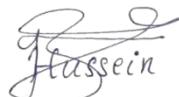


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hussain', written in a cursive style.

Хаю Хуссейн

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И
АЛГОРИТМОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ
ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

Специальность 2.3.5 — Математическое и программное
обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных
сетей

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре Вычислительных машин систем и сетей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Абросимов Леонид Иванович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Вычислительные машины,
системы и сети ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **XXX XXX XXX**
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX,
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXX XXX XXX

Ведущая организация: XXXXXXXX

Защита диссертации состоится «XX» XXXX XXXXг. в XX часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.105 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Зал заседаний Ученого Совета (МАЗ). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МЭИ.105
к.т.н., доц. **ФОМИНА Марина Владимировна.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Центры обработки данных (ЦОД) и предоставляемые ими услуги значительно изменились за последние десятилетия. Они постоянно растут в масштабах и растёт объем трафика, который им приходится поддерживать и обрабатывать. Модели трафика и требования к ним также сильно изменились. Современные ЦОД включают серверные комплексы, системы хранения данных, и образуют высокопроизводительные сети ЦОД. Крупные российские Интернет-компании имеют уже по несколько ЦОД. Например, известно, что Яндекс открыл новый (уже четвертый по счету) дата-центр на 3 тыс. серверов.

Обычно рост нагрузки ЦОД приводит к необходимости структурного масштабирования, состоящего в увеличении количества серверов и маршрутизаторов. При этом проблемы возникают при настройке протоколов маршрутизации, которые не всегда могут эффективно выполнить требования масштабируемости сети ЦОД.

Использование доменной топологии сети ЦОД ужесточает требования к протоколам маршрутизации. Это в свою очередь приводит к тому, что набор сетевых требований ЦОД для выбора топологии, масштабирования и протокола маршрутизации значительно изменился за последнее время. Особенности функционирования сетей ЦОД до сих пор исследованы недостаточно полно, что свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования и определяет актуальность данной работы.

В существенной степени качество функционирования сетей ЦОД зависит от протоколов маршрутизации, которые должны выполнять требования: масштабируемости, выбора кратчайших маршрутов, простоты реализации сложного программного кода. Наборы функций используемых протоколов ограничены так, чтобы они поддерживались несколькими производителями оборудования. Выбор кратчайших маршрутов трафика становится сложной задачей для протоколов маршрутизации в сетях ЦОД. Вот почему в настоящее время для обеспечения масштабируемости крупные предприятия прибегают к использованию протокола динамической маршрутизации BGP (Border Gateway Protocol) в сверхбольших сетях ЦОД. Однако BGP подвержен постоянным колебаниям маршрута и

обладает медленной сходимостью при поиске путей. BGP основан на префиксах, поэтому сбой одного канала связи может привести к повторным вычислениям и передаче обновлений для тысяч префиксов.

Проприетарный бесцикловый протокол маршрутизации EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) классифицируется как расширенный дистанционно-векторный протокол, в котором узел может изменить свой следующий переход, только если удовлетворяется условие выполнимости, при котором не образуется цикл в маршруте к этому пункту назначения. Кроме того, EIGRP не поддерживает механизм разделения домена маршрутизации на области или поддомены.

В протоколе дистанционно-векторной маршрутизации Вавилон (Babel) к метрике добавляется неубывающий порядковый номер для ограничения циклов маршрутизации. В отличие от DUAL (Diffusing Update Algorithm), чтобы избежать циклов маршрутизации, Babel не требует распределенных вычислений, при которых узел становится активным и синхронизирует свои вычисления с другими узлами в сети. Протокол Babel отличается простотой, небольшим размером программы и подходит для маршрутизации в высокодинамичных беспроводных ячеистых сетях. Однако Babel нельзя использовать для больших и относительно стабильных сетей.

Научный интерес к решению задач, связанных с разработкой подтверждается большим количеством научных работ, посвященных исследованиям и разработкам протоколов маршрутизации, выполненных как отечественными (Вишневецкий В.М. Смелянский Р.Л., Пашков В. Н.) так и зарубежными авторами (Garcia-Luna-Aceves J. J., Griffin T., Sobrinho J. L., Gurney A. J. T.).

Анализ показывает, что каждый известный протокол обладает как достоинствами, так и недостатками. Для сетей ЦОД главной проблемой является разработка протокола маршрутизации, выполняющего, в первую очередь, требование масштабируемости, при сохранении ограничений: отсутствие циклов в маршруте, высокая скорость сходимости при выборе кратчайшего маршрута в режиме отказа узлов и/или связей.

Объектом исследования являются сети ЦОД крупных корпораций, ориентированные на функционирование большого количества (сотни и тысячи) критически важных и динамически

взаимосвязанных корпоративных приложений, обслуживающих удаленных пользователей.

