

Гетерогенная распределенная вычислительная среда для решения крупномасштабных задач исследования энергетической безопасности

И.В. Бычков¹, Г.А. Опарин¹, А.Г. Феоктистов¹, И.А. Сидоров¹, С.А. Горский¹,
Р.О. Костромин¹, А.В. Еделев²

¹Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Лермонтова 134, Иркутск, Россия, 664033

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Лермонтова 130, Иркутск, Россия, 664033

Аннотация. В статье представлен новый подход к разработке и использованию предметно-ориентированной гетерогенной распределенной вычислительной среды для решения крупномасштабных задач исследования энергетической безопасности. Разработка масштабируемых приложений (распределенных пакетов прикладных программ) для этой среды и интеграция вычислительных ресурсов осуществляется с помощью специализированного инструментального комплекса Orlando Tools. Средства управления вычислениями в Orlando Tools интегрированы со специальной мультиагентной системой. Предложена оригинальная мультиагентная модель распределения ресурсов гетерогенной среды при выполнении заданий масштабируемых приложений. Мультиагентное управление реализуется на основе знаний о специфике решения задач в предметной области и характеристиках вычислительной среды. Экспериментальный анализ процессов решения практических задач исследования энергетической безопасности в гетерогенной распределенной вычислительной среде показывает эффективность ее функционирования.

1. Введение

Исследования энергетической безопасности включают две актуальные проблемы государственного и международного масштаба: оценка вариантов развития энергетики страны с учетом требований энергетической безопасности; комплексная оценка последствий воздействия возможных чрезвычайных ситуаций на обеспечение потребителей энергоресурсами как внутри страны, так и за её пределами [1]. Формирование возможных решений по обеспечению энергетической безопасности страны в настоящем и будущем базируется на комбинаторном анализе большого числа (порядка десятков и сотен миллионов) различных чрезвычайных ситуаций и вариантов развития энергетики. Проведение такого анализа обоснованно требует применения высокопроизводительных вычислений.

В настоящее время базовые программные средства, реализующие технологии организации расчетов в высокопроизводительных вычислительных системах, обеспечивают потенциальную основу для массового создания параллельных и распределенных приложений. Однако анализ их применения на практике позволяет выявить следующие важные проблемы: сложность освоения и применения этих средств конечными пользователями, что существенно сужает их

круг; недостаточную поддержку учета специфики решаемых задач; отсутствие универсальных подходов к интеграции ресурсов; слабую комплексированность приложений по данным и управлению. В процессе управления распределенными вычислениями возникает также проблема согласования заданных критериев эффективности их решения (времени, стоимости, безопасности и других ограничений) и требуемых показателей использования ресурсов (балансировки загрузки, надежности, энергопотребления и тому подобных условий) [2].

Перечисленные проблемы актуализируются в особенности при решении задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС), в качестве основных компонентов которой выступают кластеры, в том числе гибридные кластеры с разнородными узлами, а высокопроизводительные серверы, системы хранения данных, персональные компьютеры и другие вычислительные элементы дополняют инфраструктуру среды. Для решения задачи в ГРВС пользователь должен сформировать задание системе управления прохождением заданий (СУПЗ), используемой на кластере. Задание представляет собой спецификацию процесса решения задач, содержащую информацию о требуемых ресурсах, исполняемых программах, входных/выходных данных и т.п. В общем случае задание включает набор взаимосвязанных подзаданий. ГРВС, организованная на базе ресурсов центра коллективного пользования (ЦКП), существенно отличается по своим характеристикам от однородных систем, представленных, например, суперкомпьютерами с мультипроцессорной конфигурацией или реконфигурируемыми вычислительными системами. В рамках ЦКП свои задачи решают локальные пользователи отдельных кластеров ГРВС, которым достаточно ресурсов кластера, а также глобальные пользователи, нуждающиеся в использовании интегрированных ресурсов среды при выполнении масштабируемых приложений, включающих наборы прикладных программ для параллельного решения задач.

