактора заключается в том, что для решения задачи пригодны не все, а только вполне определенные прикладные программы, стоимость которых может быть на порядок больше, чем стоимость вычислительного кластера.

**Размерность счетной задачи и необходимый временной выигрыш** позволяют определить требуемые производительность, минимальный суммарный объем и тип оперативной памяти, суммарный объем и тип дискового пространства. Это, в свою очередь позволяет выбрать ту или иную базовую аппаратную платформу, а также влияет на выбор типа процессора.

**Точность расчетов.** Чем выше требуемая точность, тем больше времени нужно для расчета. В ряде случаев этот фактор оказывает влияние на выбор типа процессора.

**Интенсивность обмена данными между вычислительными узлами** позволяет выбрать технологию построения сети вычислительного кластера.

Удовлетворять указанным требованиям могут:

1. Существующие конфигурации вычислительных кластеров от различных производителей, предназначенных для решения конкретных вычислительных задач (постановка 1).
2. Специально построенные конфигурации вычислительных кластеров, состоящие из компонентов, совместимых между собой и совместимых с заранее заданным прикладным программным обеспечением (постановка 2). В ситуации, когда после конфигурирования получается несколько вариантов вычислительных кластеров, задача сводится к постановке 1.

Разница между данными двумя постановками состоит в том, что во втором случае необходимо предварительно «отсеять» либо «технологически невозможные» варианты кластеров, либо возможные, но не совместимые с программным обеспечением. В условиях, когда существует множество различных архитектур процессоров, сетевых технологий и т. д., выбор вычислительного кластера под конкретное программное обеспечение для расчетов и оценка совместимости всех возможных комбинаций аппаратных решений

с конкретным программным обеспечением для расчетов является крайне сложной задачей, которая в данной статье не рассматривается.

Важно отметить, что «универсальные» вычислительные кластеры мало распространены. Это связано со сложностью расчетных программ, которые накладывают достаточно жесткие ограничения на «железо» и не позволяют устанавливать в вычислительный кластер «что попало». Таким образом, при отборе вычислительного кластера для его включения в список на одно из первых мест выходит условие совместимости компонентов вычислительного кластера и используемого прикладного программного обеспечения для расчетов.

Информацией о совместимости различных компонентов вычислительного кластера и программного обеспечения обладают эксперты. В качестве экспертов выступают как конечные пользователи, так и разработчики программных и аппаратных средств. Информация от экспертов позволяет существенно сократить количество вариантов вычислительных кластеров для последующего сравнения и выбора наилучшего из них для целей конечного пользователя.

Итак, на предварительном этапе постановки задачи выбора вычислительного кластера для решения конкретных вычислительных задач необходимо сформировать перечень возможных конфигураций вычислительных кластеров, который может включать в себя и вычислительные кластеры определенных производителей, и конфигурации вычислительных кластеров, предложенные экспертами. Вошедшие в перечень варианты вычислительных кластеров должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- совместимость компонентов вычислительного кластера с имеющимся программным обеспечением для выполнения расчетов;
- приемлемая производительность вычислительного кластера;
- приемлемая стоимость вычислительного кластера.

### ***1.2. Подходы к решению задачи выбора***

Задача выбора наиболее предпочтительного вычислительного кластера из имеющегося перечня конфигураций относится к классу задач стратегического выбора, которые характеризуются следующими особенностями:

- имеется сравнительно немного (не более 10) вариантов, из которых нужно выбрать один, наилучший;
- варианты оцениваются по многим критериям, среди которых могут быть как количественные, так и качественные критерии, при этом последние преобладают;

- рассматриваемые варианты, как правило, являются несравнимыми по своим оценкам;
- существует большая неопределенность в оценках вариантов по критериям, неустранимая на момент принятия решений;
- принимаемое решение относится к будущему, и его последствия имеют долгосрочный характер;
- имеется ЛПП, несущее основную ответственность за результат принятия решений;
- задачей ЛПП является выбор наилучшего варианта, соответствующего его целям.

Выбор того или иного принципа решения задачи является важным методологическим этапом [Петровский, 1996]. Известны различные подходы к решению задачи стратегического выбора наиболее предпочтительного варианта. Так, в литературе широко представлены методы, основанные на применении математического аппарата, который базируется на активном использовании понятия «взвешенных сумм». Такой подход более известен как теория многокритериальной полезности (Multi-Attribute Utility Theory — MAUT) [Кини и др., 1981; Кини, 1983].

Например, в статье [Иванов, 2003] рассматривается процедура принятия решения по выбору сложной технической системы, в данном случае корпоративного сервера, которая базируется на использовании «взвешенных сумм». Методология выбора серверов для решения прикладных задач является ключевым моментом статьи. Помимо инженерно-технических аспектов, в этой статье в процессе выбора учитывается множество эксплуатационных, экономических, политических и психологических факторов. Отметим, что задачи выбора корпоративного сервера и вычислительного кластера достаточно близки, так как основаны на анализе сходных технических характеристик.

По нашему мнению, использование подхода MAUT для решения задачи выбора сложной технической системы не всегда целесообразно по следующим причинам. Метод MAUT рекомендуется применять для решения задач с большим числом альтернатив, оцененным по небольшому числу критериев. Однако, и в случае выбора серверов, и в случае выбора вычислительных кластеров, как правило, сравниваемых вариантов не много (не более 10), и они характеризуются большим числом признаков. Кроме того, обычно все варианты несравнимы друг с другом по своим характеристикам. Построение многомерной функции полезности требует больших временных затрат. В частности, в работе [Кини, 1983] описана подобная процедура, которая потребовала восьми часов работы ЛПП. Когда альтер-

натив много и возможна ситуация, при которой к имеющимся альтернативам добавятся в будущем еще и дополнительные, то такие временные затраты оправданы. В противном случае имеет смысл применить другую методологию.

Количественная оценка некоторых критериев, используемых для сравнения вычислительных кластеров или серверов, носит искусственный характер. В качестве примера приведем критерий — «функциональная эффективность». Оценки по упомянутым критериям в большинстве случаев дают эксперты, и они плохо поддаются расчету [Авен, 1981; Рытиков и др., 1988; Vergu, 2001; ROI, 2001]. Использование же балльной шкалы оценок по критериям не учитывает особенности системы переработки информации человека (особенно, если выбирается градация из 7 и более оценок).