Целью работы является разработка протокола ГПДМ, который соответствует критериям масштабируемости сети ЦОД и выполняет требования по скорости определения кратчайших маршрутов.

Задачи диссертационной работы для достижения поставленной цели:

- проанализировать известные структуры сетей ЦОД;
- проанализировать протоколы маршрутизации, используемые сетями ЦОД;
- разработать архитектуру ГПДМ;
- разработать математическую модель бесциклового динамической маршрутизации, обеспечивающую верификацию корректности протокола;
- разработать математическую модель для составных метрик и исследовать влияние алгебраических свойств метрики на бесцикловые алгоритмы маршрутизации;
- разработать алгоритм распределенного порядкового номера DSN (Distributed Sequence Number) для вычисления наилучшего пути для текущего маршрутизатора;
- разработать модифицированный алгоритм MASK для определения участков наилучшего пути;
- разработать методику проведения эксперимента для получения оценок масштабируемости протокола ГПДМ;
- разработать имитационную модель протокола ГПДМ;
- разработать алгоритм генерации случайной топологии графа;
- провести эксперименты с использованием имитационной модели для оценки корректности и масштабируемости протокола ГПДМ.

Методы исследования.

В ходе исследования использовались методы формальных систем, алгебраических моделей, полукольца, системного анализа, событийно-ориентированного имитационного моделирования

Научная новизна данной работы состоит в следующем:

- разработана архитектура нового протокола ГПДМ, который использует гибридный алгоритм с учетом состояния канала и

модифицированного алгоритма дистанционно-векторного (алгоритм DSN);

- разработана алгебраическая модель, использующая полукольца для бесциклового маршрутизации в динамической топологии.
- разработана новая алгебраическая конструкция, называемая функциональным произведением для моделирования составных метрик в маршрутизации, которая использует функцию стоимости для сравнения маршрутов. Предложенная алгебраическая конструкция использована для моделирования многопутевой маршрутизации с равными стоимостями с использованием полукольца эквивалентных классов;
- разработана алгебраическая модель, использующая полукольца и полумодули для проверки алгоритмов упорядоченной маршрутизации, в частности, предложенного алгоритма DSN;
- установлено влияние алгебраического свойства монотонности на бесцикловую маршрутизацию;
- разработан управляемый событиями симулятор, генератор случайной топологии сети и имитационная модель протокола для симулятора.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработка архитектуры и алгоритмов ГПДМ теоретически обоснована использованием алгебраических моделей, которые разработаны на базе теории полуколец:

Практическая значимость работы включает:

- полученные алгебраические модели используются для моделирования бесциклового маршрутизации и составных метрик, а полученные выводы содержат рекомендации, полезные при разработке сетей ЦОД;
- разработанный бесцикловый алгоритм DSN может быть использован для решения различных задач маршрутизации;
- разработанный протокол маршрутизации (ГПДМ) обеспечивает выполнение требований масштабируемости для развивающихся сетей ЦОД с большим количеством маршрутизаторов и каналов связи.

Достоверность полученных результатов обосновывается корректными доказательствами, полученными из алгебраических моделей с использованием результатов теории групп и линейной

алгебры. Полученные результаты подтверждаются разработкой имитационной модели для предлагаемого алгоритма и протокола.

Основные положения, выносимые на защиту:

- архитектура протокола ГПДМ;
- алгебраическая модель для бесциклового маршрутизации с использованием теории полуколец;
- алгебраическая конструкция (называемая функциональным произведением) для моделирования составных метрик в маршрутизации, которая использует функцию стоимости для сравнения маршрутов;
- архитектура протокола маршрутизации ГПДМ с использованием алгоритма состояния канала и модифицированного алгоритма дистанционно-векторной маршрутизации (алгоритм DSN);
- разработанная имитационная модель, программное обеспечение для имитационного моделирования и результаты моделирования предлагаемого протокола маршрутизации ГПДМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, определена научная новизна и практическая значимость данной работы. Сформулирована цель работы и поставлен ряд задач исследования, представлено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе проведен анализ необходимости масштабирования структуры сети ЦОД и установлено, что при развитии ЦОД возрастает количество устройств и каналов связи, определены критерии оценки качества функционирования (поиск кратчайшего пути) при масштабировании структуры сети ЦОД.

Проанализированы протоколы динамической маршрутизации (ПДМ), которые используются в сетях ЦОД и разработана классификация ПДМ сети ЦОД. Выделен класс гибридных протоколов маршрутизации, которые могут сочетать алгоритмы маршрутизации различных классов. Для каждого класса определены функции маршрутизации, которые реализуются соответствующими алгоритмами ПДМ. Выявлено, что перечисленные алгоритмы по-разному влияют на качество функционирования (поиск кратчайшего пути) при увеличении количества узлов и связей, и поэтому могут иметь ограничения при использовании в сети многодоменных ЦОД. В результате анализа достоинств и недостатков известных

протоколов маршрутизации сформулированы требования к протоколам маршрутизации ГПДМ для применения в крупномасштабных многодоменных ЦОД, для которых существуют требования масштабируемости и корректности (т.е. сходимость к оптимальному решению и отсутствие циклов).

