



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО «ПГУ»)

ул. Красная, д. 40, г. Пенза, Россия, 440026  
Тел/факс: (841-2) 666-332, e-mail: [cnit@pnzgu.ru](mailto:cnit@pnzgu.ru), <http://www.pnzgu.ru>  
ОКПО 02069042, ОГРН 1025801440620, ИНН/КПП 5837003736/583701001

«Утверждаю»  
ю научной работе и  
иной деятельности  
Васин С.М.  
«15» января 2025 г.  
М.П.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Бумажкиной Натальи Юрьевны**  
на тему: «Специальное математическое и программное обеспечение процесса размещения виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

#### Актуальность темы исследования

В настоящее время наблюдается увеличение объема обрабатываемых данных, что приводит к повышенному спросу на использование методов и технологий развития интеллектуального анализа информации. Одним из современных направлений в развитии этих методов является применение алгоритмов искусственного интеллекта, обусловленное необходимостью работы с большими данными и выполнения сложных вычислительных задач.

Технологической основой применения методов интеллектуального анализа выступает использование мощностей центров обработки данных. По мере роста объема данных, представленных для обработки, увеличивается потребность в более мощных вычислительных и коммуникационных ресурсах.

Важной проблемой, решаемой системой управления центрами обработки данных, является проблема оптимального распределения их вычислительных и коммуникационных ресурсов. Одним из способов решения этой проблемы является использование систем виртуализации, реализуемых на базе гипервизоров виртуальных машин. Центры обработки данных использующие такие системы виртуализации называются виртуализированными центрами обработки данных. В зависимости от однородности применения гипервизоров одного или разных типов следует рассматривать гомогенные и гетерогенные виртуализированные центры обработки данных.

Внедрение облачных решений ставит перед виртуализированными центрами обработки данных задачи эффективного управления ресурсами, предоставляемыми виртуальным машинам. Это связано с тем, что при изменении нагрузки или количества необходимых ресурсов физических машин, а также запросов на добавление или удаление виртуальных машин возникает необходимость в динамическом перераспределении виртуализированных ресурсов.

Кроме того, уровень виртуализации данных обеспечивает приложениям гибкость в запросах дополнительных вычислительных и коммуникационных ресурсов. Это означает, что во время работы программного обеспечения, с которым взаимодействует пользователь, может изменять запросы на виртуализированные ресурсы, что, в свою очередь, сказывается на потребности в вычислительных и коммуникационных ресурсах физических машин центра обработки данных. Со временем первоначальная настройка виртуальных машин на уровне физических машин может перестать соответствовать изменившимся запросам. Из-за того, что ресурсы физических машин уже распределены между всеми виртуальными машинами, размещенными на этих физических машинах, дальнейшее увеличение их объема становится невозможным, что постепенно приводит к снижению эффективности работы виртуализированного центра обработки данных.

Одним из способов решения такой проблемы является переразмещение (replacement) виртуальных машин, реализуемое с помощью технологии их живой миграции (live migration).

В настоящее время реализация живой миграции виртуальных машин осуществляется на основе двух базовых алгоритмов: предварительного копирования (pre-copy) и последующего копирования (post-copy).

При этом процесс живой миграции виртуальных машин, являясь видом системного вычислительного процесса, реализуемого гипервизором, требует дополнительных вычислительных и коммуникационных ресурсов на его работу. Такие дополнительные ресурсы рассматриваются как накладные расходы (overheads) на живую миграцию. Алгоритмы живой миграции различаются типами виртуализированных ресурсов в накладных расходах. Алгоритм pre-copy чувствителен к пропускной способности каналов связи между физическими машинами, а алгоритм post-copy - к объему оперативной памяти физических машин.

Перемещение виртуальных машин между физическими машинами в рамках живой миграции виртуальных машин планируется службой административного управления виртуализированного центра обработки данных по предварительно разработанному плану миграции. Как правило, план миграции представлен матрицей миграции, строками которой являются номера физических машин, столбцами - номера виртуальных машин.