Поэтому при оценке объектов по критериям и назначении весов критериев могут возникнуть различные ошибки. Есть ряд работ, посвященных этому вопросу [Фишхоф и др., 1984; Подиновский, 2000; Ногин, 2002], которые показывают, что методы MAUT чувствительны к ошибкам в числовых измерениях. И, наконец, строго доказано [Кини и др., 1981], что использование взвешенной суммы критериальных оценок корректно только в том случае, когда критерии попарно не зависимы по предпочтению.

Для решения поставленной задачи выбора вычислительного кластера предлагается использовать подход, который базируется на принципах, заложенных в методах вербального анализа решений [Ларичев, 2002; Ларичев и др., 1996]. Вербальный анализ решений ориентирован на так называемые слабо структурируемые задачи, где качественные и субъективные факторы доминируют. Методы вербального анализа решений имеют психологическое обоснование. В них используются такие операции получения информации от ЛПР и экспертов, которые по результатам проведенных психологических экспериментов, считаются надежными [Ройзензон и др., 2002; Larichev et al., 2003]. Кроме того, информация, получаемая от ЛПР, проверяется на непротиворечивость, а выявленные противоречия предъявляются лицу, принимающему решения, для анализа и разъяснения. В методах этой группы используются лишь вербальные оценки альтернатив по критериям, к которым не применяются количественные преобразования. Оценка и сравнение могут проводиться как для всех гипотетически возможных, так и для конкретных альтернатив.

Особенность рассматриваемых объектов выбора (сложные технические системы, в частности, вычислительные кластеры) состоит в том, что они характеризуются большим числом показателей.

Поскольку вариантов немного, то обычно все варианты несравнимы друг с другом по своим характеристикам. И предлагаемые методы решения задачи выбора лучшего объекта применять неэффективно. Поэтому для использования одного из методов вербального анализа решений необходимо решить еще одну вспомогательную, но крайне важную задачу: построить процедуру, которая позволяет агрегировать большое число базовых (технических, эксплуатационных, стоимостных) характеристик вычислительного кластера в небольшое число критериев, имеющих порядковые шкалы оценок (количественные и качественные). Можно ожидать, что сокращенное описание объектов позволит упростить процедуру решения исходной задачи выбора. Рассмотрим возможные пути к решению этой вспомогательной задачи.

## 2. Формирование набора критериев

Выбор критериев и формирование шкал оценок является задачей, которая решается ЛПР самостоятельно или с привлечением системного аналитика. Предлагаются следующие подходы к ее решению [Ройзензон, 2004].

Первоначально составляется перечень всех базовых показателей, характеризующих отдельные компоненты кластера, кластер в целом и условия его эксплуатации. Характеристики, описывающие вычислительный кластер, можно представить в виде иерархической системы, нижним уровнем которой служат выделенные базовые показатели. Например, процессор характеризуется такими базовыми показателями как архитектура, тактовая частота, объем кэша второго и третьего уровня, поддерживаемая частота системной шины. Некоторые из базовых показателей удобно объединять в составные показатели, которые выступают как оценки следующего уровня иерархии. После классификации эти общие оценки наполняются конкретным содержанием.

Следующим этапом является формирование вспомогательных шкал оценок для каждого базового показателя. Шкалы могут иметь числовые точечные, интервальные или вербальные (словесные) оценки. Шкалы оценок могут совпадать с обычно используемыми на практике, либо конструироваться специально для данного критерия. Например, производительность вычислительного кластера оценивается в Гфлопсах, стоимость — в миллионах рублей. Для сокращения размерности описания объекта часто бывает удобно перейти от непрерывной шкалы оценки к дискретной шкале, имеющей небольшое число оценок на шкале, и от количественной шкалы к качественной шкале. Например, можно оцени-



вать стоимость оценками «низкая», «средняя», «высокая», указав для каждой из оценок соответствующие интервалы величин. Все сформированные оценки ЛПР должно упорядочить от лучшей к худшей. Примеры таких упорядоченных шкал оценок базовых показателей приведены в следующем разделе.

Далее ЛПР по своему усмотрению определяет число и состав критериев, их содержание. В качестве критерия можно выбрать один из базовых показателей (например, производительность, стоимость) или несколько характеристик, объединенных в составной критерий. ЛПР устанавливает, какие технические и эксплуатационные показатели будут считаться самостоятельными критериями, а какие будут отнесены к тому или иному составному критерию. Шкалы простых критериев, являющихся базовыми показателями, уже построены на предыдущем этапе. Для формирования шкал оценок по составным критериям можно воспользоваться несколькими процедурами.

Наиболее простым способом конструирования порядковой шкалы для составного критерия является использование однотипных наборов порядковых вербальных шкал базовых показателей и объединение одинаковых оценок в одну общую оценку по принципу: все лучшие оценки по базовым показателям образуют лучшую оценку по составному критерию, все средние оценки — среднюю, все худшие оценки — худшую.

Более сложные процедуры предполагают применение методов ЗАПРОС и ЦИКЛ [Ларичев и др., 1996; Асанов и др., 2001], в которых необходимо рассматривать множество всех возможных векторных оценок в критериальном пространстве, образованном декартовым произведением значений оценок на шкалах критериев. Метод ЗАПРОС позволяет построить единую порядковую шкалу, формируя ее из оценок по отдельным частным критериям, с помощью которой производится частичное упорядочение многопризнаковых объектов. Метод ЦИКЛ предназначен для построения полной непротиворечивой порядковой классификации многопризнаковых объектов. В нашем случае в качестве таких многопризнаковых объектов выступают наборы оценок по базовым показателям, образующим составной критерий. При формировании шкалы оценок составного критерия важно также учесть, что одна часть характеристик, входящих в состав подобного критерия, может рассматриваться как самостоятельная, а другая часть характеристик может быть составной. Поэтому процедура построения шкалы составного критерия сама может состоять из нескольких этапов.

Сконструированные критерии, имеющие порядковые шкалы оценок, используются для решения первоначальной задачи многокритериального

выбора наилучшего вычислительного кластера. После перехода от числовых или вербальных оценок базовых показателей к критериальным оценкам может случиться так, что варианты вычислительных кластеров станут сравнимыми и, более того, некоторый вариант (или некоторые) окажется наилучшим. Если же наилучший вариант сразу выделить нельзя, то для его нахождения можно воспользоваться одним из методов вербального анализа решений, например ПАРК [Ларичев и др., 1996] или КОМПАС [Ашихмин и др., 2001]. В этом случае размерность описания такой новой задачи многокритериального выбора и сложность ее решения будут существенно меньше исходной.