Во второй главе представлена постановка задачи разработки архитектуры и математических моделей ГПДМ, приведены обоснования и результаты разработки архитектуры ГПДМ а также результаты разработки Алгебраических моделей бесциклового ДМ и модели составной метрики маршрутизации.

Задача исследования сформулирована следующим образом. Исследуется составная сеть ЦОД, содержащая набор взаимосвязанных маршрутизаторов $(R1, R2, \dots)$ и сетей $(N1, N2, \dots)$ соединенных посредством каналов связи (см. рис. 1), структура которой отображается ориентированным графом $G = (V, E)$, где V — множество узлов инфраструктуры (маршрутизаторов) $n=|V|$, а E — множество дуг (каналов связи). Узлы графа G пронумерованы и каждому узлу $n_i \in V$ присваивается идентификатор i , а дуге $u, q \in E$ графа G соединяющей узлы n_i, k_j присваивается идентификатор i, j , что позволяет взвешенный ориентированный граф G задать матрицей A смежности, элемент которой a_{ij} равен значению весовой функции на дуге (i, j) . Параметры качества передачи трафика информационных и служебных пакетов, обслуживаемых сетью ЦОД, существенно зависят от выбранного протокола, а при разработке гибридных протоколов от выбранных и разработанных функциональных протокольных модулей, реализующих архитектуру ГПДМ.

Разрабатываемый ГПДМ, должен функционировать в динамических условиях и вычислять таблицы маршрутизации, соответствующие оптимальным бесцикловым путям и выполнять требования масштабирования сети ЦОД, т.е. повысить скорость расчета резервных маршрутов и уменьшить объем передаваемой и сохраняемой служебной информации.

Предложенная концепция разработанного ГПДМ базируется на протоколе BGP. В ГПДМ объединены функции протоколов: дистанционно-векторной маршрутизации и состояния каналов, которые выполняют алгоритм распределенного порядкового номера

(DSN) и алгоритм модифицированного состояния канала (MACK). Разработанная архитектура ГПДМ, изображена на рис. 2.

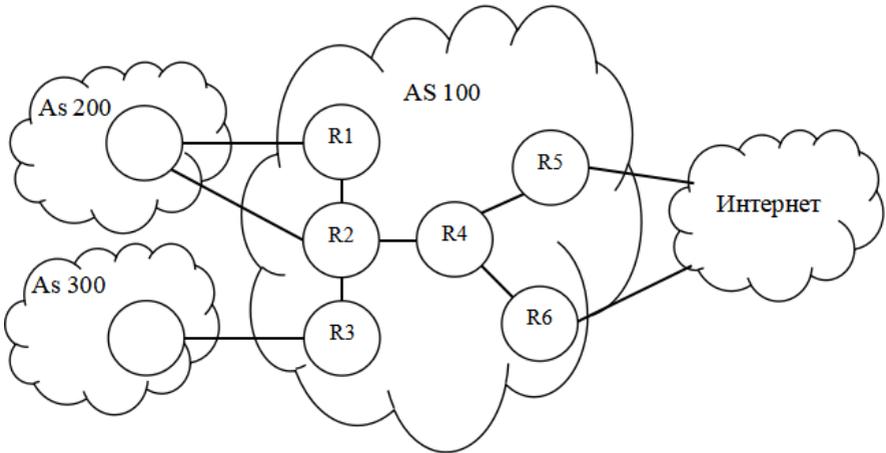


Рис. 1. Многодоменная составная сеть ЦОД



Рис. 2 Архитектура ГПДМ

Задача поиска кратчайшего пути может быть смоделирована полукольцами. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ является полукольцом. Алгоритм

распределенного порядкового номера (DSN) может быть смоделирован следующим образом:

$$A^{(0)} = I, A^{(k+1)} = A \otimes A^{(k)} \oplus I \quad (1)$$

$$A^{(k+1)}(i, j) = I(i, j) \oplus \bigoplus_{q \in N(i)} A(i, q) \otimes A^{(k)}(q, j)$$

где A — взвешенная матрица $n \times n$ смежности графа $G = (V, E)$, веса дуг выражены в S , $n = |V|$, $i, j \in V$, $N(i) \subseteq V$ — множество соседей узла i и I — единичная матрица.

