

На правах рукописи



БУМАЖКИНА Наталья Юрьевна

**СПЕЦИАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМЕЩЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ
МАШИН В ГЕТЕРОГЕННЫХ ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и
компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации».

Научный руководитель: **Белов Андрей Сергеевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Громов Юрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», директор Института автоматизации и информационных технологий
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», заведующий кафедрой информационных технологий и систем

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

Защита состоится «14» февраля 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «20» декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из сложившихся тенденций в предметной области обработки данных является внедрение и совершенствование методов и технологий интеллектуального анализа данных (data mining), технологическая реализации которых происходит благодаря развитию облачных вычислений и систем искусственного интеллекта, использующих большие языковые модели и нейронные сети. Это возможно благодаря модернизации архитектур центров обработки данных (ЦОД), которые предоставляют необходимые вычислительные и коммуникационные ресурсы, включая процессорное время, оперативную память, хранилище данных и пропускную способность. Для эффективного использования этих ресурсов требуется комплексный многомерный подход.

В области ЦОД важным вопросом является повышение эффективности предоставления его ресурсов, решаемое масштабированием инфраструктуры или внедрением виртуализации. Виртуализированные ЦОД (ВЦОД) используют гипервизоры, позволяющие нескольким виртуальным машинам использовать одну физическую машину. Для эффективного обслуживания запросов в ВЦОД необходимо динамически перераспределять ресурсы между виртуальными машинами для балансировки нагрузки, устранения «горячих точек» и оптимизации энергопотребления, включая перевод части машин в неактивный режим и высвобождение ресурсов. Этот процесс известен как консолидация виртуальных машин (VM consolidation), а его эффективность

измеряется коэффициентом использования физических машин: $K_F^U = \frac{N_F^{InA}}{N_F^{Full}}$ –

соотношение числа неактивных физических машин ВЦОД к их общему числу. Он вычисляется по окончании времени цикла опроса физических машин и определения нормализованного значения показателя использования (utilization) виртуализированных ресурсов на каждой из них системой мониторинга службы администрирования ВЦОД.

Базовым способом решения консолидации является динамический процесс размещения виртуальных машин на физических машинах, а также переразмещения (replacement) виртуальных машин между физическими машинами через миграцию виртуальных машин (VM migration): живую (live) или отложенную. Рост масштаба ВЦОД, обусловленный повышением потребностей в виртуализированных ресурсах, делает вопросы эффективного использования этих ресурсов очень актуальными, что, в свою очередь, требует совершенствования моделей, методов и алгоритмов для решения задачи переразмещения виртуальных машин.

Существенный вклад в развитие предметной области методов и алгоритмов переразмещения виртуальных машин внесли: С.М. Алексанков, А.С. Ворожцов, Н.В. Тутова, М.А. Лореш, В.П. Соловьев, Р. Вууа,

M. Marzolla, E. Feller, A. Ashraf, T. Pahikkala, C. Morin, P. Liljeberg, S. Sharma, A. Esnault.

При этом большинство механизмов перераспределения виртуальных машин, реализованных в современных гипервизорах, основаны на итерационных процедурах, в которых используются варианты жадных алгоритмов, функционирующих в условиях ряда ограничений, и не в полной мере учитывающих, как многомерность виртуализированных ресурсов, так и особенности реализации конкретных механизмов живой миграции. Также проблемой существующих решений является отсутствие учета гетерогенной структуры ВЦОД – одновременного функционирования в их рамках нескольких типов гипервизоров, отличающихся, прежде всего, алгоритмами живой миграции.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью развития средств специального математического и программного обеспечения в рамках современных гетерогенных ВЦОД для обеспечения размещения и перераспределения виртуальных машин с целью повышения эффективности использования физических ресурсов.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГКВООУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» «Повышение эффективности функционирования распределенных вычислительных систем».

Целью работы является повышение эффективности использования ресурсов гетерогенных виртуализированных ЦОД за счет разработки средств специального математического и программного обеспечения процесса размещения и перераспределения виртуальных машин.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. С позиции системной методологии провести анализ проблематики процесса размещения и перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД, включая вопросы особенности реализации алгоритмов живой миграции современных гипервизоров.

2. Разработать модель многомерного представления виртуализированных ресурсов, учитывающую нормированное значение их использования алгоритмами живой миграции и обеспечивающую возможность расчета их дисбаланса, определяющего необходимость выполнения процесса перераспределения виртуальных машин.

3. Разработать алгоритм перераспределения виртуальных машин на основе реализации метода решения задачи многомерной комбинаторной оптимизации.

4. Разработать архитектуру программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД.

5. Провести экспериментальное исследование по оцениванию эффективности использования ресурсов гетерогенного виртуализированного

ЦОД на основе предложенного алгоритма решения задачи перераспределения виртуальных машин для различных вариантов структуры виртуализированного ЦОД и выполняемых на ней виртуальных машин.

Объект исследования: гетерогенный виртуализированный ЦОД.

Предмет исследования: модели и алгоритмы обеспечения процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа, методы дискретной оптимизации, эвристические методы решения задач оптимизации, методы математического моделирования, математической статистики и планирования экспериментов.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей: п.3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем»; п.9 «Модели, методы, алгоритмы и программная инфраструктура для организации глобально распределенной обработки данных».

Научная новизна

В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- модель многомерного представления виртуализированных ресурсов центра обработки данных, отличающаяся дополнительным учетом нормированного значения использования ресурсов, необходимых для процесса живой миграции и позволяющая рассчитать вектор дисбаланса ресурсов для определения паросочетаний «виртуальная машина-физическая машина»;

- алгоритм процесса перераспределения виртуальных машин, основанный на метаэвристике муравьиной колонии, отличающийся учетом при расчете матрицы миграции виртуальных машин гетерогенной структуры ЦОД и дополнительных ресурсов для алгоритмов живой миграции, и обеспечивающий получение квазиоптимальной матрицы миграции виртуальных машин для существующей структуры гетерогенных ЦОД;

- архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД, отличающаяся реализацией механизмов встраивания в действующие программные системы.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии средств специального математического и программного обеспечения, учитывающих гетерогенную структуру ЦОД и влияние накладных расходов алгоритмов живой миграции виртуальных машин, которые позволяют достичь приемлемого значения коэффициента использования физических машин в сравнении с существующими решениями. Положения и выводы, содержащиеся в данной работе, могут быть использованы в развитии программных средств управления виртуализированными ЦОД.