### **3. Базовые характеристики вычислительного кластера**

На основе анализа литературы [Фортов и др., 2002; Климанов и др., 2002; Картунов, 2002; Дымченко, 2003; Савяк, 2002; Ройзензон, 2003; Иванилов, 2003; Щукин, 2004] был предложен список характеристик вычислительного кластера. Характеристики вычислительного кластера можно разделить на несколько групп. К первой отнесем технические характеристики кластера (процессор, базовая аппаратная платформа, технология построения сети, оперативная память, дисковая память). Используемая операционная система и кластерное программное обеспечение составляют вторую группу. Производными от них является третья группа показателей: производитель технических и программных средств; производительность кластера; стоимость кластера (группа «Обобщенные характеристики»). И, наконец, в последнюю группу («Эксплуатационные характеристики») входят: энергопотребление, тепловыделение, уровень шума и условия окружающей среды. Рассмотрим группы характеристик вычислительного кластера более подробно и покажем, как можно сформировать порядковые шкалы оценок для этих характеристик, считая их простыми критериями.

#### **3.1. Технические характеристики**

##### **3.1.1. Процессор**

Прежде всего, отметим, что в рамках поставленной задачи выбора вычислительного кластера рассматриваются только широко распространенные процессоры. В настоящий момент лидерство на мировом рынке принадлежит процессорам, которые выпускают компании Intel и AMD. Альтернативные решения на базе RISC-процессоров, которые до послед-

него времени доминировали на рынке, крайне дороги и зачастую базируются на «закрытых» технологиях. Процессоры можно классифицировать по четырем основным характеристикам: архитектура, тактовая частота, поддерживаемая частота системной шины, объем кэша второго и третьего уровня.

По архитектуре процессоры, представленные различными производителями, можно разделить на три группы: 32-разрядные, 32-разрядные с частичной поддержкой 64-разрядных вычислений и 64-разрядные. Например, к первой группе можно отнести 32-разрядные процессоры: Intel Pentium III (Tualatin), Intel Xeon (Prestonia), Intel Pentium 4 (Northwood, Prescott); ко второй — AMD Athlon 64 и Intel Xeon (Nocona). И, наконец, к третьей группе можно отнести 64-разрядные процессоры: Itanium 2 (Madison). Данный список, конечно, можно еще дополнить, т. к. микропроцессорная отрасль бурно развивается и новые процессоры, имеющие дополнительные архитектурные особенности появляются буквально каждый квартал. Например, в этом году должны появиться массовые многоядерные процессоры и этот архитектурный аспект нужно будет учитывать.

Тактовая частота процессора делится на следующие три группы: 1) высокая (2,8 ГГц и выше); 2) средняя (2–2,8 ГГц); 3) низкая (менее 2 ГГц).

Поддерживаемая процессором частота системной шины может быть разделена на аналогичные группы: 1) высокая (800 МГц и более); 2) средняя (533 МГц); 3) низкая (400 МГц и менее).

Суммарный объем кэша второго и третьего уровня процессора также можно разделить на три группы: 1) большой (1 Мб и более); 2) средний (512 Кб); 3) малый (256 Кб).

С учетом выше изложенного шкала оценок может иметь следующий вид:

*(П1) Перспективный процессор:*

Архитектура процессора поддерживает все современные 32- и 64-разрядные инструкции. Поддерживает высокую тактовую частоту. Процессором поддерживается высокая частота системной шины. Процессор оснащен кэшем второго и третьего уровня большого объема.

*(П2) Современный процессор:*

Архитектура процессора поддерживает большинство современных инструкций. Процессор поддерживает среднюю тактовую частоту. Процессором поддерживается средняя частота системной шины. Процессор оснащен кэшем второго и третьего уровня среднего объема.

(ПЗ) *Устаревающий процессор:*

Большинство современных инструкций архитектура процессора не поддерживает. Процессор поддерживает низкую тактовую частоту. Процессором поддерживается низкая частота системной шины. Процессор оснащен кэшем второго и третьего уровня малого объема.

### **3.1.2. Базовая аппаратная платформа**

Главной характеристикой базовой аппаратной платформы служит количество процессоров, составляющих узел, который является одним из основных элементов построения вычислительного кластера. Узлы могут быть однопроцессорными и многопроцессорными (под многопроцессорностью понимается возможность физической установки нескольких процессоров). Возможность работы с тем или иным количеством процессоров определяется системной логикой (чипсетом), на котором основана системная плата, которая входит в состав базовой аппаратной платформы.

Чипсеты различаются по поддерживаемым типам процессора, выпускаемым разными производителями. Например, в однопроцессорных платформах используются следующие чипсеты (естественно этот список можно расширить): Intel-i815 (Pentium III), i845 (Pentium 4), i850 (Pentium 4), i865 (Pentium 4), i875P (Pentium 4), i915 (Pentium 4), i925 (Pentium 4); AMD-8151 (Athlon); VIA-K8T400M (Athlon); NVIDIA-nForce2 (Athlon).

В многопроцессорных узлах платформ применяются: Intel-i860 (2 процессора Intel Xeon), E750x (2 процессора Intel Xeon), E8870 (до 4 процессоров Intel Itanium 2); AMD-8000 (2 процессора Opteron); Server Works-Server Set III HE SL (2 процессора Pentium III).

Важной особенностью базовых аппаратных платформ является возможность установки различных плат расширений (особенно высокопроизводительных PCI-X и PCI-Express). Прежде всего, этот аспект важен с точки зрения возможности установки производительных контроллеров жестких дисков и скоростных сетевых контроллеров.

Помимо системной платы в базовую аппаратную платформу входит корпус. Одной из составляющих корпуса, с позиции модернизации узла вычислительного кластера, является установленный блок питания. По поддерживаемой мощности блоки питания можно разделить на три группы: 1) большая мощность (450 Вт и более); 2) средняя мощность (350–450 Вт); 3) малая мощность (менее 350 Вт).

Необходимо отметить, что возможность «горячей» замены блоков питания для узлов вычислительных кластеров не столь критична, как скажем для серверов.

Таким образом, базовые аппаратные платформы можно разделить следующим образом:

(АП1) *Перспективная базовая аппаратная платформа:*

Поддерживает многопроцессорные конфигурации. Имеется возможность устанавливать перспективные процессоры. Имеется возможность устанавливать высокоскоростные контроллеры. Корпус оснащен блоком питания большой мощности.