Как правило, эффективное распределение ресурсов для выполнения заданий масштабируемых приложений является нетривиальной проблемой для известных систем управления вычислениями [3]. Обеспечение предметной ориентированности ГРВС [4] и использование мультиагентных технологий [5] позволяет существенно повысить эффективность управления вычислениями. В то же время активно развиваются облачные вычисления, предоставляющие пользователям гибкий сервис-ориентированный доступ к вычислительным ресурсам [6]. В этой связи направление исследований, связанное с интеграцией моделей Grid и облачных вычислений, становится чрезвычайно актуальным [7].

В статье представлены основные аспекты нового подхода к разработке и использованию предметно-ориентированных ГРВС для решения задач исследования энергетической безопасности. Предложена оригинальная мультиагентная модель распределения вычислительных ресурсов среды. В рамках данной модели агенты взаимодействуют в процессе распределения ресурсов, основываясь на знаниях о специфике решения задач в предметной области и характеристиках ресурсов ГРВС. Модель обеспечивает высокую эффективность управления потоками заданий, порождаемых приложениями. Разработка масштабируемых приложений осуществляется с помощью инструментального комплекса Orlando Tools [8], разработанного в ИДСТУ СО РАН для организации распределенных вычислений.

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом. Во втором разделе представлен краткий обзор исследований по созданию предметно-ориентированных распределенных вычислительных сред и отмечены особенности предложенного подхода к организации такого рода сред. Далее описана экспериментальная среда для исследования проблем энергетической безопасности. В четвертом разделе приведены результаты анализа эффективности работы среды. В заключение кратко подытожены основные результаты исследования.

2. Специализированные предметно-ориентированные среды

Сегодня активно развиваются исследования, связанные с разработкой и применением специализированных сред для решения крупномасштабных научных и прикладных задач в различных предметных областях с использованием распределенных вычислений. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что применение высокопроизводительных вычислений

обеспечивает наискорейшее получение прорывных результатов и конкурентных преимуществ в научной, производственной, экономической и других сферах человеческой деятельности.

Одним из ярких примеров эффективной реализации и успешного применения таких сред является Grid для решения задач в области физики высоких энергий на ускорителе Большого адронного коллайдера [9]. Широкую известность приобрели и другие проекты. В их числе: интегрированная разнородная программно-аппаратная среда для поддержки проведения исследований в области физики высоких энергий в российском сегменте Grid [10]; среда для поддержки крупномасштабных экспериментов в области геномных исследований, представляющая собой открытую и расширяемую веб-платформу [11]; система быстрого анализа биомедицинских данных, реализованная в виде облачной программно-аппаратной платформы [12]; веб-ориентированная распределенная вычислительная платформа Everest [13]; интеллектуальные программные комплексы с различными программно-аппаратными архитектурами для компьютерного моделирования сложных систем в распределенной иерархической среде [14]; программно-аппаратная среда, включающая набор супервизоров для управления избыточностью в навигационных комплексах движущихся объектов [15]; программный комплекс моделирования критических инфраструктур электроэнергетики с использованием распределенных вычислений [16].

В отличие от вышеперечисленных сред, представленная в статье среда для решения задач исследования энергетической безопасности обеспечивает разработку распределенных пакетов прикладных программ и их комплексирование по данным и управлению, интеграцию моделей Grid и облачных вычислений в процессе решения задач, а также выбор рациональной конфигурации ресурсов для выполнения вычислительных экспериментов различного масштаба.

3. Экспериментальная среда для исследования энергетической безопасности

Построение среды осуществляется с помощью инструментального комплекса Orlando Tools, входящего в базовое программное обеспечение ЦКП «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» (ИСКЦ) [17]. Процесс построения распределенного пакета прикладных программ в Orlando Tools включает три основных этапа: структурный анализ предметной области, разработка функционального наполнения пакета (прикладных программных модулей) и формирование вычислительной инфраструктуры.

На этапе структурного анализа предметной области проводится унификация основных понятий с помощью методов концептуального моделирования. В том числе определяются: расчётные схемы систем энергетики, составляющих единый топливно-энергетический комплекс (ТЭК) страны; взаимосвязи систем энергетики в рамках ТЭК; математические модели систем энергетики и ТЭК; процедуры согласования моделей систем энергетики и ТЭК; структура баз данных (БД) и форматы файлов; процедуры подготовки, декомпозиции и агрегирования данных.