Существующие методы размещения виртуальных машин, основанные на технологии живой миграции виртуальных машин, достаточно эффективны в гомогенных виртуализированных центрах обработки данных. Однако, их

использование в центрах с гетерогенной структурой не позволяет учитывать миграцию виртуальных машин созданных гипервизорами различных типов и при осуществлении живой миграции виртуальных машин могут возникать ошибки миграции.

В виртуализированных центрах обработки данных малого масштаба матрица миграции создается эмпирически системным администратором, который определяет исходные и целевые физические машины для миграции и мигрируемые виртуальные машины на основе опыта реальной эксплуатации центра. В крупномасштабных виртуализированных центрах обработки данных создание матрицы миграции требует разработки средств автоматизации. Автоматизация планирования миграции виртуальных машин позволяет оптимизировать этот процесс, что в свою очередь позволяет освободить ресурсы для выполнения различных задач и тем самым дополнительно сократить энергопотребление в центре обработки данных за счет отключения или перевода физических машин в режим пониженного энергопотребления.

Таким образом, в исследовании соискателя решается актуальная задача является, связанная с перераспределением виртуальных машин в гетерогенных виртуализированных центрах обработки данных. В рамках ее решения соискатель выполняет поиск оптимальных стратегий перераспределения виртуальных машин с целью высвобождения виртуализированных ресурсов, позволяющего уменьшить количество активных (функционирующих) физических машин. При этом соискатель учитывает такие новые для данного направления исследований факторы, как накладные расходы на живую миграцию, а также возможную гетерогенную структуру виртуализированных центрах обработки данных.

Для решения данной задачи соискатель разрабатывает специализированное математическое обеспечение, а также предлагает прототип специализированного программного обеспечения, для формирования соответствующей матрицы миграции.

Это позволяет сделать вывод об **актуальности** исследования, выполненного в диссертационной работе Бумажкиной Натальей Юрьевной.

#### **Объем и содержание диссертации**

На рассмотрение ведущей организации представлены диссертация и автореферат. Представленная на отзыв диссертация Бумажкиной Натальи Юрьевны имеет объем 171 страницу и включает в себя введение, четыре главы, заключение, список использованных источников, 3 приложения. Список источников достаточно полон, содержит современные отечественные и зарубежные источники и включает 129 наименований.

*Во введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные научные результаты, а также приведены сведения об апробации и внедрении.

*В первой главе* рассмотрены особенности организации виртуализированных центров обработки данных и существующие проблемы управления виртуализированными ресурсами. Установлено, что для решения

проблемы динамического перераспределения виртуализированных ресурсов между виртуальными машинами используется консолидация виртуальных машин.

Проведенный автором анализ миграции виртуальных машин позволил определить достоинства и недостатки алгоритмов живой миграции, а также подходов к оценке эффективности этих алгоритмов, что позволило перейти к рассмотрению методов решения задачи перераспределения виртуальных машин. Рассмотрена постановка задачи перераспределения виртуальных машин на основе методов линейного программирования и случайного поиска решения. Обоснована необходимость совершенствования математического и программного обеспечения для повышения ресурсоэффективности гетерогенных центров обработки данных. Сформулировано противоречие между эффективностью консолидации виртуальных машин, сложностью задачи и подходами, использующими жадные алгоритмы без учета гетерогенности структуры центров обработки данных. Постановлена задача разработки нового математического и программного обеспечения для перераспределения виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных.

*Вторая глава* посвящена разработке специального математического обеспечения процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных. В рамках решения задачи моделирования виртуализированных ресурсов центров обработки данных был использован метод векторной алгебры с многомерным векторным представлением ресурсов. Предложен нормализованный ресурсный куб для снижения размерности пространства ресурсов. В векторной модели виртуализированных ресурсов учтено выделение накладных расходов ресурсов для алгоритмов живой миграции виртуальных машин. Задача перераспределения виртуальных машин определена как задача комбинаторной оптимизации для уменьшения вектора дисбаланса ресурсов в ресурсном кубе. Проведен анализ механизмов перераспределения виртуальных машин и обоснован выбор метаэвристических методов, в частности, алгоритм муравьиной оптимизации ACS.