(АП2) *Современная базовая аппаратная платформа:*

Многопроцессорные конфигурации не поддерживаются. Имеется возможность устанавливать современные процессоры. Возможность устанавливать высокоскоростные контроллеры ограничена. Корпус оснащен блоком питания средней мощности.

(АП3) *Устаревающая базовая аппаратная платформа:*

Многопроцессорные конфигурации не поддерживаются. Поддерживаются только устаревающие процессоры. Возможности устанавливать высокоскоростные контроллеры нет. Корпус оснащен блоком питания малой мощности.

### **3.1.3. Технология построения сети**

Технология построения сети определяется необходимой скоростью межсетевого взаимодействия, количеством вычислительных узлов, необходимостью в будущем добавления новых узлов при модернизации кластера.

Скорость межсетевого взаимодействия можно разделить на три категории: 1) высокоскоростная (Scalable Coherent Interface — SCI (400 Мб/сек) или Myrinet (240 Мб/сек); 2) быстрая (Gigabit Ethernet (1000 Мбит/сек)); 3) медленная (Fast Ethernet (100 Мбит/сек)).

Число вычислительных узлов для вычислительных кластеров начального уровня можно условно разделить на три категории: 1) большое (число узлов более 16); 2) среднее (число узлов 8–16); 3) небольшое (менее 8).

Возможности добавления новых узлов при необходимости модернизации кластера определяются характеристиками используемого сетевого концентратора.

Таким образом, технология построения сети может быть представлена следующим образом:

(ПС1) *Перспективная технология построения сети:*

Построена на высокоскоростном межсетевом взаимодействии, есть возможность установить большое количество вычислительных узлов.

(ПС2) *Технология построения сети отвечает текущим требованиям:*

Построена на быстром межсетевом взаимодействии, есть возможность установить среднее количество вычислительных узлов.

(ПС3) *Устаревая технология построения сети:*

Построена на медленном межсетевом взаимодействии, есть возможность установить малое количество вычислительных узлов.

#### **3.1.4. Оперативная память**

Оперативную память вычислительного кластера, которая складывается из памяти всех вычислительных узлов (для умеренно связанных вычислительных кластеров), можно классифицировать по общему объему и по типу. Суммарный объем оперативной памяти делится на следующие категории: 1) сверхбольшой (более 8 Гб); 2) большой (4–8 Гб); 3) средний (2–4 Гб); 4) малый (менее 2 Гб). Последние категории объема памяти (средний и малый) характерны, в основном, для кластеров, построенных на базе устаревших вычислительных узлов.

Можно выделить следующие типы оперативной памяти:

- SDRAM (PC100, PC133) — тип памяти, относящийся, в основном, к устаревшим платформам, в частности, на базе процессора Pentium III;
- RIMM — тип памяти времен становления производительных систем на базе процессора Pentium 4, производительность этого типа памяти для ряда задач, решаемых с помощью вычислительного кластера, остается вполне приемлемой;
- DDR SDRAM (DDR200, DDR266, DDR333, DDR400) — тип памяти, поддерживаемый всеми современными системами;
- DDR2 SDRAM (DDR2-400, DDR2-533) — новый тип памяти, который еще мало распространен, постепенно должен вытеснить DDR SDRAM.

В зависимости от решаемой задачи и используемого программного обеспечения для расчетов типы оперативной памяти можно упорядочить.

Желательно (для большинства вычислительных задач), чтобы оперативная память, которая используется в узлах вычислительного кластера, имела поддержку технологии Error Correction Code (ECC). Эта технология позволяет обнаруживать и исправлять сбои (ошибки) при работе с памятью.

Таким образом, шкала характеристики «Оперативная память» может быть представлена следующим образом:

(ОП1) *Общий объем и тип оперативной памяти отвечает требованиям задачи и имеется возможность ее увеличения в будущем:*

Вычислительный кластер оснащен большим объемом оперативной памяти перспективного типа.

(ОП2) *Общий объем и тип оперативной памяти отвечает требованиям расчетной задачи, однако большого резерва по наращиванию ее объема нет:*

Вычислительный кластер оснащен средним объемом оперативной памяти современного типа.

(ОП3) *Наращивание объема оперативной памяти ограничено:*

Вычислительный кластер оснащен малым объемом оперативной памяти устаревающего типа.

### **3.1.5. Дисковая память**

Дисковую память вычислительного кластера, как и оперативную память, можно классифицировать по суммарному объему, который складывается из объема дисковой памяти всех вычислительных узлов, и по типу. Объем дисковой памяти подразделяется на следующие группы: 1) большой (более 500 Гб); 2) средний (от 100 до 500 Гб); 3) малый (менее 100 Гб).

По типу дисковой памяти можно выделить:

- SCSI (Ultra 160, Ultra 320) — на данный момент высокопроизводительный тип дисковой памяти, правда и самый дорогостоящий. SCSI-диски имеют наибольший срок безотказной работы и рассчитаны на большую нагрузку;
- Serial ATA (150, 300 (в будущем)), производительный тип;
- Parallel ATA (100, 133) — на данный момент самый распространенный тип дисковой памяти, если брать в расчет весь спектр вычислительной техники. Parallel ATA-диски, с точки зрения стоимости гигабайта информации, крайне привлекательны, но не рассчитаны на серьезную нагрузку. Parallel ATA-диски относятся к устаревающему типу.

Таким образом, порядковая шкала характеристики «Дисковая память» может быть представлена следующим образом:

(ДП1) *Общий объем и тип дисковой памяти отвечает требованиям задачи и имеется возможность ее увеличения в будущем:*

Вычислительный кластер оснащен большим объемом дисковой памяти высокопроизводительного типа.

(ДП2) *Общий объем и тип дисковой памяти отвечает требованиям расчетной задачи, однако большого резерва по наращиванию ее объема нет:*

Вычислительный кластер оснащен средним объемом дисковой памяти производительного типа.

(ДП3) *Наращивание объема дисковой памяти ограничено:*

Вычислительный кластер оснащен малым объемом дисковой памяти устаревающего типа.

## **3.2. Программные характеристики**

### **3.2.1. Операционная система**

Используемая операционная система напрямую связана с расчетной программой, которая будет эксплуатироваться на вычислительном кластере. Большинство современных вычислительных кластеров работает под управлением семейства операционных систем Windows NT Server 4.0/2000/2003 или многочисленных клонов систем Linux/Unix.