Практическая значимость. Реализация разработанного алгоритма процесса перераспределения виртуальных машин в виде средств специального программного обеспечения, позволяет осуществлять его интеграцию в системы управления гетерогенных виртуализированных ЦОД. Разработанные средства специального математического обеспечения могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой средств виртуализации. На программное средство получено свидетельство о государственной регистрации.

Положения, выносимые на защиту:

- модель многомерного представления виртуализированных ресурсов центра обработки данных позволяет оценить вектор дисбаланса ресурсов для определения паросочетаний «виртуальная машина-физическая машина»;
- алгоритм процесса перераспределения виртуальных машин обеспечивает получение квазиоптимальной матрицы миграции виртуальных машин для существующей структуры гетерогенного ЦОД;
- архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД обеспечивает формирование плана миграции виртуальных машин, основанного на дисбалансе ресурсов физических машин.

Результаты внедрения. Основные результаты внедрены в виде специального программного модуля в состав программного обеспечения административного управления IT-инфраструктурой технологической компании ООО «СОВИТ» г. Москва, а также внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России (дисциплина – «Администрирование операционных систем»).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXIX-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS)» (USA, 2024), XXIX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2024» (ТУСУР, Томск, 2024 г.), а также на научных семинарах кафедры информатики и вычислительной техники Академии ФСО России (2022-2024 гг.).

Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования обусловлены корректным использованием реализованных формальных методов исследования и подтверждены результатами сравнительного анализа данных вычислительных и натурных экспериментов.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 6 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 1 – в изданиях Scopus и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1,5] – аналитическая модель многомерного представления

виртуализированных вычислительных и коммуникационных ресурсов (ВКР), [2,4] – алгоритм перераспределения виртуальных машин, основанный на метаэвристике муравьиной колонии, [3,6] – архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы – 171 страница, включая 46 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены особенности организации, а также тенден-



Рисунок 1 – Структура гетерогенного виртуализированного ЦОД

ции развития и совершенствования ВЦОД. На основе результатов анализа структурных и организационных особенностей ВЦОД, осуществлена постановка научной задачи проведения анализа проблематики процесса перераспределения виртуальных машин (ВМ) в ВЦОД. В результате проведенного анализа, посвящен-

ного функционированию аппаратно-программных платформ реальных реализаций ВЦОД были выявлены их обобщенные характеристики: наличие гомогенной (гипервизоры ВМ одного типа) или гетерогенной (гипервизоры ВМ разных типов) программной структуры, наличие различных алгоритмов миграции ВМ (живой и/или отложенной) в зависимости от типа гипервизора ВМ, преимущественно централизованный характер оркестрации ресурсов ВЦОД при их первоначальном распределении и последующем перераспределении между множеством ВМ в процессе функционирования ВЦОД в условиях нестационарности пользовательских запросов к ресурсам ВМ, а также решения проблем энерго- и/или ресурсоэффективности ВЦОД. Структура гетерогенного ВЦОД представлена на рисунке 1.

Рассмотрены особенности решения задач балансировки загрузки физических машин (ФМ) ВЦОД, а также консолидации ВМ, выявлены их отличия с точки зрения решения задач оптимизации структурно-параметрических ха-

рактических ВЦОД. Проведен анализ видов миграции ВМ, определены особенности алгоритмов живой миграции ВМ с точки зрения потребления ими ресурсов ФМ. Рассмотрены существующие подходы к оцениванию эффективности алгоритмов живой миграции, обобщены метрики, используемые для оценивания эффективности этих алгоритмов. Выполнено обобщение методов, применяемых для решения различного типа задач перераспределения ВМ, рассмотрены особенности, достоинства и недостатки рассмотренных методов. Выполнена формальная постановка задачи перераспределения ВМ как задачи линейного программирования в ограничениях и как задачи случайного поиска решения. На основе рассмотренного выше анализа предметной области задачи перераспределения ВМ в ВЦОД сформулирована необходимость совершенствования их математического и программного обеспечения, связанного с решением задачи перераспределения ВМ с целью обеспечения энерго- и/или ресурсоэффективности ВЦОД, в частности гетерогенных ВЦОД. В этой связи, было сформулировано противоречие между необходимостью повышения коэффициента использования ФМ, комбинаторной сложностью задачи перераспределения ВМ, использованием в существующих подходах перераспределения ВМ преимущественно жадных алгоритмов оптимизации, а также отсутствием в них учета гетерогенной структуры ВЦОД. На основании этого противоречия сделана постановка научной задачи по разработке специального математического и программного обеспечения процесса перераспределения ВМ в гетерогенных ВЦОД.

Вторая глава посвящена разработке специального математического обеспечения процесса перераспределения ВМ в ВЦОД. В рамках решения этой задачи было выполнено моделирование виртуализированных ресурсов ВЦОД. В качестве методологической основы моделирования была выбрана векторная алгебра, в частности, многомерное векторное представление наличия, выделения (утилизации) и запросов на использование виртуализированных ресурсов.

Так, на множестве ФМ ВЦОД $F = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ определяется множество $R = \{R_1, R_2, \dots, R_d\}$, где d – количество типов ВКР. Тогда ВКР элемента $F_i \in F$ можно представить d -мерным вектором их полноты $P_i = \langle P_i^1, \dots, P_i^m, \dots, P_i^d \rangle$, где P_i^m – полнота m -го типа ресурса $R_m \in R$, которым располагает элемент $F_i \in F$.

Также определяется множество $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – ВМ, эксплуатируемых пользователями ВЦОД. Тогда потребность в ресурсе m -го типа со стороны элемента $v_j \in V$ можно представить d -мерным вектором запроса (demand)

$D_j = \langle D_j^1, \dots, D_j^m, \dots, D_j^d \rangle$, где D_j^m – запрос элементом $v_j \in V$ m -го типа ВКР, а использование ВКР можно представить d -мерным вектором выделения (utilization) ресурсов $U_i = \langle U_i^1, \dots, U_i^m, \dots, U_i^d \rangle$.

В процессе разработки модели была выдвинута гипотеза о возможности снижения размерности векторного пространства виртуализированных ВКР за счет его трехмерного представления, относительно базовых виртуализированных ресурсов (С – VCPU, М – оперативная память, N – пропускная способность телекоммуникационного канала, используемого для миграции VM).