*Третья глава* посвящена разработке алгоритма перераспределения виртуальных машин, основанного на метаэвристике ACS, обеспечивающего получение матрицы миграции виртуальных машин. Алгоритм перераспределения виртуальных машин представлен как трехпроцедурный алгоритм:

- 1) формирование гомогенных подмножеств физических машин на основе гетерогенного множества физических машин;
- 2) выполнение начальной инициализации множества искусственных муравьев и расчета локальной целевой функции;
- 3) формирование глобального решения.

Разработанный алгоритм обеспечивает распараллеливание процесса расчета матриц миграции для гомогенных подмножеств физических машин гетерогенного центра обработки данных.

В четвертой главе предложена архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных. Разработанная система поддержки процессов в виртуализированных центрах обработки данных и обеспечивает гибкость, масштабируемость и адаптацию. Кроме того, обеспечивает централизованное управление и мониторинг с кроссплатформенной интеграцией. Использование фреймворка PySyncObj и двухуровневая архитектура «менеджер-агенты» повышают производительность и надежность в управлении ресурсами виртуальных машин, упрощая задачи администраторов и оптимизируя использование вычислительных мощностей. Архитектура программного комплекса позволяет выполнять перераспределение виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных, основанное на дисбалансе предварительно сформированных гомогенных подмножеств физических машин, что подтверждено результатами имитационного эксперимента.

В заключении подведены итоги в отношении достижения цели. Приведены основные результаты диссертационной работы. Выделены основные направления дальнейших исследований.

Название диссертации отражает ее содержание, материал представлен корректно. Основное содержание диссертации имеет внутреннюю логику и последовательную структуру.

Представленный автореферат правильно отражает содержимое диссертации и соответствует требованиям установленных стандартов. Основные научные результаты и достижения достаточно полно изложены в публикациях, в том числе в журналах из перечня ВАК.

**Научная новизна** проведенного автором диссертационного исследования выносимыми заключается в разработке:

1) модели многомерного представления виртуализированных ресурсов, учитывающей нормированное значение их использования алгоритмами живой миграции и обеспечивающей возможность расчета их дисбаланса, определяющего необходимость выполнения процесса перераспределения виртуальных машин;

2) алгоритма перераспределения виртуальных машин, основанного на метаэвристике муравьиной колонии, отличающегося учетом при расчете матрицы миграции виртуальных машин гетерогенной структуры центров обработки данных и дополнительных ресурсов для алгоритмов живой миграции, и обеспечивающего получение квазиоптимальной матрицы миграции виртуальных машин для существующей структуры гетерогенных центров обработки данных.

3) архитектуры программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных виртуализированных центрах обработки данных, отличающейся наличием модуля формирования гомогенных подмножеств физических машин, и обеспечивающей формирование плана миграции виртуальных машин, основанном на дисбалансе ресурсов физических машин.

### **Степень достоверности и апробации результатов диссертации**

Все представленные положения, выносимые на защиту, и выводы, сделанные в ходе решения частных научных задач, имеют достаточную степень теоретического и эмпирического обоснования, что свидетельствует о корректном применении автором (Бумажкиной Н.Ю.), выбранных методов исследования.

Достоверность результатов диссертации подтверждается научно организованными экспериментами, корректным применением известных методов исследования, непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов, полученных в процессе сравнительного анализа вычислений и натурных экспериментов.

**Теоретическая значимость** работы состоит в развитии средств специального математического и программного обеспечения, учитывающих гетерогенную структуру центров обработки данных и влияние накладных расходов алгоритмов живой миграции виртуальных машин, которые позволяют достичь приемлемого значения коэффициента использования физических машин в сравнении с существующими решениями.

**Практическая значимость** полученных в диссертационной работе Бумажкиной Н.Ю. результатов подтверждается реализацией разработанного алгоритма процесса перераспределения виртуальных машин в виде средств специального программного обеспечения и позволяет осуществлять его интеграцию в системы управления гетерогенных виртуализированных центрах обработки данных.

Диссертационная работа соответствует перспективной тематике научных исследований ФГКВООУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации».