### **3.2.2. Кластерное программное обеспечение**

Кластерное программное обеспечение представляет собой набор специализированных библиотек программирования, служащих для построения параллельных программ и использующих модель обмена сообщениями. Наиболее распространенными библиотеками являются MPI. Существуют реализации MPI для языков программирования C/C++ и Fortran (как в бесплатных, так и коммерческих вариантах) для большинства распространенных суперкомпьютерных платформ [Крюков, 2003]. В последнее время появились «высокоуровневые» библиотеки для создания параллельных программ [Кутепов и др., 2004]. В ряде случаев кластерное программное обеспечение может быть встроено либо в операционную систему, либо в расчетный пакет.

## **3.3. Обобщенные характеристики**

### **3.3.1. Производители технических и программных средств**

С точки зрения качества продукции и ее распространенности на мировом рынке, производителей технических и программных средств можно разделить условно на три категории (в порядке уменьшения привлекательности): 1) всемирно известный (мировой бренд); 2) достаточно хорошо известный; 3) малоизвестный.

### **3.3.2. Производительность кластера**

Производительность вычислительного кластера зависит от его технических характеристик и является одним из важнейших показателей,



влияющих на его выбор. Производительность вычислительных средств принято измерять в Гфлопсах. Большинство вычислительных кластеров начального уровня, как правило, имеют производительность 15–25 Гфлопсов, которая измеряется по количественной порядковой шкале [SPEC CPU2000, 2004; Linpack, 2004; Щукин, 2004].

### **3.3.3. Стоимость кластера**

Стоимость вычислительного кластера складывается из стоимости всех компонентов вычислительного кластера, стоимость измеряется в порядковой шкале.

### **3.3.4. Стоимость владения**

Важно также отметить, что, помимо стоимости вычислительного кластера, существуют также дополнительные расходы, связанные с его эксплуатацией. Такие расходы принято называть еще стоимостью владения. Следует подчеркнуть, что удобно рассматривать отдельно стоимость вычислительного кластера и стоимость владения. Это связано с тем, что достаточно распространен случай, когда сравнительно дешевый вычислительный кластер может иметь высокую стоимость владения и тогда выбор вычислительного кластера не столь очевиден. Сложность расчета стоимости владения связана с тем, что при этом необходимо учитывать так называемые данные нефинансового характера. Стоимость владения формируется на основе совокупных затрат, связанных со стоимостью обучения специалистов (в случае необходимости), эксплуатирующих вычислительный кластер, с фондом заработной платы и с рядом других факторов. На стоимость владения влияют также затраты, необходимые для организации условий нормальной эксплуатации вычислительного кластера (см. ниже). В частности, речь идет о затратах на организацию специализированного помещения, на организацию системы кондиционирования, на организацию специализированной системы электропитания (достаточно важный аспект, если энергопотребление составляет 3–5 кВт). Таким образом, стоимость владения можно разделить на низкую, среднюю и высокую.

## **3.4. Эксплуатационные характеристики**

Характеристиками, влияющими на эксплуатацию вычислительного кластера, являются энергопотребление, уровень шума, тепловыделение, условия окружающей среды (температура и влажность). Рассмотрим эти аспекты более подробно.

### 3.4.1. Энергопотребление

Энергопотребление, измеряется в киловаттах. Несмотря на то, что современные технологии позволили снизить энергопотребление и тепловыделение для большого числа компонентов, входящих в состав вычислительных узлов, при числе узлов больше 8 эта характеристика влияет на сложность эксплуатации. В ряде случаев высокое энергопотребление вычислительного кластера требует модернизации электросети.

Можно предложить следующую порядковую шкалу: ЭП1 — высокое энергопотребление (более 4 кВт); ЭП2 — среднее энергопотребление (от 2 до 4 кВт); ЭП3 — низкое энергопотребление (менее 2 кВт).

### 3.4.2. Тепловыделение

Если для эксплуатации вычислительного кластера уровень тепловыделения становится критическим, то этот аспект может повлечь за собой установку соответствующей системы кондиционирования. Тепловыделение принято измерять в Британских тепловых единицах (БТЕ) в час.

Можно предложить следующую порядковую шкалу: ТВ1 — высокое тепловыделение (более 400 БТЕ/ч); ТВ2 — среднее тепловыделение (200–400 БТЕ/ч); ТВ3 — низкое тепловыделение (менее 200 БТЕ/ч).

### 3.4.3. Уровень шума

Уровень шума, принято измерять в децибелах (дБ). Нужно отметить, что даже один вычислительный узел может обладать определенным заметным уровнем шума (от охлаждающих вентиляторов, например). Поэтому в ситуации, когда имеется несколько вычислительных узлов, на уровень шума следует обратить внимание. Например, при оборудовании помещения для вычислительного кластера это может потребовать использования специализированных звукоизоляционных материалов.

Можно предложить следующую порядковую шкалу: УШ1 — высокий уровень шума (более 60 дБ); УШ2 — средний уровень шума (от 40 до 60 дБ); УШ3 — низкий уровень шума (менее 40 дБ).

### 3.4.4. Условия окружающей среды

Прежде всего, необходимо рассмотреть следующие характеристики окружающей среды: температура воздуха (°C) и влажность (%). Для обеспечения требуемых условий окружающей среды, как и в п. 3.4.2, может потребоваться установка соответствующей системы кондиционирования помещения, где будет располагаться вычислительный кластер.

Можно предложить следующую порядковую шкалу: ОС1 — кластер предъявляет повышенные требования к условиям окружающей среды;

ОС2 — повышенные требования к условиям окружающей среды не предъявляются.

В качестве альтернативной системы представления шкалы эксплуатационных характеристик может быть предложена система соответствия определенным ГОСТам (например, для уровня шума ГОСТ 12.1.003-83: соответствует/частично соответствует/не соответствует).

Таким образом, для критерия «Эксплуатационные характеристики» можно предложить следующую порядковую шкалу:

*(Э1) Вычислительный кластер не предъявляет серьезных требований по организации условий эксплуатации:*

Низкое энергопотребление. Низкое тепловыделение. Низкий уровень шума. Повышенные требования к условиям окружающей среды не предъявляются.

*(Э2) Вычислительный кластер предъявляет незначительные требования по организации условий эксплуатации:*

Среднее энергопотребление. Среднее тепловыделение. Средний уровень шума. Кластер предъявляет повышенные требования к условиям окружающей среды.