Был обоснованно выбран подход к представлению векторного пространства ВКР в виде нормализованного ресурсного куба (NRC – Normalized Resource Cube), на котором определяются вектора: наличия ресурсов (ВНР), выделения ресурсов (ВВР), запроса ресурсов элементом $v_n \in V$ (ВЗР $_{v_n}$). При этом векторная разность между векторами ВНР и ВВР определяет вектор оставшихся ресурсов (ВОР). Также на основе указанных векторов был определен вектор дисбаланса ресурсов (ВДР) – векторная разность проекций на ВНР и ВВР, представленных в графической модели нормализованного куба на рисунке 2,

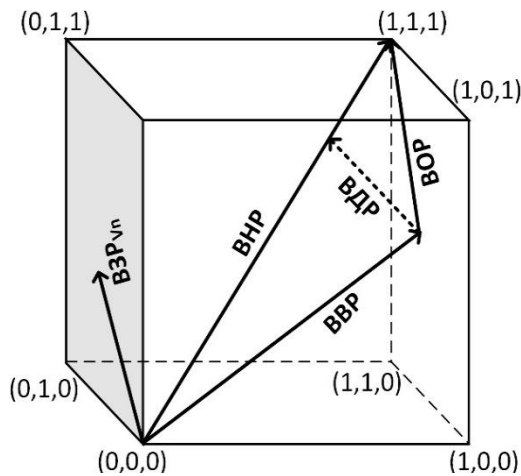


Рисунок 2 – Графическая модель нормализованного ресурсного куба (NRC)

где $\Delta = \frac{ВНР}{3}$.

Тогда для выбора VM, размещаемой на конкретной ФМ следует рассматривать такой элемент $v_n \in V$, который уменьшает величину вектора

$$ВДР' = \sqrt{(C-\Delta)^2 + (M-\Delta)^2 + (N-\Delta)^2}$$

В рамках поставленной задачи исследования предложенная векторная модель виртуализированных ВКР была дополнена учетом выделения ВКР алгоритмам живой миграции VM. ВКР ЦОД, доступные в процессе переразмещения VM можно представить как

$$ВКР_{дост} = ВКР_{общ} - ВКР_{ЖМ}^{НР}, \text{ где } ВКР_{ЖМ}^{НР} \text{ – накладные расходы (overhead cost)}$$

процесса живой миграции VM. Анализ алгоритмов живой миграции, а также исследований в области моделирования процесса живой миграции VM позволил определить значение накладных расходов на живую миграцию конкретной VM на конкретную ФМ, как

$$НР_{V_n}^F = \sigma_1 \times ПД_{ЖМ} + \sigma_2 \times T_{ЖМ} + \sigma_3 \times T_{V_n}^{прост} + \sigma_4 \times N_{НР}^{V_n}, \text{ где } ПД_{ЖМ} \text{ – процесс}$$

передачи конфигурации и данных в ходе реализации алгоритмов живой миграции, оказывающий влияние на расход в $ВКР_{ЖМ}^{НР}$ типов ресурсов М и N,

$T_{ЖМ}$ – общее время, затраченное на миграцию конкретной VM, которое оказывает влияние на расход в $ВКР_{ЖМ}^{НР}$ типа С, поскольку в процессе миграции

производительность VM существенно снижается, $T_{VM}^{прост}$ – общее время

простая ВМ в процессе ее миграции, N_{HP}^{BM} – накладные расходы в ВКР_{ЖМ}^{HP} типа N, определяются, как произведение параметров v_M и D_N с учетом параметров K_{dp} (коэффициент «загрязнения» страниц памяти) и C_N (пропускная способность ВКР типа N, выделенная для реализации алгоритма живой миграции). Бинарные параметры $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4 \in [0, 1]$ являются весовыми коэффициентами, определяющими для конкретного алгоритма живой миграции важность связанных с ним факторов.

Таким образом, решение задачи перераспределения ВМ с учетом накладных расходов, вносимых конкретными алгоритмами живой миграции, применяемых в гетерогенных ВЦОД можно определить, как задачу комбинаторной оптимизации, связанную с уменьшением величины вектора ВДР, задающего равновесное значение S, M и N измерений нормализованного ресурсного куба.

В рамках решения этой задачи были исследованы известные реализации механизмов перераспределения ВМ, такие как: метод планарного шестиугольника, метод векторной точки, алгоритм Xen SandPiper и метод вычисления нагрузки виртуализированного сервера. Ряд этих реализаций в дальнейшем рассматривались в качестве альтернатив для сравнительной оценки разработанного алгоритма перераспределения ВМ.

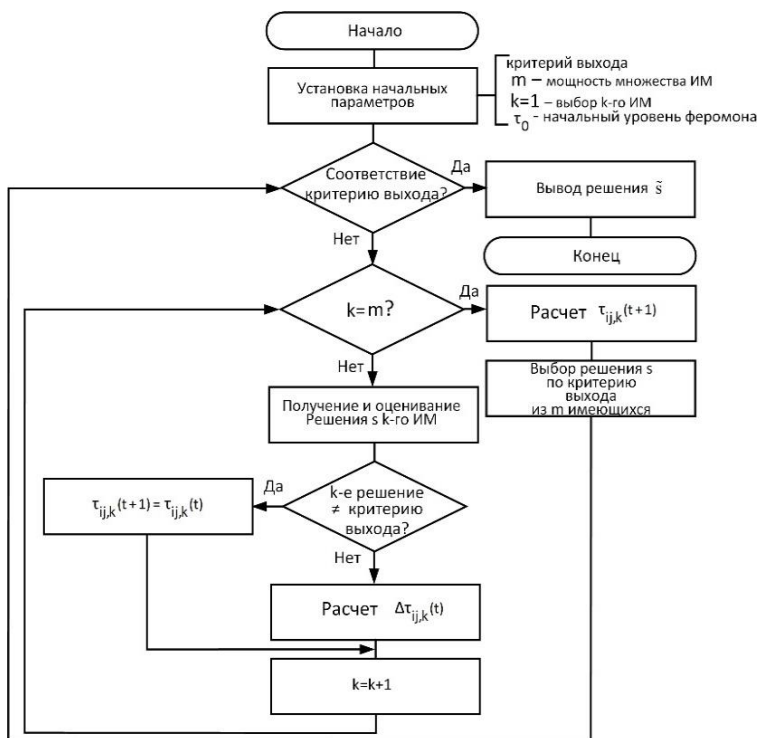


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма оптимизации на основе метаэвристики ACS

Дается обобщенное представление метаэвристики ACSO и общий вид алгоритма ее реализации (рисунок 3).

На основе анализа недостатков рассмотренных механизмов перераспределения ВМ в главе делается обоснованный выбор метаэвристических методов решения задачи комбинаторной оптимизации. Проведено обобщение операций, реализуемых в рамках метаэвристического подхода, рассмотрены основные метаэвристики. В их рамках для решения задачи перераспределения ВМ, как многомерной векторной задачи комбинаторной оптимизации обоснованно выбрана метаэвристика муравьиной ACSO (Ant Colony Optimization).