Пусть $P(i, j)$ — это набор всех возможных путей от узла i до j . Обозначим p простым путём, если в нем нет циклов. $SP(i, j)$ обозначает множество всех возможных простых (бесцикловых) путей от узла i до j . Доказано, что если справедливо строгое инфляционное свойство, то в статической топологии уравнение (1) маршрутизации будет сходиться к A^* (глобальное оптимальное решение определено в уравнении (2)), и решение достигается не более чем за $h \leq n - 1$ итераций, где h — количество дуг в самом длинном простом пути графа.

$$A^*(i, j) = \bigoplus_{p \in P(i, j)} w(p) = \bigoplus_{p \in SP(i, j)} w(p) \quad (2)$$

При изменении топологии изменяется взвешенная матрица смежности A . В уравнении (3) M_k описывает матрицу маршрутизации (веса наилучших путей) на этапе k , а A_{k+1} представляет собой новую взвешенную матрицу смежности, которая отражает новую топологию и s — следующий маршрутизатор.

$$M_{k+1} = A_{k+1} \otimes M_k \oplus I \quad (3)$$

$$M_{k+1}(i, j) = I(i, j) \oplus \bigoplus_{q \in V} A_{k+1}(i, q) \otimes M_k(q, j)$$

$$= A_{k+1}(i, s) \otimes M_k(s, j)$$

Чтобы обеспечить исключение циклов, узел i не может изменить следующий маршрутизатор на s , если одно из 3-х условий выполнимости не выполнено: Условие 1 — увеличения расстояния $M_{k+1}(i, j) \oplus M_k(i, j) = M_{k+1}(i, j)$. Условие 2 текущего маршрутизатора $M_k(s, j) \oplus M_{k-1}(s', j) = M_k(s, j)$, где s' является маршрутизатором на предыдущем этапе (шаг k). Условие 3 исходного узла $M_k(s, j) \oplus M_k(i, j) = M_k(s, j) \neq M_k(i, j)$. Доказано, что условия 3 достаточно для отсутствия циклов маршрутизации, а условия 1 и 2 подразумевают условие 3.

Для обеспечения сходимости в динамической топологии введено понятие монотонной маршрутизации. Доказано, что если матрица маршрутизации «уменьшается» (или увеличивается) на одной

итерации вектора расстояний, то она будет продолжать «уменьшаться» (или увеличиваться) на следующих итерациях до тех пор, пока топология является фиксированной (уравнение (4)).

$$\text{Если } A_M^{(1)} \leq_{\oplus} M, \text{ то } \forall k > 0 : A_M^{(k+1)} \leq_{\oplus} A_M^{(k)} \quad (4)$$

$$\text{Если } M \leq_{\oplus} A_M^{(1)}, \text{ то } \forall k > 0 : A_M^{(k)} \leq_{\oplus} A_M^{(k+1)}$$

Для обеспечения масштабируемости, требуется решить следующие подзадачи *маршрутизации и пересылки*. *Подзадача маршрутизации*, выполняет функции поиска, установления и поддержания связи между соседними маршрутизаторами, а также распространения информации о топологии сети, *Подзадача «пересылки» или поиска кратчайшего пути* выполняет функции поиска последовательности пересылок, необходимых для передачи сообщения от узла-источника к узлу-получателю. Для решения задачи маршрутизации, необходимо выбрать механизм распространения маршрутной информации, а также её метрику, учитывающую изменения в сети. Такое разбиение, позволяет обеспечить поиск кратчайшего пути для пересылки, на основании данных полученных с помощью протоколов маршрутизации. Тогда $A^* \otimes M$ решает уравнение: $F = (A \otimes F) \oplus M$. Поэтому задача нахождения матрицы пересылки F делится на две подзадачи: решение проблемы поиска маршрута к узлам инфраструктуры V и распределение матрицы отображения M по узлам инфраструктуры. Первая задача может быть решена с помощью алгоритма дистанционно-векторной маршрутизации с использованием порядковых номеров, а вторая задача решается с помощью алгоритма состояния каналов.

Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ является полукольцом, структура $(N, \boxplus, \triangleright, \bar{0}_N)$ является полумодулем над S . A — матрица смежности, которая принимает свои значения в S , а F — матрица отображения, которая принимает свои значения в N , тогда $A^* \triangleright M$ является решением уравнения $F = (A \triangleright F) \boxplus M$. Для решения проблемы пересылки необходимо решить уравнение $F = (A \triangleright F) \boxplus M$. Однако это уравнение будет использоваться итеративно (уравнение 5) также для решения проблемы маршрутизации (т.е. нахождения A^*). Это уравнение представляет собой обобщенную матричную модель дистанционно-векторной маршрутизации, представленную ранее в уравнениях (1) и (3)

$$F_{k+1} = (A_{k+1} \triangleright F_k) \boxplus M_k \quad (5)$$

В данном алгоритме каждый узел выбирает порядковый номер. Тогда стоимость пути от узла i к самому себе имеет вид $(s_i, \bar{1}_s)$. Теперь определим коммутативные полугруппы $(\mathbb{N}, \max, 0)$. Пусть $\mathbb{B} = \{\text{true}, \text{false}\}$, и определим операцию \sqcup над полугруппой $\mathbb{B} \times \mathbb{N}$ следующим образом: $(b_1, s_1) \sqcup (b_2, s_2) = (b_1 \vee b_2, \max(s_1, s_2))$.