В результате строится модель предметной области пакета, описывающая процессы решения задач в терминах параметров (значимых величин предметной области) и абстрактных операций над полем параметров. На втором этапе производится разработка программных модулей, реализующих операции. На заключительном этапе определяются ресурсы, которые могут быть использованы для выполнения модулей. Эти ресурсы регистрируются в Orlando Tools.

Orlando Tools обеспечивает комплексирование разрабатываемых пакетов путем использования уже созданных фрагментов концептуальных моделей, в которых параметры связаны с существующими базами расчетных данных, а операции с библиотеками модулей.

3.1. Архитектура среды

На рисунке 1 приведена архитектура предметно-ориентированной среды для решения задач исследования энергетической безопасности. В зависимости от размерности решаемых задач в вычислительную инфраструктуру распределенного пакета прикладных программ могут быть включены персональные компьютеры, серверы, кластеры, Grid-системы и облачные платформы. Их объединение в единую интегрированную вычислительную среду обеспечивает

возможность выбора требуемой программно-аппаратной конфигурации ресурсов, а также эффективность подготовки и проведения экспериментов различного масштаба.

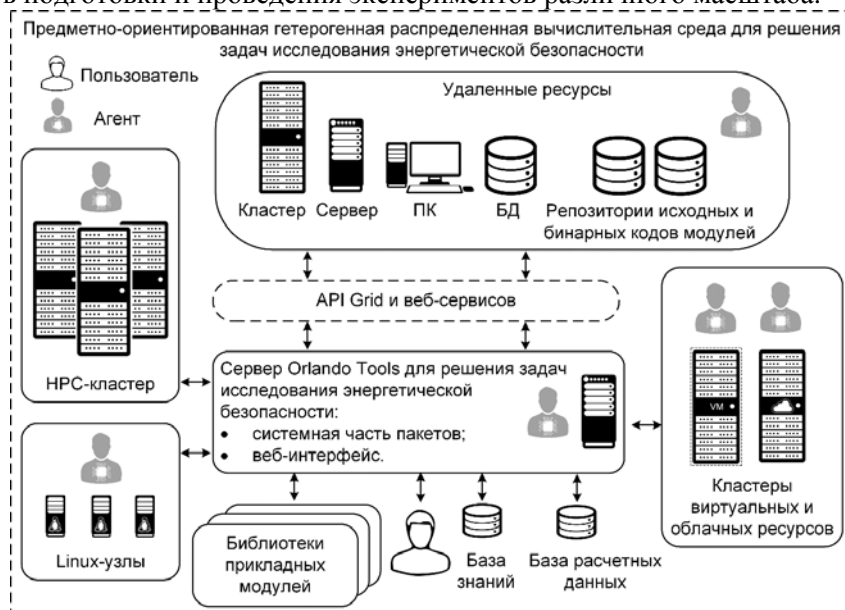


Рисунок 1. Среда для решения задач исследования энергетической безопасности.

Интеграция вычислительных ресурсов осуществляется специализированным сервером Orlando Tools, который реализует также системную часть разрабатываемых пакетов и пользовательский интерфейс для доступа к компонентам пакетов. Системная часть включает подсистему администрирования и конфигурирования вычислительных ресурсов, конструктор концептуальной модели среды, планировщики вычислений и интерпретаторы схем решения задач, а также систему непрерывной интеграции прикладных модулей пакетов. Система непрерывной интеграции предназначена для отладки и тестирования модулей, а также управления их версиями как в библиотеках модулей пакетов, так и во внешних репозиториях.

База знаний содержит компоненты знаний концептуальной модели. Вопросы, связанные с построением и применением концептуальной модели ГРВС, рассмотрены более детально в [18, 19]. Расчетная база данных хранит информацию, необходимую для проведения экспериментов и результаты решения задач. Подключение удаленных информационно-вычислительных ресурсов выполняется с помощью API для поддержки Grid и веб-сервисов.

Средства Orlando Tools для управления вычислениями на уровне приложения интегрированы с мультиагентной системой [20], которая используется в качестве надстройки над СУПЗ, размещенными в узлах ГРВС, с целью оптимизации распределения ресурсов. В рамках мультиагентного распределения ресурсов агенты представляют их владельцев.