На основе этого обобщения выполнен анализ известных реализаций алгоритмов оптимизации, использующих метаэвристику ACO, таких как: EAS (Elitist Ant System), Ant-Q (Ant Q-learning System), MMAS (Max-min Ant System), AS-Rank (Ranked Ant System) и ACS (Ant Colony System). В результате этого анализа для разработки алгоритма перераспределения ВМ обоснованно был выбран вариант алгоритма ACS.

Таким образом, разработана векторная модель многомерного (трехмерного) представления виртуализированных вычислительных и коммуникационных ресурсов ЦОД, которая на основе определения векторов их наличия, выделения и остатка, в рамках векторного пространства нормализованного ресурсного куба обеспечивает возможность расчета величины вектора их дисбаланса, учитывая при этом дополнительные ресурсы, необходимые алгоритмам живой миграции и позволяет выполнить итерационное решение задачи

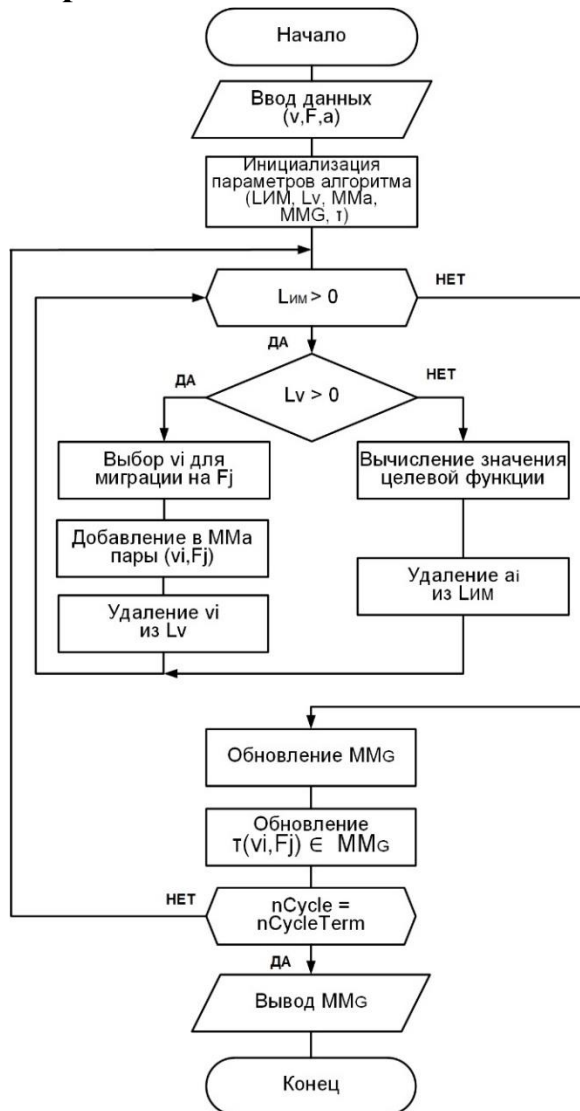


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма процесса перераспределения виртуальных машин

многомерной векторной оптимизации с использованием обоснованного выбранного метаэвристического алгоритма ACS.

В третьей главе представлен разработанный алгоритм перераспределения ВМ, основанный на метаэвристике ACS, обеспечивающий получение матрицы миграции ВМ, отличающийся учетом при ее расчете гетерогенной структуры ЦОД и дополнительные ресурсы, необходимые алгоритмам живой миграции.

Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 4. В отличие от классического алгоритма ACS, ориентированного на решение задачи поиска кратчайшего пути, в модифицированном алгоритме перераспределения ВМ вместо значения расстояния между точками маршрута, предлагается использовать значение величины вектора ВДР: чем меньше при выборе конкретной ВМ это значение, тем более предпочтителен ее выбор.

При этом, как и в классическом алгоритме ACS (рисунок 3) в качестве единицы, решающей за-

дачу локальной оптимизации, используется искусственный муравей (ИМ). На основе полученных локальных решений s множества ИМ формируется глобальное решение \tilde{s} .

В разработанном алгоритме в качестве элемента локального решения s обобщенного алгоритма ACS используется матрица миграции $MM_{i,j}$, в операторном виде представляемая выражением:

$$MM_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } v_i \rightarrow F_j \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (1)$$

а элементом результирующего (глобального) решения \tilde{s} – матрица MM_G .

Определив накладные расходы на ЖМ как $HP_{MM_{i,j}}$, целевую функцию f , обеспечивающую получение оптимального локального решения s отдельным ИМ определено, как максимизация соотношения:

$$\max f(MM_{i,j}) = \frac{N_{F_{HA}}}{HP_{MM_{i,j}}}, \quad (2)$$

где $N_{F_{HA}}$ - количество не активных ФМ ($F_{HA} \subset F$). Физический смысл целевой функции можно интерпретировать, как увеличение количества ФМ, на которые не распределена ни одна ВМ и которые можно исключить из схемы энергопотребления ЦОД и/или использовать их для нового цикла выделения ВМ. Целевая функция глобального решения \tilde{s} определяется как:

$$\max f(MM_G) = \frac{N_{F_{HA}}}{HP_{MM_G}} \quad (3)$$

В отличие от классического алгоритма ACS, первоначальным этапом разработанного алгоритма является формирование на основе гетерогенного множества ФМ F гомогенных подмножеств F^g , где g – номер, идентифицирующий тип ГВ (например, Xen=1, KVM=2 и т.д.). Рассматриваемые далее процедуры разработанного алгоритма перераспределения ВМ применяются параллельно к элементам каждого из подмножеств F^g . Схема алгоритма формирования гомогенных подмножеств F^g представлена на рисунке 5.

Также в отличие от классического алгоритма ACS, где величина уровня феромона τ_{ij} определяет вес ребра на графе пути, в разработанном алгоритме перераспределения ВМ величина уровня феромона $\tau(t)$ на t -м шаге задается матрицей размерности $n \times m$, где n и m – соответственно мощности множеств V и F .