Ясно, что \sqcup ассоциативно, коммутативно и $(\text{false}, 0)$ является нейтральным элементом. Далее операция \boxplus определяется следующим образом

$$(b_1, s_1, d_1) \boxplus (b_2, s_2, d_2) = \begin{cases} (b_1, s_1, d_1) & s_1 > s_2 \\ (b_2, s_2, d_2) & s_1 < s_2 \\ (b_1 \vee b_2, s, \min(d_1, d_2)) & s = s_1 = s_2 \end{cases}$$

$$d_1 \triangleright (b, s, d_2) \stackrel{\text{def}}{=} (b, s, d_1 \otimes d_2) \text{ и } \bar{0}_s \triangleright (b, s, d) \stackrel{\text{def}}{=} (false, 0, \bar{0}_s)$$

$$(L \triangleright M)(i, j) = \sum_{q \in V} L(i, q) \boxplus M(q, j)$$

Теперь необходимо вычислить $F_{k+1} = (A_{k+1} \triangleright F_k) \boxplus M_k$. Введём матрицу D , которая содержит расстояние выполнимости и вычисляется с использованием уравнения $D_{k+1} = F_{k+1} \boxplus D_k$. Используем условие 3 для проверки выполнимости. Узел s является возможным маршрутизатором для узла i при маршрутизации в направлении j , если $F_k(s, j) \boxplus D_k(i, j) = F_k(s, j)$ и $F_k(s, j) \neq D_k(i, j)$, где $F_k(s, j)$ — объявленное расстояние узла s до его непосредственно подключённого соседа i , а j — узел назначения. Если нет выполнимого маршрутизатора, запрос на увеличение порядкового номера устанавливается в $F_{k+1}(i, j)$. Если запрос на увеличение порядкового номера будет установлен для элемента в диагонали $F_{k+1} = (A_{k+1} \triangleright F_k) \boxplus M_k$, порядковый номер элемента в матрице M_k вместо этого увеличивается, поэтому порядковый номер также будет увеличен в F_{k+1} , а бит останется неустановленным для диагонального элемента. В итоге, маршрутизация будет конвергентной и бесцикловой, тогда результаты можно будет использовать для решения задачи пересылки.

В третьей главе представлена разработка новых алгоритмов DSN и MACK протокола ГПДМ. Сформулированы задачи разработки. Предложен алгоритм DSN, в котором введён бит-флаг в метрике RISN (запрос на увеличение порядкового номера), для вычисления

метрики пути. В алгоритме вычисление стоимости ограничено выполнимыми маршрутизаторами. В алгебраической модели (в инфляционных полукольцах) вычисление, если оно ограничено только выполнимыми маршрутизаторами, будет таким же, если оно вычисляется по всем соседям. Однако в некоторых случаях в динамической топологии вычисления будут неравными из-за увеличения стоимости. Поэтому в узле для маршрута устанавливается бит RISN если имеет место один из этих трёх случаев: 1) узел не имеет выполнимых маршрутизаторов для маршрута; 2) существует невыполнимый сосед, и стоимость будет меньше, если она будет вычислена с использованием объявленной стоимости невыполнимого соседа; 3) узел получает обновление с битом RISN, установленным в обновлении для маршрута.

Вместо специального сообщения-запроса используются только обновления. Эти обновления отправляются надёжно и инкрементально, т.е. только для отражения изменений в стоимости, представленной параметрами: расстояние, порядковый номер или бит RISN. Если владелец получает обновление с установленным битом RISN, у которого порядковый номер в обновлении должен быть таким же, как у владельца, владелец выдаст обновление с увеличенным порядковым номером.

Схема алгоритма DSN представлена на рис. 3.