3.2. Мультиагентное управление распределенными вычислениями

Управление вычислениями на уровне ГРВС реализуется мультиагентной системой (МАС) [20], которая относится к классу метапланировщиков. МАС имеет иерархическую структуру и функционирует на основе принципов самоорганизации. На каждом уровне системы агенты обладают разными правами и обязанностями, делегируемыми им владельцами и пользователями ресурсов, и выполняют функции, соответствующие их статусу. Управление реализовано на основе локальных взаимодействий агентов, объединяющихся в виртуальные сообщества. Все задания, поступающие в ГРВС, классифицируются в соответствии со своими характеристиками [21]. Распределение ресурсов осуществляется с помощью экономических механизмов регулирования их спроса и предложения в рамках тендера вычислительных работ. Тендер реализуется на основе аукциона Викри [22]. В модели аукциона состязание участников торгов осуществляется только по одному критерию – цене лота. В рамках тендера дополнительно определяются различные условия выполнения работы. В процессе решения

задач возможно динамическое перераспределение работ (заданий). Структурная схема управления вычислениями представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Структурная схема системы управления вычислениями.

На этой схеме в качестве объекта управления выступает ГРВС. Внешними возмущениями для объекта управления являются поток w_1 заданий пользователей среды и поток w_2 локальных пользователей кластеров. Результаты распределения d_1 и d_2 этих потоков по кластерам являются соответственно управляющими воздействиями МАС и локальных пользователей на объект управления. Задающим воздействием для объекта управления является вектор параметров административных политик r_1 . Агенты распределения ресурсов осуществляют перехват заданий потока w_1 с целью более детальной настройки требований к вычислительной системе, содержащихся в этих заданиях. Поток w_1 преобразуется в поток w_1^* . Распределение d_2 потока w_2 задается локальными пользователями.

Сведения о характеристиках узлов ГРВС собираются системой метамониторинга [23] с помощью контрольно-измерительных приборов в виде файловой структуры данных a . Сведения о текущих показателях объемов работ в узлах среды (выполняющихся и стоящих в очередях) также собираются комплексом метамониторинга в виде файловой структуры данных b . Предполагается, что между компонентами структуры b с одной стороны и задающим воздействием для объекта управления, потоками заданий, их распределениями и характеристиками узлов с другой стороны существует некоторая абстрактная связь $b = F(a, r_1, w_1^*, d_1, w_2, d_2)$. Для различных компонентов структуры b эта связь может быть представлена функциональным, статистическим, неоднозначным или иным отображением. Связи Q и H имеют ту же природу, что и рассмотренная связь F .

Собранные сведения передаются управляющему агенту в виде вектора c_1 агрегированных показателей работы объекта управления по его запросу. Запросы управляющего агента к системе мониторинга посылаются с некоторым периодом дискретности T_1 . Величина T_1 выбирается таким образом, чтобы не перегружать коммуникационную среду ГРВС сбором информации и, в тоже время, с необходимой точностью фиксировать моменты приближения показателей функционирования объекта управления к их предельным значениям. Часть сведений, представленных вектором c_1 и актуальных для агентов распределения ресурсов, немедленно передается этим агентам в виде вектора c_2 .

Задающим воздействием для управляющего агента является вектор r_2 параметров административных политик ГРВС. На основе информации, представленной векторами c_1 и r_2 , в заданные моменты времени управляющий агент прогнозирует на определенный промежуток времени динамику показателей качества функционирования объекта управления с помощью системы имитационного моделирования среды [23]. Результаты моделирования используются

для формирования вектора управляющих воздействий u на алгоритмы работы агентов распределения ресурсов путем их параметрической настройки. Элементами вектора u являются следующие параметры алгоритма работы агента распределения ресурсов: ограничения загрузки компонентов узла; бонусы за удовлетворение данным ограничениям; штрафы за их превышение; приоритеты классов; степень желаяния выполнять задания определенных классов. Процесс имитационного моделирования инициируется управляющим агентом с некоторым периодом дискретности $T_2 > T_1$. Входные и наблюдаемые переменные имитационной модели ГРВС, представлены векторами x и y . После того как вектор u сформирован, он передается каждому агенту виртуального сообщества.