*(Э3) Вычислительный кластер предъявляет повышенные требования по организации условий эксплуатации:*

Высокое энергопотребление. Высокое тепловыделение. Высокий уровень шума. Кластер предъявляет повышенные требования к условиям окружающей среды.

Рассмотренные выше эксплуатационные характеристики могут быть связаны с определенными дополнительными текущими финансовыми затратами. Этот аспект естественным образом усложняет эксплуатацию вычислительного кластера.

#### **4. Критерии оценки вычислительного кластера**

Исходя из рассмотренных выше базовых характеристик вычислительного кластера, были предложены четыре критерия оценки вычислительного кластера и разработаны шкалы их оценок. В качестве самостоятельных критериев для сравнения вычислительных кластеров были выбраны такие базовые характеристики как стоимость и производительность кластера, а также сконструированы составные критерии: возможность модернизации и сложность эксплуатации кластера. Рассмотрим возможную аргументацию в пользу выбора такого набора критериев.

#### **4.1. Стоимость и производительность кластера**

Необходимость учета стоимости и производительности вычислительно-го кластера как самостоятельных критериев уже обсуждалась ранее.

#### **4.2. Возможность модернизации кластера**

Технические характеристики, представленные в разделе 3.1, могут рассматриваться не только с точки зрения решения конкретных текущих задач, но и с точки зрения срока морального устаревания вычислительной техники. Срок морального устаревания вычислительного кластера в 2–3 раза (на сегодняшний день) выше, чем срок устаревания рабочих станций. За этот период необходимость модернизировать (и, возможно, ремонтировать) вычислительный кластер может возникнуть не один раз.

Модернизация может затрагивать как вычислительные узлы (замена процессора, увеличение объема оперативной памяти и т. д.), так и технологию построения сети (переход на более быструю). Например, можно выбрать вычислительный кластер, оснащенный более дорогими процессорами, функционал которых в данный момент может быть задействован не полностью по причине отсутствия поддержки со стороны программного обеспечения. Зато в будущем возможности программного обеспечения для расчетов позволят задействовать функционал процессора в полной мере, и его замена не потребуется. Особенно данный аспект важен с точки зрения поддержки 64-разрядных вычислений, что крайне важно для расчетных задач. На данный момент программное обеспечение, поддерживающее 64-разрядные вычисления, для процессоров Intel и AMD мало распространено. В частности, этот аспект сдерживает продвижение на рынок процессора Intel Itanium 2. Тем не менее сфера применения вычислительных кластеров постоянно будет «подстегивать» разработчиков программного обеспечения включить в свои продукты такую поддержку.

Очень важным моментом является поиск компромисса между количеством вычислительных узлов (для умеренно связанных вычислительных кластеров) и скоростью межсетевое взаимодействие. По большому счету, данная проблема вполне может рассматриваться как самостоятельная задача [Стародубцев, 2003; Шукин, 2004], тесно связанная с выбором программного продукта, который будет использоваться совместно с вычислительным кластером. С одной стороны, чем больше вычислительных узлов, тем быстрее счет. А с другой стороны, при увеличении числа узлов растет и сетевой трафик, что может привести к обратному эффекту, как, например, к падению производительности, если скорость межсетевое взаимодействие станет узким местом. Поэтому при проектировании сети необходим достаточно существенный запас

«прочности» для того, чтобы в будущем иметь возможность модернизировать вычислительный кластер, например, добавить новые узлы.

В равной степени подобный подход может быть применен для большинства технических характеристик вычислительного кластера.

Возможность модернизации также напрямую связана с понятием ремонтпригодности.

Порядковая шкала оценок по критерию, сконструированная наиболее простым способом, включает в себя следующие оценки:

**Высокая.** Вычислительные узлы оснащены перспективным процессором, перспективными базовыми аппаратными платформами. Вычислительный кластер использует перспективную технологию построения сети. Общий объем и тип оперативной памяти отвечает требованиям задачи и имеется возможность ее увеличения в будущем. Общий объем и тип дисковой памяти отвечает требованиям задачи и имеется возможность ее увеличения в будущем.

**Средняя.** Вычислительные узлы оснащены современными процессорами, современными базовыми аппаратными платформами. Технология построения сети отвечает текущим требованиям. Общий объем и тип оперативной памяти отвечает требованиям расчетной задачи, однако большого резерва по наращиванию ее объема нет. Общий объем и тип дисковой памяти отвечает требованиям расчетной задачи, однако большого резерва по наращиванию ее объема нет.

**Низкая.** Вычислительные узлы оснащены устаревающими процессорами, устаревающими базовыми аппаратными платформами. Вычислительный кластер использует устаревающую технологию построения сети. Наращивание объема оперативной памяти ограничено. Наращивание объема дисковой памяти ограничено.

Таким образом, в составной критерий «Возможность модернизации кластера» входят следующие базовые технические характеристики, являющиеся простыми критериями: процессор, базовая аппаратная платформа, технология построения сети, оперативная память и дисковая память.

### ***4.3. Сложность эксплуатации кластера***

Сложность эксплуатации вычислительных кластеров во многом определяется характеристиками производителей технических и программных средств. Это связано с тем, что тот или иной производитель, с точки зрения корпоративных пользователей, а именно на этот рынок нацелены вычислительные кластеры, ассоциируется с тем или иным уровнем гаран-

тийного и послегарантийного обслуживания, уровнем технической поддержки и т. д. Важно также отметить, что на многих предприятиях существует так называемый «корпоративный стандарт», что очень часто предопределяет конечный выбор любой вычислительной техники, даже если по ряду важных характеристик она проигрывает конкурирующим решениям. При выборе производителя важно также выяснить его финансовое состояние. Тип операционной системы и кластерного программного обеспечения предъявляет серьезные требования к квалификации специалистов, которые будут эксплуатировать вычислительный кластер. Также необходимо учитывать аспекты, связанные с упущенной выгодой (по причине того, что вычислительный кластер был либо не внедрен на предприятии вообще, либо внедрен с опозданием) и оплатой ошибочных решений. Это еще раз указывает на то, что задачу выбора вычислительного кластера можно рассматривать как задачу стратегического выбора.

С учетом вышеизложенного, есть веские основания для рассмотрения побочных затрат, необходимых для организации условий эксплуатации вычислительного кластера.

Таким образом, в составной критерий «Сложность эксплуатации кластера» входят следующие базовые характеристики: производитель, условия эксплуатации (энергопотребление, тепловыделение, уровень шума и требования к условиям окружающей среды) и стоимость владения. Порядковая шкала оценок по критерию, сконструированная наиболее простым способом, включает в себя следующие оценки:

**Низкая.** Вычислительная техника представлена всемирно известным производителем. Вычислительный кластер не предъявляет серьезных требований по организации условий эксплуатации. Вычислительный кластер обладает низкой стоимостью владения.