Уровень прироста феромона $\Delta\tau_{vF^g,a}(t)$ для некоторого a -го ИМ, определяется как:

$$\Delta\tau_{vF^g,a}(t) = \begin{cases} f(MM_G) \text{ при } (v, F^g) \in MM_G, \\ 0 \text{ в противном случае} \end{cases}, \quad (4)$$

а правило обновления уровня феромона на шаге $(t+1)$ как:

$$\tau_{vF^g,a}(t+1) = (1-\delta) \times \tau_{vF^g,a}(t) + \delta \times \Delta\tau_{vF^g,a} \quad (5)$$

При этом переменная $\eta_{v,F}$ определяет меру выгоды от решения по конкретной паре элементов множеств V и F :

$$\eta_{v,F^g} = \omega \times |\lg \text{ВДР}'| + (1-\omega) \times \text{ВВР}_{F_k^g}^v, \quad (6)$$

где ω - параметр важности полученного решения о сбалансированном использовании ресурсов R относительно их общего использования, а $\text{ВВР}_{F_k^g}^v$ - векторное представление выделенного m -го ресурса вектора R для элемента $F_k^g \in F$, при назначении ему элемента $v \in V$:

$$\text{ВВР}_{F_k^g}^v = \sum_{R_m \in R} (U_{F_k^g}^v + D_{F_k^g}^v) \quad (7)$$

Фактически η_{v,F^g} является обратной величиной δ_{v,F^g} - длины вектора

$$\text{ВДР}, \text{ то есть } \eta_{v,F^g} = \frac{1}{\delta_{v,F^g}}.$$

ИМ для принятия решения о выборе элемента $v_n \in V$ для его размещения на элементе $F_k^g \in F$ использует обоснованно выбранное псевдослучайное правило пропорционального выбора, ко-

торое благоприятствует выбору сбалансированной по всем измерениям величины вектора ВДР - η_{v,F^g} с наибольшим значением уровня феромона τ_{v,F^g} , ассоциированного с парой значений параметров v и F_k^g :

$$s = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{v \in LV_a(F^g)} \left\{ \tau_{v,F^g} \times \left[\eta_{v,F^g} \right]^\beta \right\} \text{ при } q \leq q_0 \\ S \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (8)$$

где:

- q - случайное число, равномерно распределенное в диапазоне $[0, \dots, 1]$;

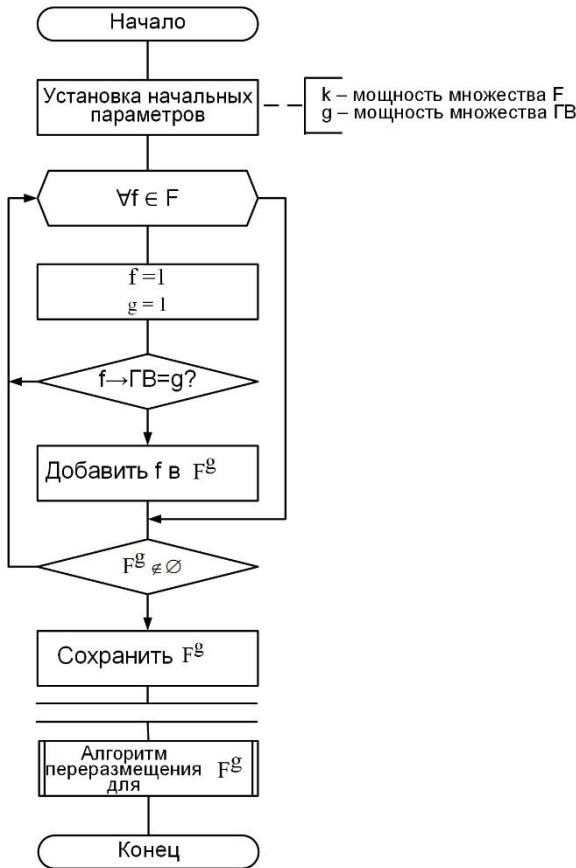


Рисунок 5 – Структурная схема алгоритма формирования гомогенных подмножеств F^g

- q_0 – параметр, удовлетворяющий неравенству $0 \leq q_0 \leq 1$ и определяющий важность функции выбора пары значений параметров v и F_k^g в сравнении с функцией продолжения поиска подходящей пары;
- β – параметр, имеющий неотрицательное значение и определяющий относительную важность параметра τ_{v,F^g} относительно значения η_{v,F^g} ;
- S – случайная величина, выбранная в соответствии со следующим распределением вероятности $p_j(v, F_i^g)$:

$$p_a(v, F_i^g) = \begin{cases} \frac{\tau_{v, F_i^g} \times [\eta_{v, F_i^g}]^\beta}{\sum_{F_k^g \in F} \tau_{v, F_k^g} \times [\eta_{v, F_k^g}]^\beta} & \text{при } F_k^g \in F \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (9)$$

Множество $LV_a(F^g)$ является списком (List of Virtual Machines) элементов $v \in V$, принадлежащим a -му ИМ и определяется как:

$$LV_a(F^g) = \left\{ v \mid \sum_{F_i^g=1}^k MM_{i,j} = 0 \wedge U_i^k + D_j^m < C_i^k, \forall R_m \in R \right\} \quad (10)$$

Соответственно, когда, согласно выражению локального решения s , значение $q \leq q_0$, то выбирается подходящая пара значений параметров v и F_k^g , имеющая наибольшее значение $\tau_{v, F_k^g} \times [\eta_{v, F_k^g}]^\beta$. В противном случае значение параметра v выбирается с $p_a(v, F_i^g)$.

Разработанный алгоритм перераспределения ВМ выполняет основную итерацию, которую можно разделить на два частных алгоритма:

1. Алгоритм 1 – цикл, выполняющий итерацию по набору ИМ, и который входит в другой цикл, продолжающий свою работу пока список $L_{ИМ}$ не опустеет. Структурная схема начальной инициализации множества ИМ и расчета локальной целевой (алгоритма 1) представлена на рисунке 6.

Для каждого ИМ инициализируется матрица миграции MM_a , набор ФМ F , набор ВМ v , пустой список ФМ LF_a список ВМ L_V , которые еще не размещены на ФМ. После чего ВМ в списке L_V рандомизируется, чтобы внести случайность в процесс выбора ВМ для ИМ.

Далее создается список «рабочих» ИМ – $L_{ИМ}$ для проверки ИМ из множества $A_{ИМ}$, которые еще не были задействованы. И если в списке $L_{ИМ}$ остались не задействованные ИМ, то выбирается ИМ.

Если у этого ИМ присутствуют в списке L_V ВМ, то он выбирает «ближайшую» ВМ из этого списка L_V на основе значений феромона $\tau(t)$ для миграции на текущую ФМ.

Затем ИМ добавляет выбранное паросочетание (v, F_a^g) в матрицу миграции MM_a , используя псевдослучайное правило пропорционального выбора, и удаляет ВМ из списка L_V .