4. Анализ эффективности функционирования среды

В качестве примеров использования экспериментальной среды рассмотрим две задачи:

- 1) определение критически важных объектов газотранспортной сети России [24];
- 2) анализ направлений развития энергетики Вьетнама с учетом требований энергетической безопасности [25].

Математические постановки задач приведены в [24, 25]. Обе задачи описываются одной и той же схемой их решения, приведенной на рисунке 3. Операция o_1 строит модель. Операция o_2 производит ее декомпозицию на подмодели в параллельном режиме. Полученные подмодели параллельно исследуются с помощью экземпляров операции o_3 . Операция o_4 агрегирует результаты вычислений и выполняет их анализ. Пакет для решения данных задач реализован в Orlando Tools на основе каркасного подхода, в рамках которого для конкретной задачи интерпретатор ее схемы решения подключает соответствующие модули для реализации операций. На рисунке 4 представлена вычислительная модель схемы-каркаса (рисунок 3), в рамках которой параметры p_5 и p_6 являются параллельными списками данных $p_{5,1}, p_{5,2}, \dots, p_{5,n}$ и $p_{6,1}, p_{6,2}, \dots, p_{6,n}$, а операции o_2 и o_3 представлены множествами их экземпляров, соответствующих элементам обрабатываемых списков. Схема решения задачи представляет собой workflow и отображается ориентированным ациклическим двудольным графом. Данный граф включает два непересекающихся множества вершин – параметров и операций.

В рамках среды используются выделенные (используемые только для решения данных задач) и невыделенные ресурсы кластеров ЦКП ИСКЦ, а также Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Их характеристики приведены в таблице 1. Для выполнения модулей, реализующих операции схемы решения задачи, на выделенных ресурсах запускаются виртуальные машины. Специальная гипервизорная оболочка, реализованная в рамках MAC, обеспечивает в отличие от традиционных метапланировщиков запуск заданий по выполнению дополнительных виртуальных машин на невыделенных ресурсах, которые запускаются на невыделенных ресурсах при наличии в их расписаниях обслуживания свободных слотов. Такие слоты должны удовлетворять ограничениям, определяемым административными политиками в узлах ГРВС. Все запущенные виртуальные машины объединяются планировщиком Orlando Tools в единую виртуальную среду.

Таблица 1. Ресурсы, используемые при решении задач.

Задача	Выделенные ресурсы	Невыделенные ресурсы
Задача 1	5 узлов (2x16 cores CPU AMD Opteron 6276, 2.3 GHz, 64 GB RAM)	Узлы (2x18 cores CPU Intel Xeon X5670, 2.1 GHz, 128 GB RAM) со свободными слотами в расписании обслуживания заданий ЦКП ИСКЦ; ПК ИСЭМ СО РАН
Задача 2	10 узлов (2x16 cores CPU AMD Opteron 6276, 2.3 GHz, 64 GB of RAM); 10 узлов (2x18 cores CPU Intel Xeon X5670, 2.1 GHz, 128 GB RAM)	Узлы (2x18 cores CPU Intel Xeon X5670, 2.1 GHz, 128 GB RAM), со свободными слотами в расписании обслуживания заданий ЦКП ИСКЦ; ПК ИСЭМ СО РАН

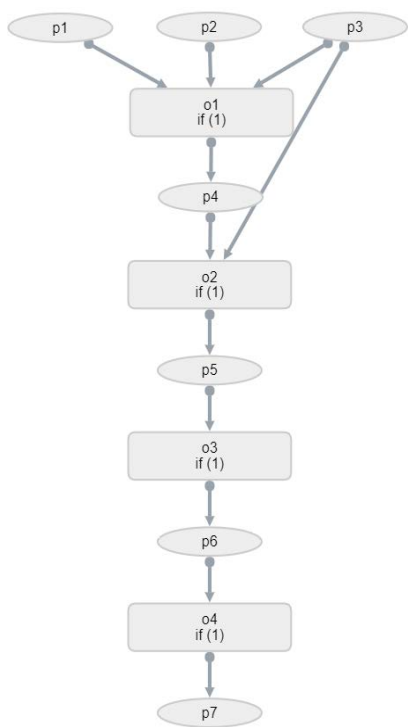


Рисунок 3. Схема решения задачи в графическом редакторе Orlando Tools.