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях, в том числе и по перечню ВАК. Результаты диссертационного исследования представлены в 6 публикациях, из которых 3 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ и 1 статья опубликована в издании, индексируемом Scopus. Дополнительно апробация результатов исследования осуществлена в научных журналах и материалах всероссийских и международных конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационного исследования с целью совершенствования программного обеспечения реализованы в виде специального программного модуля в составе программного обеспечения административного управления ИТ-инфраструктурой технологической компании ООО «СОВИТ». Результаты апробации специального программного модуля подтверждены актом внедрения.

### **Рекомендации по внедрению**

Положения и выводы, содержащиеся в диссертационной работе, могут быть использованы при проектировании и разработке программных средств управления виртуализированными центрами обработки данных.

Разработанные средства специального математического обеспечения процесса переразмещения виртуальных машин могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой средств виртуализации.

Дальнейшее развитие тематики исследования рекомендовано на базе научного коллектива по месту выполнения диссертационной работы.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В автореферате содержание пунктов паспорта научной специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей, которым соответствует диссертационная работа, приведены в сокращенном виде.

2. В тексте автореферата недостаточно формализована модель многомерного представления виртуализированных ресурсов.

3. В заключении автореферата соискателем не представлены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования, а также не представлена степень достоверности полученных результатов.

4. В диссертационной работе недостаточно детально проработана формулировка задачи исследования. Основное внимание уделено качественному описанию, что не позволяет в полной мере оценить степень достижения поставленной цели.

5. В п. 2.4 второй главы диссертации при выборе класса алгоритмов муравьиной колонии (роевого интеллекта) недостаточно полно проведена сравнительная оценка с другими классами эвристических алгоритмов, относящимся к мультистартовым методам и методам на основе имитации физических процессов. В частности, не представлены количественные и качественные критерии сравнения, такие как время выполнения, точность решения, устойчивость к изменению параметров задачи и вычислительная сложность. Это ограничивает возможность объективной оценки эффективности предложенного подхода и его конкурентоспособности по сравнению с альтернативными методами.

6. В п. 4.2. четвертой главы, недостаточно подробно представлена детализация этапов реализации моделирующего алгоритма имитационного эксперимента. В частности, не представлены критерии выбора параметров и начальных условий.

7. В тексте диссертационной работы присутствуют отдельные случаи нарушения норм орфографии и пунктуации, что снижает общее качество оформления работы.

При этом отмеченные недостатки не снижают качество полученных результатов диссертационного исследования.

#### **Заключение**

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены подходы к разработке средств специального математического и программного обеспечения процесса размещения виртуальных машин в гетерогенных центрах обработки данных, что соответствует пункту 3 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и

программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем» и пункту 9 «Модели, методы, алгоритмы, облачные технологии и программная инфраструктура организации глобально распределенной обработки данных» паспорта специальности. Полученные автором результаты в достоверны и являются значимыми для развития указанной отрасли науки. Логика изложения материала диссертации соответствует заявленной цели и поставленной научной задачи в рамках исследования. По результатам исследования сделаны обоснованные выводы. Диссертационная работа отвечает критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (с изменениями и дополнениями), а ее автор, Бумажкина Наталья Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Отзыв на диссертационную работу Бумажкиной Н.Ю. заслушан и одобрен на расширенном заседании кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» с привлечением специалистов кафедры «Вычислительная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет», протокол № 6 от 15.01.2025.

Заведующий кафедрой

«Математическое обеспечение и применение ЭВМ»

д.т.н., профессор

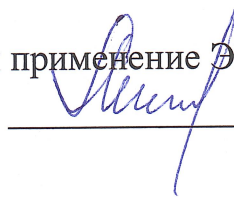


Козлов Андрей Юрьевич

Профессор кафедры

«Математическое обеспечение и применение ЭВМ»

д.т.н., профессор



Макарычев Петр Петрович

«15» января 2025 г.

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет»

Адрес: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

Сайт: <http://www.pnzgu.ru>

Телефон: (8412) 66-65-92

E-mail: [pm@pnzgu.ru](mailto:pm@pnzgu.ru)