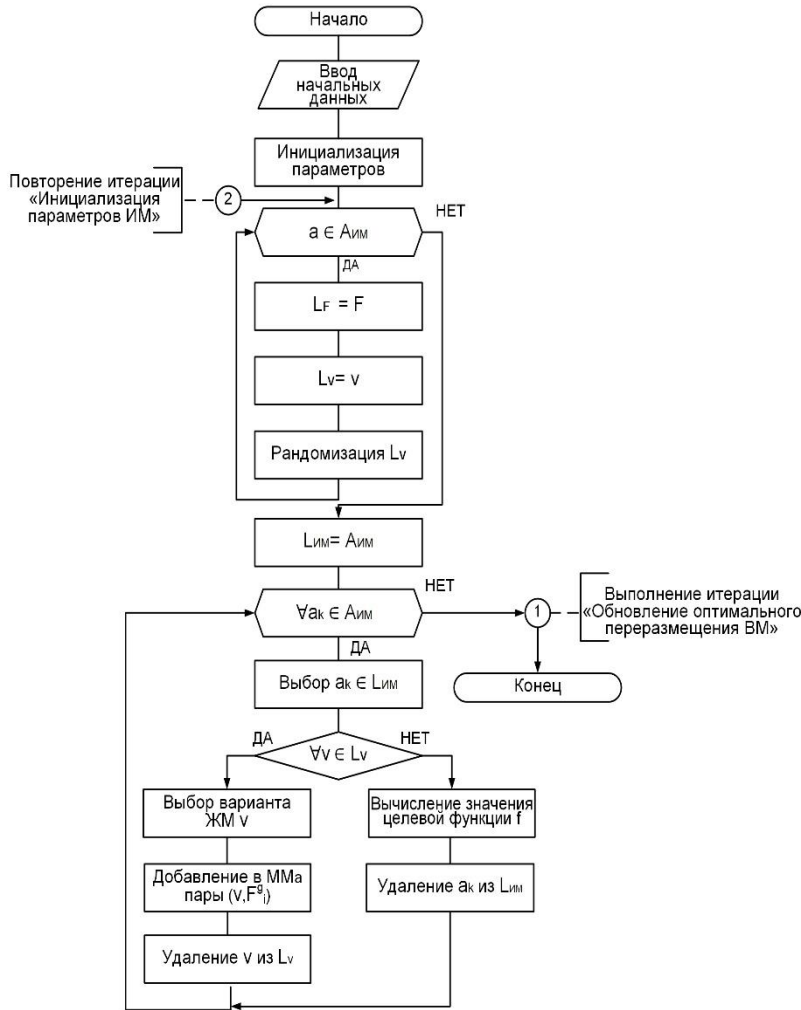


Рисунок 6 – Структурная схема алгоритма 1 - начальной инициализации множества ИМ и расчета локальной целевой функции s

накладные расходы $HP_{MM_{i,j}}$ на процесс ЖМ.

2. Алгоритм 2 – цикл формирования глобального решения \tilde{s} (формирования глобальной матрицы миграции MM_G с оптимальным перераспределением ФМ в гомогенном подмножестве F^g). Структурная схема алгоритма 2 представлена на рисунке 7. Он запускается после того, когда все ИМ завершат построение своих матриц миграции MM_a . Цикл определяет лучшую матрицу

Также, если в списке L_V этого ИМ есть хотя бы одна ВМ, но при этом запрашиваемые ВКР для этой ВМ превышают полноту имеющихся ВКР текущей ФМ этого ИМ, то для заполнения выбирается новая пустая ФМ из списка L_{F_a} данного ИМ. Если же список L_V выбранного ИМ пуст, то ИМ завершает принятие решений о миграции ВМ и вычисляет значение целевой функции s для последующего формирования своей матрицы миграции MM_a , и ИМ удаляется из списка $L_{ИМ}$. При назначении ВМ для ФМ ИМ учитывает размещение ВМ в данный момент и соответствующие издержки миграции ВМ, определяемые как

MM_G . Для этого алгоритм проверяет имеет ли какая-либо MM_a лучшее значение целевой функции f , чем текущая MM_G .

Если это так, то MM_G обновляется, счетчик текущей итерации алгоритма $nCycle$ сбрасывается, и процесс поиска повторяется. Если не обнаруживается улучшение, то алгоритм завершает работу с текущим значением MM_G в качестве выходных данных. Рассчитывается уровень усиления феромона $\Delta\tau_{vF_i^g, a}$ на основе качества MM_G для его обновления в цикле алгоритма 1 функционирования a -го ИМ.

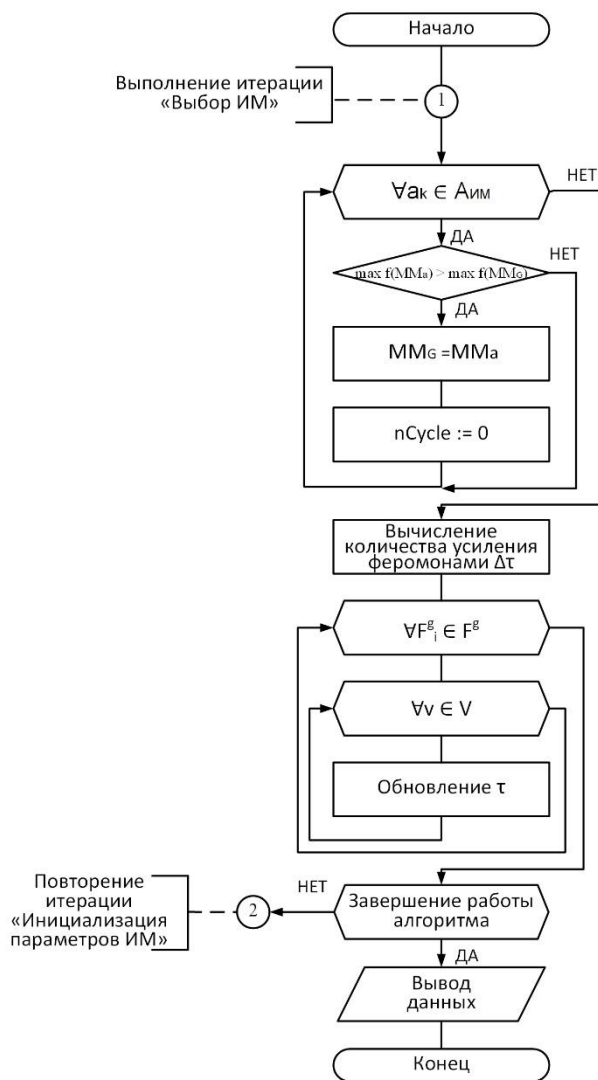


Рисунок 7 – Структурная схема алгоритма 2 - расчета глобальной целевой функции \tilde{s}

поддержки процесса перераспределения ВМ в гетерогенных ЦОД.