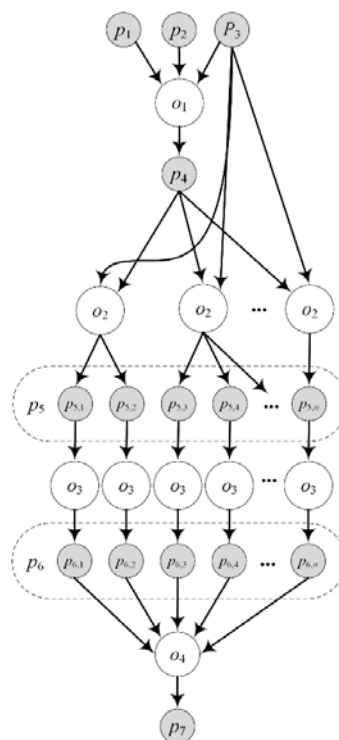


Рисунок 4. Вычислительная модель схемы решения задачи.

На рисунке 5 приведена средняя загрузка процессоров невыделенных ресурсов. Она в обоих случаях 2-3% меньше средней загрузки процессоров выделенных ресурсов. Это обусловлено дополнительными накладными расходами на работу с виртуальными машинами в слотах невыделенных ресурсов. Реальное время t_1 решения задач на ресурсах обоих типов с мультиагентным управлением, а также оценки t_2 и t_3 времени решения этих задач на этих же ресурсах без мультиагентного управления и только на выделенных ресурсах под управлением платформы OpenStack показаны на рисунке 6. Следует отметить, что традиционные метапланировщики, как правило, не могут обеспечить совместное использование выделенных и невыделенных ресурсов. Результаты, приведенные на рисунке 6, показывает эффективность мультиагентного управления вычислениями в ГРВС. Вычислительная сложность рассмотренных задачах напрямую зависит от числа состояний исследуемой энергетической системы. Увеличение числа ресурсов экспериментальной среды позволит решать в ней более сложные задачи. На рисунках 7 и 8 приведены ускорение и эффективность решения подобной задачи в среде с 9110 ядрами, полученные на основе имитационного моделирования.

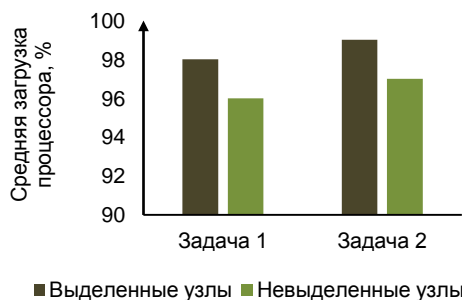


Рисунок 5. Средняя загрузка процессоров выделенных и невыделенных ресурсов.

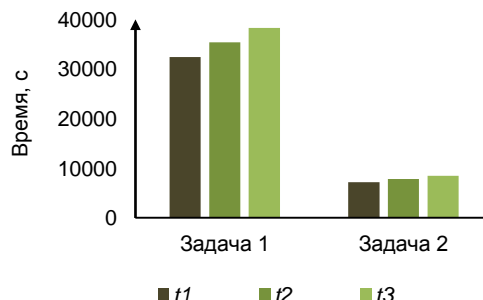


Рисунок 6. Показатели времени решения задач.

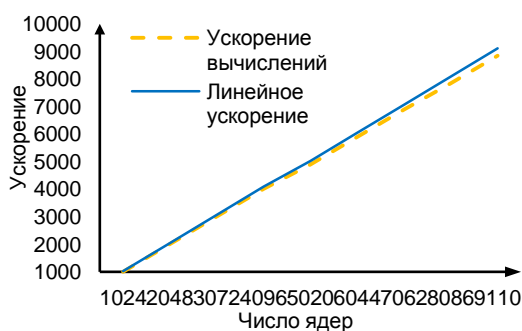


Рисунок 7. Ускорение.