**Средняя.** Вычислительная техника представлена достаточно хорошо известным производителем. Вычислительный кластер предъявляет незначительные требования по организации условий эксплуатации. Вычислительный кластер обладает средней стоимостью владения.

**Высокая.** Вычислительная техника представлена малоизвестным производителем. Вычислительный кластер предъявляет повышенные требования по организации условий эксплуатации. Вычислительный кластер обладает высокой стоимостью владения.

### 5. Иллюстративный пример

Предположим, что перед ЛПР стоит задача выбора вычислительного кластера из трех, представленных различными производителями вычисли-

тельной техники. Расчетная программа работает под управлением операционной системы Linux Red Hat 8.0, в качестве кластерного программного обеспечения выступает набор библиотек MPI. Базовые характеристики вычислительных кластеров представлены в табл. 1. Оценки вычислительных кластеров по предложенному набору критериев приведены в табл. 2.

Как следует из таблиц, во втором случае все варианты кластеров сравниваются по гораздо меньшему набору показателей, однако по-прежнему остаются несравнимыми. Для выбора лучшего вычислительного кластера может быть использован один из методов вербального анализа решений, в частности ПАРК, ЗАПРОС [Ларичев и др., 1996] или КОМПАС [Ашихмин и др., 2001].

## 6. Выводы

С каждым годом с учетом многообразия новых аппаратных решений и появления новых различных программных продуктов, специалистам в области информационных технологий становится все сложнее отслеживать новинки и, соответственно, правильно осуществлять выбор сложных технических систем. В данной работе в качестве примера подобной технической системы рассматриваются вычислительные кластеры. Подобные задачи особенно актуальны для организаций, предоставляющих консалтинговые услуги в области информационных технологий.

Рассмотренный подход позволяет решать достаточно широкий круг задач выбора различных технических и программных средств. Подход позволяет ЛПР существенно сократить время, необходимое для выбора наиболее предпочтительного вычислительного кластера, и воспользоваться услугами экспертов. При этом нет необходимости самостоятельно проводить достаточно сложное тестирование многочисленных вариантов конфигураций вычислительных кластеров совместно с программным обеспечением, что, зачастую, просто невозможно, исходя из чисто технических и организационных аспектов.

В рамках рассматриваемого подхода предложена процедура построения составных критериев путем агрегирования более простых критериев. Важной особенностью процедуры является возможность сформировать разные наборы критериев, с тем, чтобы сравнить полученные результаты для разных вариантов с целью оценки качества выбора. Методика агрегирования базовых характеристик объекта в составные критерии оценки была опробована на примере решения практической задачи многокритериального выбора вычислительных кластеров.

Таблица 1

Базовые характеристики вычислительных кластеров

№	Вычислительный кластер / характеристика	№ 1	№ 2	№ 3
<b>1</b>	<b>Технические характеристики</b>			
1.1	Процессор	Xeon 2,6 ГГц, 533 FSB, 1 Мб cache L2	Pentium 4,3 ГГц, 800 МГц FSB, 512 kb cache L2	Pentium III (Tualatin), 1,4 ГГц, 133 МГц FSB, 512 kb cache L2
1.2	Базовая аппаратная платформа	Intel E7505 (SE7505VB2), мощность блока питания 450 Вт	Intel 875P (Bonanza), мощность блока питания 350 Вт	Intel i815EP-B, мощность блока питания 250 Вт
1.3	Технология построения сети	Gigabit Ethernet 4 узла (16)	Gigabit Ethernet 4 узла (8)	Fast Ethernet (100 MBit) 8 узлов (8)
1.4	Оперативная память	8 Гб, DDR266 ECC	16 Гб, DDR400 ECC	8 Гб, SDRAM, PC133
1.5	Дисковая память	120 Гб, SCSI Ultra 320	640 Гб, IDE, U100	320 Гб, IDE, U100
<b>2</b>	<b>Программные характеристики</b>			
2.1	Операционная система	Linux Red Hat 8.0	Linux Red Hat 8.0	Linux Red Hat 8.0
2.2	Кластерное программное обеспечение	MPI	MPI	MPI
<b>3</b>	<b>Обобщенные характеристики</b>			
3.1	Производители технических и программных средств	«А»	«В»	«С»
3.2	Производительность кластера, Гфлопс	15	12	9
3.3	Стоимость кластера, млн рублей	0,6	0,45	0,3



Продолжение таблицы 1

Базовые характеристики вычислительных кластеров

№	Вычислительный кластер / характеристика	№ 1	№ 2	№ 3
<b>3.4</b>	<b>Эксплуатационные характеристики</b>			
3.4.1	Энергопотребление, кВт	3	4	2
3.4.2	Тепловыделение, БТЕ/ч	150	420	360
3.4.3	Уровень шума, дБ	35	50	65
3.4.4	Условия окружающей среды	температура от 10 до 35 °С, влажность от 10 до 90 %	температура от 10 до 25 °С, влажность от 5 до 75 %	температура от 15 до 30 °С, влажность от 15 до 65 %

Таблица 2

Оценки вычислительных кластеров по критериям

№	Вычислительный кластер / критерий	№ 1	№ 2	№ 3
А	Стоимость, млн рублей	0,6	0,45	0,3
Б	Производительность, Гфлопс	15	12	9
В	Возможность модернизации	высокая	средняя	Низкая
Г	Сложность эксплуатации	средняя	средняя	Высокая

Автор выражает глубокую признательность А. Б. Петровскому за ряд важных методологических и редакторских замечаний, а также благодарность коллегам за помощь при подготовке данного материала. Крайне полезными были советы и замечания О. В. Михеева (руководитель NC Group/НВК «ВИСТ») и И. Ю. Тимофеева (инженер NC Group/НВК «ВИСТ»).

## Литература

- [Авен, 1981] Авен О. И. Что же такое АСУ? М.: Наука, 1981. 175 с.  
 [Асанов и др., 2001] Асанов А. А., Борисенков П. В., Ларичев О. И., Нарыжный Е. В., Ройзензон Г. В. Метод многокритериальной классификации ЦИКЛ и его применение для анализа кредитного риска // Экономика и математические методы, 2001. Т. 37. № 2. С. 14–21.