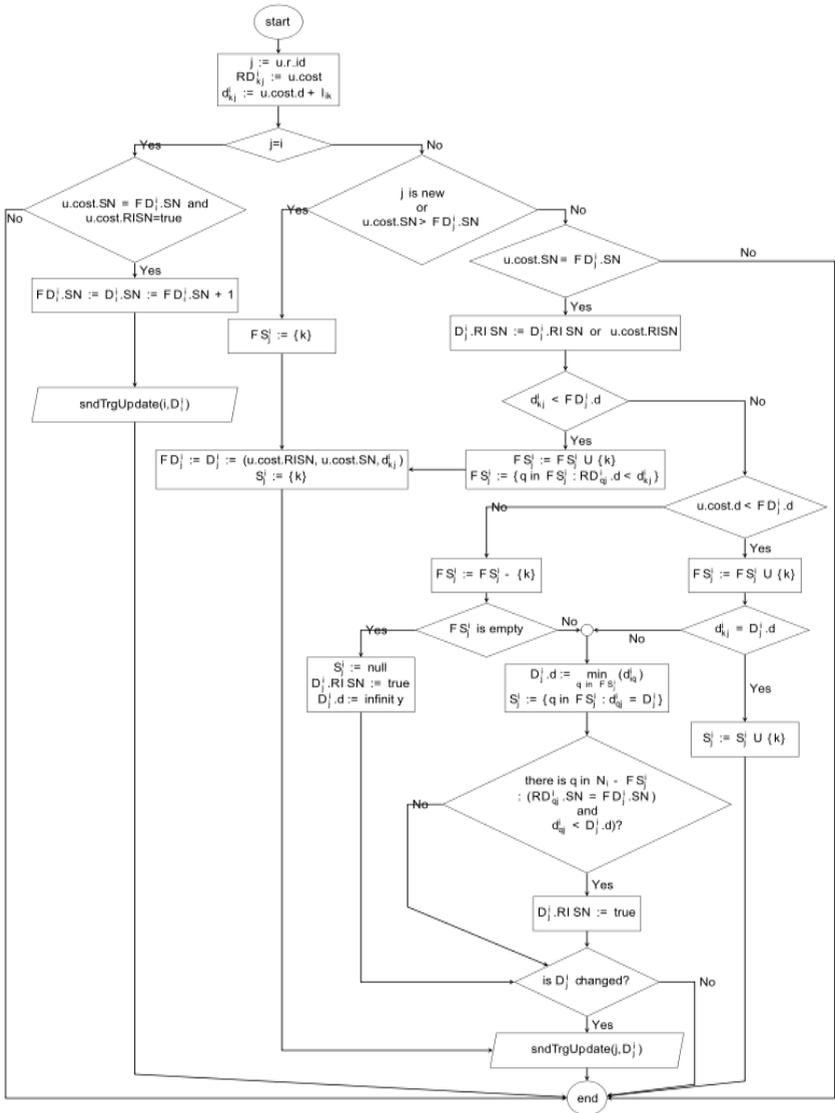


Рис. 3 Схема алгоритма DSN

Сети распределяются в режиме состояния каналов. Эти фрагменты информации могут быть распределены постепенно, используя те же обновления по протоколу вектора расстояния. При этом Базы данных о состоянии канала будут намного меньше, чем в

случае, когда используется чистый протокол состояния канала, поскольку распределяются только сети (т.е. префиксы). префиксы также могут быть объединены для дальнейшего сокращения информации о состоянии канала, которую необходимо распространять.

В четвёртой главе описаны концептуальные положения ГПДМ, использованные при создании имитационной модели протокола (ГПДМ), и модуль управления экспериментом. Проиллюстрирован обмен сообщениями простого сценария динамической топологии, демонстрирующий работу протокола. Представлена статистика о результатах моделирования протокола ГПДМ при обмене сообщениями обновления в случайно сгенерированных топологиях с различным количеством маршрутизаторов и каналов. В сценарии моделирования один из каналов «разъединяется», когда время

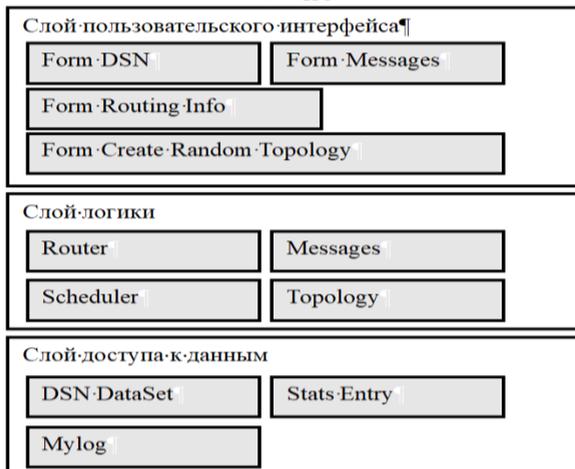


Рис. 4. Трехуровневая программная архитектура имитационной модели.

моделирования равно $T/3$, (где T — время продолжительности моделирования), и восстанавливает соединение, когда время моделирования будет равно $2T/3$. На приведённых графиках представлена статистика, собранная в результате тестовых запусков. По горизонтальным осям на рис. 5 указывается количество каналов и количество маршрутизаторов в каждом эксперименте. Различные результаты моделирования представлены однотипно в трех рядах: 1-

й ряд — это измеренное значение в первой трети до отключения канала, 2-й ряд — во второй трети после отключения канала и 3-й ряд — в последней трети после восстановления соединения.