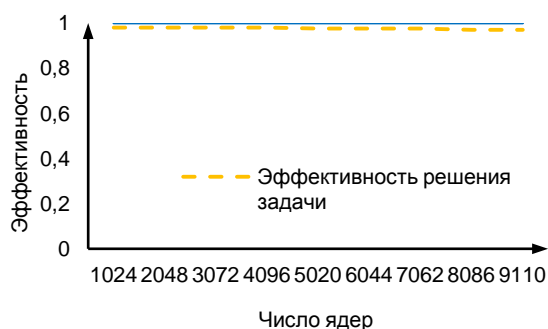


Рисунок 8. Эффективность.

5. Заключение

Предложен подход к организации и проведению крупномасштабных вычислительных экспериментов в ГРВС, осуществляемых в рамках междисциплинарных научных исследований. Его новизна и практическая значимость заключаются в: существенном расширении функциональных возможностей систем управления распределенными вычислениями применительно к ГРВС по сравнению с известными в процессе распределения и разделения ресурсов среды на разных уровнях их использования; применении знаний о специфике крупномасштабных научных задач в конкретной предметно-ориентированной области; интеграции интеллектуальных средств управления вычислениями с системной частью приложений; управлении масштабируемыми приложениями с потоковой структурой, включающей как независимые, так и взаимосвязанные задания; обеспечении гибких высокоуровневых средств доступа пользователей к масштабируемым приложениям. Решены важные крупномасштабные практические задачи исследования энергетической безопасности России и Вьетнама.

6. Литература

- [1] Пяткова, Н.И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, С.М. Сендеров, Н.И. Воропай, Г.Б. Славин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 198 с.
- [2] Toporkov, V. Anticipation Scheduling in Grid with Stakeholders Preferences / V. Toporkov, D. Yemelyanov, A. Toporkova // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 793. – P. 482-493.
- [3] Tao, J. A Note on New Trends in Data-aware Scheduling and Resource Provisioning in Modern HPC Systems / J. Tao, J. Kolodziej, R. Ranjan, P. Jayaraman, R. Buyya // Future Generation Computer Systems. – 2015. – Vol. 51(C). – P. 45-46.
- [4] Sokolinsky, L.B. Methods of Resource Management in Problem-Oriented Computing Environment / L.B. Sokolinsky, A.V. Shamakina // Programming and Computer Software. – 2016. – Vol. 42(3). – P. 17-26.
- [5] Kalyaev, A. An Effective Algorithm for Multiagent Dispatching of Resources in Heterogeneous Cloud Environments / A. Kalyaev, I. Kalyaev, M. Khisamutdinov, I. Korovin, G. Schaefer // Proceedings of the 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision. – 2016. – P. 1140-1142.
- [6] Якововский, М.В. Облачный сервис для решения многомасштабных задач нанотехнологии на кластерах и суперкомпьютерах / М.В. Якововский, А.А. Бондаренко, А.В. Выродов, С.К. Григорьев, М.А. Корнилина, А.И. Плотников, С.В. Поляков, И.В. Попов, Д.В. Пузырьков, С.А. Суков // Известия ЮФУ. Техническая серия. – 2016. – № 12. – С. 103-114.
- [7] Mateescu, G. Hybrid Computing – Where HPC Meets Grid and Cloud Computing / G. Mateescu, W. Gentsch, C.J. Ribbens // Future Generation Computer Systems. – 2011. – Vol. 27(5). – P. 440-453.