Распределенность разработанной системы поддержки обусловлена необходимостью получения параметров ВМ и ФМ ВЦОД с учетом локальной и/или территориальной распределенности их серверных платформ. В связи с

Таким образом, алгоритм 2 усиливает значение уровня феромона только в паросочетаниях (v, F_i^g) , которые принадлежат MM_G . Цикл продолжается итерации до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное количество циклов алгоритма $nCycleTerm$. Результатом работы алгоритма 2 является матрица миграции MM_G с квази-оптимальным размещением ВМ по ФМ.

Таким образом, разработан трехпроцедурный алгоритм перераспределения виртуальных машин, основанный на метаэвристике муравьиной колонии, обеспечивающий получение матрицы миграции виртуальных машин, отличающийся от известных параллельным расчетом матриц миграции виртуальных машин для гомогенных подмножеств физических машин ВЦОД и учетом накладных расходов виртуализированных ресурсов на живую миграцию виртуальных машин.

В четвертой главе предложена архитектура программного комплекса

этим при разработке архитектуры программного комплекса было принято решение об использовании парадигмы «менеджер-агенты». При этом, для поддержки кроссплатформенности сервисного программного обеспечения (ПО) ВЦОД была рассмотрена возможность совместимости с интерфейсами прикладного программирования существующих распределенных систем мониторинга, таких как Zabbix, NetCrunch, OpenNMS и др. Двухуровневая (менеджер-агенты) архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения ВМ в ВЦОД представлена на рисунке 8.

На рисунке 8 представлены два архитектурных уровня разработанного программного комплекса поддержки процесса перераспределения ВМ:

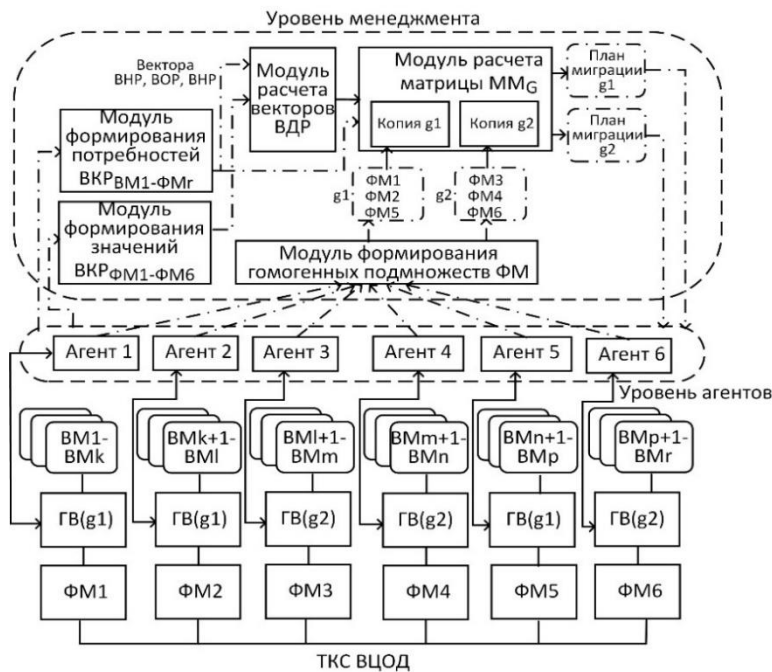


Рисунок 8 – Архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения ВМ на основе парадигмы «менеджер-агент»

векторов ВНР, ВОР, ВВР для подмножеств g1 и g2;

- выполнения расчета значений множества векторов ВДР для подмножеств g1 и g2;

- запуска копий модуля расчета матриц миграции ММГ для подмножеств g1 и g2;

- формирования на основе рассчитанных матриц миграции планов миграции подмножеств g1 и g2 и передачи их уровню агентов.

Реализация представленных модулей выполнена в фреймворке PySincObj, предназначенном для разработки распределенных систем и имеющих соответствующие API к существующим системам мониторинга.

1. Уровень агентов – программных модулей, взаимодействующих с ГВ ВЦОД и вышележащим уровнем. Функциями модуля-агента являются: получение данных от ГВ о его типе, значениях наличия и остатка ВКР, количестве активных ВМ, потребности активных ВМ в ВКР.

2. Уровень менеджмента – программных модулей:

- формирования гомогенных подмножеств ФМ по типу используемых ГВ (на рисунке 2 подмножества g1 и g2);

- формирования значений

Для оценивания степени достижения цели исследования было принято решение о проведении имитационного эксперимента на разработанном симуляторе гетерогенного ВЦОД. Средой имитационного моделирования был выбран симулятор AnyLogic. Вид интерфейса настройки структуры ВЦОД в разработанной имитационной модели представлен на рисунке 9.

В рамках разработанной имитационной модели был спланирован сравнительный имитационный эксперимент для оценивания результата перераспределения ВМ в ВЦОД с различной структурой и степенью гетерогенности для:

- разработанного алгоритма перераспределения ВМ;
- алгоритма XSP - Xen SandPiper (функционирует только на гомогенных ЦОД с ГВ типа Xen);
- алгоритма VSL - Virtualized Server Load (функционирует только на гомогенных ЦОД с ГВ типа KVM).

The screenshot shows the configuration interface for a data center simulation. It consists of four main panels:

- Параметры ЦОД (DC Parameters):** Includes 'Количество кластеров' (Number of clusters) set to 2, 'Режим генерации' (Generation mode) with 'manual' selected, and a 'generate' button.
- Параметры кластера (Cluster Parameters):** Includes '№ кластера' (Cluster ID) 'кластер1', 'Имя кластера' (Cluster name) 'кластер1', 'Количество серверов' (Number of servers) 5, 'Пропускная способность' (Throughput) 1000 Mb/s, '№ сервера' (Server ID) 'сервер1', 'CPU' 5, 'RAM' 64, and a 'generate' button.
- Параметры ВМ (VM Parameters):** Includes 'Режим генерации' (Generation mode) with 'multi_mode' selected, 'количество ВМ' (Number of VMs) 10, 'CPU' 4, 'RAM' 4, and buttons for 'generate', 'save', 'install_VM', and 'DataBase_VM'.
- Параметры ЖМ (Migration Parameters):** Includes 'Алгоритм миграции' (Migration algorithm) with 'Pre-copy' selected, 'Режим миграции' (Migration mode) with 'Consistent' selected, 'Server_source' and 'Server_destination' fields, 'Name_VM' and 'Count_hop' fields, and buttons for 'preinstall' and 'migrate'.