Усреднённое количество служебных сообщений (обновлений) принимается в качестве критерия Q масштабируемости и для исследуемого протокола масштабируемости зависит от параметра c служебного трафика, от количества E каналов и количества M маршрутизаторов.

Поскольку максимальное количество $\max Q$ служебных сообщений об обновлении, необходимо для достижения конвергенции, то принимаем: $\max Q = c \cdot E \cdot \log_2 M$ (5)

где $c \in [0,5 - 2]$ — коэффициент, зависящий от топологии.

Более того, имитационная модель протокола ГПДМ показала, что размер обмениваемой информации между узлами для сходимости маршрута после изменения топологии принимает постоянное значение и не зависит от топологии, по сравнению с тем, который был на начальной фазе расчета маршрута.

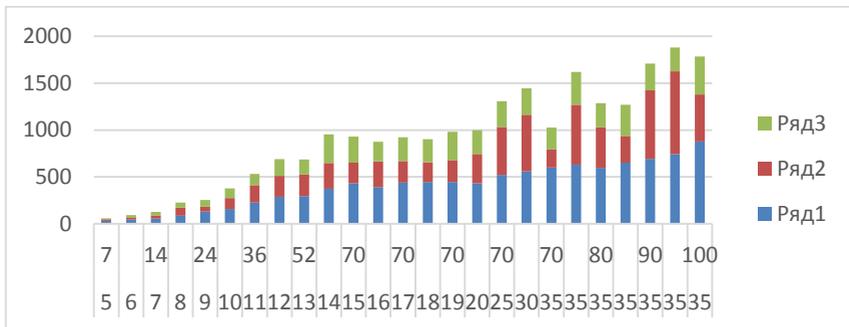


Рис.5 Результаты моделирования количества служебных сообщений об обновлении от количества каналов и количества маршрутизаторов.

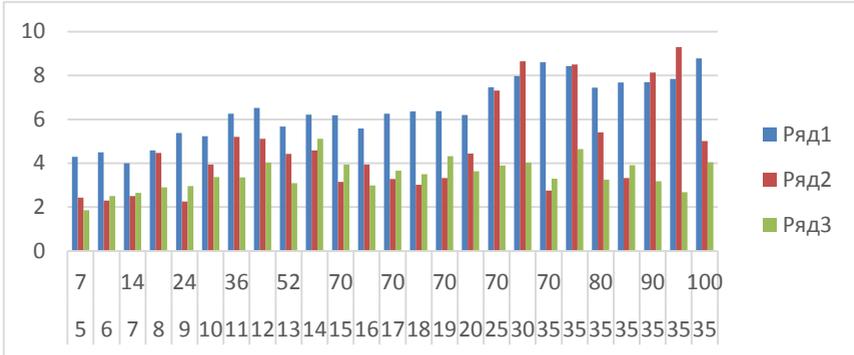


Рис. 6 Результаты моделирования среднего количества служебных сообщений об обновлении, приходящихся на один канал, от количества каналов и количества маршрутизаторов.

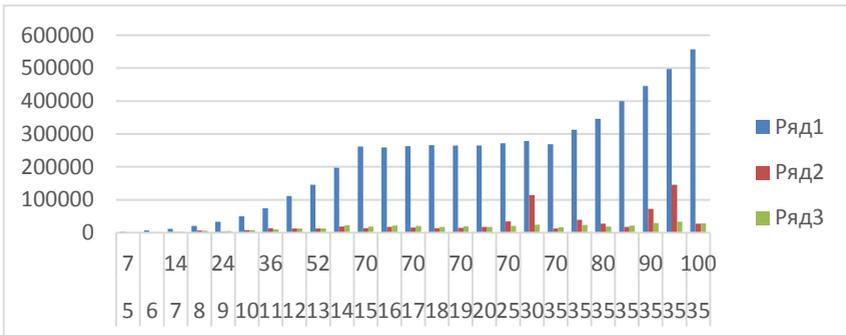


Рис. 7. Результаты моделирования суммарного размера служебных сообщений (в байтах), от количества каналов и количества маршрутизаторов.

В заключении приведены основные результаты проведённого исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представлен обзор современных тенденций в сетях ЦОД, который позволил сформулировать новые требования к оценке масштабирования сетей ЦОД и качества обслуживания трафика. Проанализированы сетевые структуры ЦОД, установлено, что рост

количества сетевых элементов увеличивает количество маршрутов доставки сообщений, что усложняет поиск оптимальных маршрутов. Проведён анализ известных протоколов динамической маршрутизации, выделены достоинства и недостатки известных протоколов и сформулировать требования к протоколам маршрутизации в ЦОД, среди которых выделены масштабируемость и корректность.