- [Ашихмин и др., 2001] *Ашихмин И. В., Ройзензон Г. В.* Выбор лучшего объекта на основе парных сравнений на подмножествах критериев // *Методы поддержки принятия решений: Сб. трудов ИСА РАН / Под ред. О. И. Ларичева.* М.: УРСС, 2001. С. 51–71.
- [Дымченко, 2003] *Дымченко Л.* Развитие технологии SSE в новых процессорах Intel Prescott. 2003. [Electron. resource] // Mode of access: [www.fcenter.ru/articles.shtml?processors/6111](http://www.fcenter.ru/articles.shtml?processors/6111).
- [Иванов, 2003] *Иванов Е. И.* Некоторые аспекты выбора серверов // *Иванов Е. И. Корпоративные системы.* 2003. № 4. С. 34–36.
- [Картунов, 2002] *Картунов В.* Симфония Соль мажор для Opteron и Athlon 64. 2002 [Electron. resource] // Mode of access: [www.ixbt.com/cpu/amd-hammer-family.shtml](http://www.ixbt.com/cpu/amd-hammer-family.shtml).
- [Кини и др., 1981] *Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
- [Кини, 1983] *Кини Р. Л.* Размещение энергетических объектов: выбор решений. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
- [Климанов и др., 2002] *Климанов В. П.* Задачи катастрофоустойчивости кластерных вычислительных систем // *Климанов В. П., Сутягин М. В., Быстрикова В. А. Новости искусственного интеллекта.* 2002. № 3(51). С. 22–30.
- [Крюков, 2003] *Крюков В. А.* Разработка параллельных программ для вычислительных кластеров и сетей // *Информационные технологии и вычислительные системы.* 2003. № 1–2. С. 42–59.
- [Кутепов и др., 2004] *Кутепов В. П., Бажанов С. Е.* Функциональное параллельное программирование: язык, его реализация и инструментальная среда разработки программ // *Труды Международной научной конференции «Суперкомпьютерные системы и их применение» (SSA-2004).*
- [Ларичев и др., 1996] *Ларичев О. И., Мошкович Е. М.* Качественные методы принятия решений. М.: Физматлит, 1996. 208 с.
- [Ларичев, 2002] *Ларичев О. И.* Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах. 2-е изд. М.: Логос, 2002. 392 с.
- [Ногин, 2002] *Ногин В. Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физматлит, 2002. 176 с.
- [Петровский, 1996] *Петровский А. Б.* Компьютерная поддержка принятия решений: современное состояние и перспективы развития // *Системные исследования. Методологические проблемы: Ежегодник.* М.: УРСС, 1996. С. 146–178.
- [Подиновский, 2000] *Подиновский В. В.* Количественная важность критериев // *Автоматика и телемеханика.* 2000. № 5. С. 110–123.
- [Ройзензон и др., 2002] *Ройзензон Г. В., Фуремс Е. М.* Исследования возможностей человека при сравнении трехкритериальных альтернатив // *Труды Восьмой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2002).* Т. 1. М.: Физматлит, 2002. С. 511–518.

- [Ройзензон, 2003] *Ройзензон Г. В.* СППР для выбора вычислительных кластеров // Труды международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (IEEE AIS'03) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2003). Т. 1. М.: Физматлит, 2003. С. 443–448.
- [Ройзензон, 2004] *Ройзензон Г. В.* Выбор вычислительных кластеров на основе анализа количественной и качественной информации // Искусственный интеллект. Т. 2. Донецк: Наука і освіта, 2004. С. 375–379.
- [Рытиков и др., 1988] *Рытиков А. М., Ройтман Е. Я., Шафрин Ю. А.* Что мешает эффективному внедрению типовых АСУ? // Цветные металлы. 1988. № 1. С. 98–101.
- [Савяк, 2002] *Савяк В.* Эффективные кластерные решения [Electron. resource] // Mode of access: [www.ixbt.com/cpu/clustering.shtml](http://www.ixbt.com/cpu/clustering.shtml).
- [Стародубцев, 2003] *Стародубцев М. А.* Производительность газодинамического пакета STAR-НРС на вычислительном кластере из персональных компьютеров на базе процессоров Intel. 2003. [Electron. resource] // Mode of access: [www.cadfem.ru/gallery/yours/doc/cluster\\_report.zip](http://www.cadfem.ru/gallery/yours/doc/cluster_report.zip).
- [Фишхоф и др., 1984] *Фишхоф Б., Гойтейн Б., Шаниро З.* Субъективная ожидаемая полезность: модель принятия решений // Процедуры оценивания многокритериальных объектов. М.: ВНИИСИ, 1984. № 9. С. 53–68.
- [Фортов и др., 2002] Создание и применение системы высокопроизводительных вычислений на базе высокоскоростных сетевых технологий / Фортов В. Е., Савин Г. И., Левин В. К. и др. // Информационные технологии и вычислительные системы. 2002. № 1. С. 3–9.
- [Шукин, 2004] *Шукин А.* Анализ производительности 64- и 32-разрядных многопроцессорных вычислительных систем в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики STAR-CD. 2004. [Electron. resource] // Mode of access: [www.ixbt.com/cpu/star-cd-test.shtml](http://www.ixbt.com/cpu/star-cd-test.shtml).
- [Berry, 2001] *Berry J.* Tools Bring ROI Into Focus. 2001. [Electron. resource] // Mode of access: [www.internetweek.com/indepth01/indepth120501.htm](http://www.internetweek.com/indepth01/indepth120501.htm).
- [Larichev et al., 2003] Human behavior in a multi-criteria choice problem with individual tasks of different difficulties / Larichev O. I., Furems E. M., Roizenzon G. V. et al. // International Journal of Information Technology and Decision Making. 2003. Vol. 2. № 1. P. 29–40.
- [Linpack, 2004] The Linpack Benchmark. [Electron. resource] // Mode of access: [www.top500.org/lists/linpack.php](http://www.top500.org/lists/linpack.php).
- [SPEC CPU2000, 2004] First Quarter 2004 SPEC CPU2000 Results. 2004. [Electron. resource] // Mode of access: [www.spec.org/cpu2000/results/res2004q1/](http://www.spec.org/cpu2000/results/res2004q1/).
- [ROI, 2001] Measuring Returns on IT Investments: Some Tools and Techniques. 2001. [Electron. resource] // Mode of access: <http://knowledge.wharton.upenn.edu/index.cfm?fa=viewArticle&id=396>.