At the bottom left, there are buttons for 'Clean_db' and 'main menu'. At the bottom right, there is a 'Distribute' button.

Рисунок 9 – Пользовательский интерфейс программного комплекса (среда моделирования AnyLogic)

Входные параметры для каждого прогона имитационного эксперимента случайным образом формировались соответствующими генераторами нагрузки имитационной модели: количество ФМ, тип ГВ каждой ФМ, начальные значения ВКР каждой ФМ, количество ВМ, запущенных на каждой ФМ, начальное значение ВКР, используемой каждой ВМ. Вид интерфейса сгенерированных параметров прогона имитационной модели представлен на рисунке 10. Исследуемые алгоритмы перераспределения ВМ подключались к модели, через AnyLogic Python API (библиотека AnyLogic Cloud).

Пример усредненных результатов по 10 прогонам имитационной модели для случайно сгенерированных параметров ВЦОД из 100 ФМ (рисунок 10) и фиксированного значения коэффициента гетерогенности ВЦОД (соотношения ФМ с ГВ Xen и ГВ KVM), где 0 – полностью гомогенный ВЦОД с ГВ Xen, а 0,5 – максимально гетерогенный ВЦОД (50 ГВ Xen, 50 ГВ KVM) представлены на рисунке 11.



Рисунок 10 – Интерфейс генерации параметров и переменных имитационного прогона (среда моделирования AnyLogic)

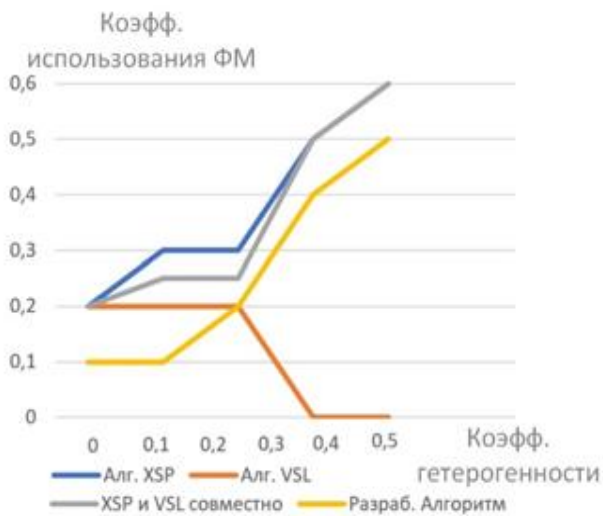


Рисунок 11 – Пример усредненных результатов имитационного эксперимента по оцениванию значения коэффициента использования ФМ после реализации исследуемых алгоритмов процесса перераспределения ВМ для ВЦОД с коэффициентом гетерогенности (для двух типов ГВ: Xen и KVM)

Из рисунка 11 видно, что при увеличении коэффициента гетерогенности (при начальной гомогенности ФМ ВЦОД для ГВ Xen) разработанный алгоритм перераспределения ВМ превосходит алгоритмов XSP и VSL, начиная со значений коэффициента гетерогенности от 0,3 до 0,5.

Таким образом, представлена архитектура программного комплекса поддержки процесса перераспределения ВМ в гетерогенных ЦОД, которая обеспечивает динамическое перераспределение ВМ, основанное на дисбалансе виртуализированных ВКР предварительно сформированных подмножеств ФМ, имеющих гомогенную структуру. Результаты имитационного эксперимента подтверждают достижение цели исследования. На реализованные элементы разработанного ПО системы поддержки перераспределения

ВМ получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ проблематики процесса размещения и переразмещения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД, включая вопросы особенности реализации алгоритмов живой миграции современных гипервизоров.

2. Разработана модель многомерного представления виртуализированных ресурсов, учитывающая нормированное значение их использования алгоритмами живой миграции и обеспечивающая возможность расчета их дисбаланса, определяющего необходимость выполнения процесса переразмещения виртуальных машин.

3. Разработан алгоритм переразмещения виртуальных машин на основе реализации метода решения задачи многомерной комбинаторной оптимизации.

4. Разработана архитектура программного комплекса поддержки процесса переразмещения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД. На программную реализацию разработанной архитектуры получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС № 2022617593.

5. Проведено экспериментальное исследование по оцениванию эффективности использования ресурсов гетерогенного виртуализированного ЦОД на основе предложенного алгоритма решения задачи переразмещения ВМ для различных вариантов структуры виртуализированного ЦОД и выполняемых на ней виртуальных машин. Результаты экспериментального исследования показывают повышение эффективности на 4,2-4,7 % (от коэффициента гетерогенности ВЦОД) использования ресурсов ВЦОД с гетерогенной структурой (повышение коэффициента использования физических машин) разработанной архитектурой программного комплекса поддержки процесса переразмещения виртуальных машин в сравнении с алгоритмами, функционирующими только на гомогенных ЦОД.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бумажкина Н.Ю. Подход к моделированию виртуализированных вычислительных и коммуникационных ресурсов центра обработки данных с учетом накладных расходов на процесс живой миграции виртуальных машин / Н.Ю. Бумажкина, А.С. Белов // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 2 (96). – С. 8-14.

2. Бумажкина Н.Ю. Алгоритм перераспределения виртуализированных вычислительных и коммуникационных ресурсов центра обработки данных на основе метаэвристики ACS / Н.Ю. Бумажкина // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – № 11 (3). Режим доступа: <https://moitvivot.ru/ru/journal/article?id=1367>.

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

3. Bumazhkina N.Yu., Rubtsov A. A., Mikhalev P. V. An algorithm for obtaining an ensemble machine learning model for node federation in decentralized machine learning systems // AIP Conference Proceedings. Manuscript № AIPCP21-AR-MIP 2024-00155.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

4. Борзова Н.Ю., Белов А.С., Трахинин Е.Л., Добрышин М.М., Слесарева К.М. Программа оценки эффективности комплексного использования информационных ресурсов в системе распределенных ситуационных центров. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617593. - М: ФИПС, 2022.

Статьи и материалы конференций

5. Bumazhkina N.Yu., Zakharova I.N., Kochkurov A.E. On the use of live migration technologies for virtual machines in the task of optimizing data center resources // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS). Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference, Yelm, WA, Voronezh. – January 2024. – p. 133-137.

6. Бумажкина Н.Ю. К вопросу о виртуализации вычислительных и телекоммуникационных ресурсов центра обработки данных / Н.Ю. Бумажкина // XXIX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2024». – Томск. – 2024. – С. 107-110.

Подписано в печать 13.12.2024.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж __ экз. Заказ № _____

Размножено в тип. Академии ФСО России.

302020 г. Орел, ул. Приборостроительная, 35.