Предложена и разработана архитектура нового протокола ГПДМ, для которого определены наборы функций алгоритма DSN для вычисления наилучшего пути для текущего маршрутизатора и алгоритма MASK для определения участков наилучшего пути.

Предложен комплекс алгебраических моделей бесцикловой динамической маршрутизации, использующий матричную модель с полукольцами, которые позволили определить достаточные условия отсутствия циклов при дистанционно-векторной маршрутизации и теоретически обосновать задачи разработки алгоритма DSN и алгоритма MASK.

Разработаны алгоритмы протокола ГПДМ: алгоритм DSN для вычисления стоимости пути к узлу назначения, и алгоритм MASK для вычисления стоимости пути до сети, подключенной к удаленному маршрутизатору.

Разработана имитационная математическая модель ГПДМ для оценки масштабируемости сети ЦОД при применении разработанного протокола маршрутизации.

Имитационная математическая модель ГПДМ управляется событиями. Разработанная программа моделирования имеет трехуровневую архитектуру, включает генератор случайных графов для формирования топологий сети, базу данных генерируемых сообщений.

Разработана методика проведения эксперимента, которая позволяет проводить исследования характеристик функционирования сети ЦОД с изменяемыми параметрами: топология, количество каналов и количество маршрутизаторов.

Получены коэффициенты масштабирования для заданных наборов параметров: количества каналов и количества маршрутизаторов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. Хаю Х., Орлова М. А., Абросимов Л. И. Алгебраическая методология моделирования бесцикловой маршрутизации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 1. С. 47-61. DOI 10.36622/VSTU.2022.18.1.006.

2. Хаю Х., Орлова М. А., Абросимов Л. И. Моделирование алгоритма маршрутизации распределенных порядковых номеров // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 4. С. 98-107. DOI 10.25743/ICT.2022.27.4.008.

3. Абросимов Л. И., Хаю Х., Орлова М. А. Разработка и моделирование гибридного протокола динамической маршрутизации // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36. – № 1. – С. 197–206. – DOI: 10.15827/0236-235X.141.197-206.

4. Абросимов Л. И., Орлова М. А., Хаю Х. Архитектура и программная реализация исследовательского стенда корпоративной беспроводной локальной вычислительной сети // Программные продукты и системы. 2021. № 1. С. 172-179. DOI 10.15827/0236-235X.133.172-179.

5. Абросимов, Л. И., Руденкова М. А., Хаю Х. Методика определения гарантированной доставки трафика в корпоративных беспроводных локальных вычислительных сетях // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 38-49. DOI 10.36622/VSTU.2020.16.5.006.

Статьи в изданиях, входящих в Web of Science, Scopus

6. Khayou H., Orlova M. A., Abrosimov L. I. A hybrid distance vector link state algorithm: Distributed sequence number // International Journal of Computer Networks and Applications. 2021. Vol. 8. No 3. P. 203-213. DOI 10.22247/ijcna/2021/209188.

7. Khayou H., Rudenkova M. A., Abrosimov L. I. On the Algebraic Theory of Loop Free Routing // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. Vol. 12563 LNCS. P. 161-175. DOI 10.1007/978-3-030-66471-8_14.

8. Khayou H., Sarakbi B. A validation model for non-lexical routing protocols // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 98. P. 58-64. DOI 10.1016/j.jnca.2017.09.006.

9. JOBBEH M. M. A., KHORZOM K. I., KHAYOU H. BATMAN LAYER3 PROTOCOL IN WIRELESS MESH NETWORKS WMNs // U.P.B. Sci. Bull., Series C. 2019. Vol. 81. No. 4.

10. Rudenkova M., Khayou H., Abrosimov L. I. Investigation of the Guaranteed Traffic Rate in Enterprise WLAN // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1337. – P. 70-81. – DOI 10.1007/978-3-030-66242-4_6.

Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях

11. Khayou H., Rudenkova M. A., Abrosimov L. I. An Algebraic Approach to Loop Free Routing / // Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2020) : материалы XXIII Международной научной конференции, Москва, 14–18 сентября 2020 года / под общ. ред. В.М. Вишневого, К.Е. Самуйлова. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2020. – P. 548-562.

12. Хаю, Х. Разработка и внедрение новых гибридных протоколов маршрутизации для больших сетей // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2022. – С. 189.

13. Orlova M., Khayou H. , Abrosimov L. I. Modeling enterprise WLAN for better performance parameters estimation // Modern Network Technologies (MoNeTec-2022) : Труды 4-й Международной конференции (короткие и стендовые доклады), Москва, 27–29 октября 2022 года. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом (типография), 2022.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684639 Российская Федерация. Программа для моделирования гибридных протоколов динамической маршрутизации : № 2022684420 : заявл. 08.12.2022 : опубли. 15.12.2022 / Х. Хаю ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»