- [8] Feoktistov, A. Orlando Tools for Scientific Applications Development and Use: Convergence of Grid and Cloud Computing / A. Feoktistov, S. Gorsky, I. Sidorov, R. Kostromin, A. Edelev, L. Massel // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. – М.: Изд-во МГУ, 2018. – С. 378-389.
- [9] Aad, G. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // Journal of Instrumentation. – 2008. – Vol. 3(S08003). – P. 1-438.
- [10] Велихов, В.Е. Интеграция гетерогенных вычислительных мощностей НИЦ «Курчатовский институт» для проведения масштабных научных исследований / В.Е. Велихов, А.А. Климентов, Р.Ю. Машинистов, А.А. Пойда, Е.А. Рябинкин // Известия ЮФУ. Техническая серия. – 2016. – № 11. – С. 88-100.
- [11] Goecks, J. Galaxy: a comprehensive approach for supporting accessible, reproducible, and transparent computational research in the life sciences / J. Goecks, A. Nekrutenko, J. Taylor // Genome biology. – 2010. – Vol. 11(8). – P. R86.
- [12] Allen, B. Globus: A Case Study in Software as a Service for Scientists / B. Allen, R. Ananthakrishnan, K. Chard, I. Foster, R. Madduri, J. Pruyne, S. Rosen, S. Tuecke // Proceedings of the 8th Workshop on Scientific Cloud Computing. – ACM, 2017. – P. 25-32.
- [13] Smirnov, S. Using Resources of Supercomputing Centers with Everest Platform / S. Smirnov, O. Sukhoroslov // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. – М.: Изд-во МГУ, 2018. – С. 649-660.
- [14] Бухановский, А.В. Интеллектуальные программные комплексы компьютерного моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации / А.В. Бухановский, С.В. Ковальчук, С.В. Марьин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 10. – С. 5-24.
- [15] Агеев, А.М. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью / А.М. Агеев, А.М. Бронников, В.Н. Буков, И.Ф. Гамаюнов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 72-82.
- [16] Pederson, P. Critical infrastructure interdependency modeling: a survey of US and international research / P. Pederson, D. Dudenhofer, S. Hartley, M. Permann // Idaho National Laboratory. – 2006. – Vol. 25. – P. 116.
- [17] ЦКП Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hpc.icc.ru/> (28.05.2018).
- [18] Bychkov, I. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management / I. Bychkov, G. Oparin, A. Tchernykh, A. Feoktistov, V. Bogdanova, S. Gorsky // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 162-167.
- [19] Bychkov, I. Machine Learning in a Multi-Agent System for Distributed Computing Management / I. Bychkov, A. Feoktistov, R. Kostromin, I. Sidorov, A. Edelev, S. Gorsky // Data Science. Proceedings of the 4th International conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2018). – CEUR-WS Proceedings, 2018. – Vol. 2212. – P. 89-97.
- [20] Bychkov, I. Service-Oriented Multiagent Control of Distributed Computations / I. Bychkov, G.A. Oparin, A.G. Feoktistov, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76(11). – P. 2000-2010.
- [21] Феоктистов, А.Г. Методология концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в разнородной распределенной вычислительной среде // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 4. – С. 1-25.
- [22] Vickrey, W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders // Journal of Finance. – 1961. – Vol. 16(1). – P. 8-37.
- [23] Бычков, И.В. Мультиагентное управление вычислительной системой на основе метамониторинга и имитационного моделирования / И.В. Бычков, Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, В.Г. Богданова, С.А. Горский // Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 3-9.

- [24] Senderov, S.M. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security / S.M. Senderov, A.V. Edelev // Energy [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063> (10.11.2017).
- [25] Edelev, A. The Combinatorial Modelling Approach to Study Sustainable Energy Development of Vietnam / A. Edelev, V. Zorkaltsev, S. Gorsky, D. Van Binh, N.H. Nam // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 793. – P. 207-218.

Благодарности

Исследование выполнены в рамках проектов III.17.5.1 и IV.38.1.1 программы фундаментальных исследований СО РАН, а также поддержаны РФФИ, проект № 19-07-00097-а.

Heterogeneous distributed computing environment for solving large-scale problems of energy security research

I.V. Bychkov¹, G.A. Oparin¹, A.G. Feoktistov¹, I.A. Sidorov¹, S.A. Gorsky¹,
R.O. Kostromin¹, A.V. Edelev²

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Lermontov street 134, Irkutsk, Russia, 664033

²Melentiev Energy Systems Institute SB RA, Lermontov street 130, Irkutsk, Russia, 664033

Abstract. We represent a new approach to the development and use of a subject-oriented heterogeneous distributed computing environment for solving large-scale problems of energy security research. Both the development of scalable applications (distributed applied software packages) for this environment and the computing resources integration are carried out using the specialized framework Orlando Tools. Computation management tools in Orlando Tools are integrated with a special multi-agent system. We propose an original multi-agent model of resource allocation in a heterogeneous environment when jobs of scalable applications are executed. Multi-agent management is implemented on the basis of knowledge about the subject domain specifics of solved-problems and computing environment characteristics. Experimental analysis of the results of solving practical problems of energy security research in the heterogeneous distributed computing environment shows the effectiveness of its operation.