

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОТЫ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ БОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ПРЕДОСТАВЛЕННОЙ ПОЛОСЫ КАНАЛА

Abstract: The offered model displays processes of transfer of information streams in the computers network with taking into account mechanisms and algorithms of routing, switching, transfer and storage, losses as a result of overloads and distortions. In our opinion, use of concept «the soft metrics», allows to spend more flexibly the analysis of work in case of large corporate and global networks and to increase economic efficiency of the designing and already developed networks. The product operates with inexact categories at the description of characteristics of devices and models work of the distributed network architecture in the conditions approached to real: inconstancy of the quantitative characteristics describing work of unit of system, channels of transfer of the information, etc.

Key words: modeling, LAN, WAN, MAN, routing, soft calculating, soft metric, optimizing.

Анотація: Запропонована модель відображає процеси передачі інформаційних потоків у магістральній мережі з урахуванням механізмів і алгоритмів маршрутизації, комутації, передачі і зберігання. Втрати у результаті перевантажень та викривлень. На наш погляд, використання поняття «нечітка метрика» дозволяє більш гнучко проводити аналіз роботи ВВС у разі великих корпоративних і глобальних мереж та підвищити економічну ефективність проєктованих розвернутих мереж. Продукт оперує неточними категоріями при описі характеристик пристроїв і моделює роботу розподіленої мережевої архітектури в умовах, наближених до реальних: мінливість кількісних характеристик, що описують роботу вузла системи, каналів передачі інформації та ін.

Ключові слова: моделювання, ВВС, маршрутизація, нечітка логіка, нечіткий гіперграф, нечітка метрика, оптимізація.

Аннотация: Предлагаемая модель отображает процессы передачи информационных потоков в магистральной сети с учетом механизмов и алгоритмов маршрутизации, коммутации, передачи и хранения, потерь в результате перегрузок и искажений. На наш взгляд, использование понятия «нечеткая метрика» позволяет более гибко проводить анализ работы ИВС в случае крупных корпоративных и глобальных сетей и повысить экономическую эффективность проектируемых и уже развернутых сетей. Продукт оперирует неточными категориями при описании характеристик устройств и моделирует работу распределённой сетевой архитектуры в условиях, приближенных к реальным: непостоянство количественных характеристик, описывающих работу узла системы, каналов передачи информации и др.

Ключевые слова: моделирование, ИВС, маршрутизация, нечеткая логика, нечеткий гиперграф, нечеткая метрика, оптимизация.

1. Введение

За последние два десятилетия отмечается интенсивное развитие информационно-вычислительных сетей (ИВС) различной конфигурации. В этой области накоплен большой научный и практический потенциал. Однако на практике зачастую сети проектируются и устанавливаются без привлечения научных разработок в этой области, что приводит в итоге к частым выходам сетей из строя и их большим перегрузкам. Для малых локальных сетей это не является критичным, в то время как для корпоративных и, тем более, глобальных сетей ошибки проектировщиков, сетевых аналитиков и эксплуатационных инженеров непосредственно сказываются на эффективности таких ИВС.

Разработчики сетевого программного обеспечения и администраторы сетей привязываются к требованиям бизнес-процессов, не учитывая при этом, что ИВС развиваются стихийно и широкомасштабно. При анализе эффективности ИВС необходимо учитывать временные перегрузки, периодичность изменения параметров сетевых устройств и каналов связи, информацию о протоколах маршрутизации, характере трафика, а также правила временной потребности трафика, вероятностные метеорологические условия, нестандартные ситуации.

Следовательно, необходимо вводить в системы моделирования ИВС описание характеристик, которые влияют на прохождение пакетов в сети, что позволит даже на основании прогнозных данных выработать оптимальные решения.

Целью данного исследования является разработка имитационной модели распределенных информационно-вычислительных сетей и исследование с ее помощью эффективности алгоритмов поиска, исследование применимости теории нечетких гиперграфов к задачам оптимизации ИВС, масштабируемости, устойчивости и особенностей работы указанных децентрализованных систем. Разработка программного пакета моделирования распределенных сетей с возможностью моделирования процесса маршрутизации на основе прогнозных характеристик узлов сети и использования «нечетких» метрик, в качестве оценки элементов топологии. Разработка методов, моделей и алгоритмов, позволяющих повысить качество оптимизации и модернизации в условиях неопределенности.

Обзор и анализ основных подходов, методик и процедур, предлагаемых для оптимизации существующих распределенных сетевых структур и для моделирования работы вновь создаваемых ИВС показал, что:

1. Анализ алгоритмов маршрутизации показал, что на сегодняшний день не существует универсального подхода к формированию таблиц маршрутизации и выбору исходящих линий связи.

2. Анализ алгоритмов поиска кратчайшего пути показал, что они используют только четкие значения параметров сети связи и не оперируют нечеткими величинами.

3. Анализ существующих систем имитационного моделирования показал, что на данный момент не существует универсального программного средства проектирования корпоративных сетей, учитывающих все необходимые аспекты физической структуры сети.

4. Модели распределенных корпоративных сетей, лежащие в основе работы алгоритмов маршрутизации, представляют собой взвешенные графы с четкими значениями метрик, не позволяющие в полной мере формализовать знания и предпочтения проектировщика сети, сетевого аналитика и эксплуатационного инженера, которые могут быть выражены и в нечеткой форме.

Таким образом, представляются весьма важными следующие задачи:

- Разработка модели распределенной компьютерной сети, позволяющая оперировать нечеткими данными характеристик информационно-вычислительных сетей на входе.
- Разработка алгоритма поиска оптимального пути с использованием как четких, так и нечетких параметров. Разработка рекомендаций для расширения функциональных возможностей стандартных link-state протоколов маршрутизации.
- Разработка программного продукта в виде визуальной среды моделирования работы вычислительных сетей, позволяющая на основе имеющихся данных выполнять нечеткую оптимизацию сети связи.
- Разработка методики точной оценки показателей распределенной вычислительной сети с использованием результатов моделирования.

2. Предлагаемая модель

Математическое описание модели вычислительной сети возможно с помощью математического аппарата, предложенного в работах Зыкова А.А., Харари Ф., Бержа К., Буркова В.Н., Заложнева

А.Ю., Новикова Д.А., Кристофидеса Н., путем представления сети с помощью графа, где множество вершин является множеством узлов корпоративной сети, множество ребер является множеством каналов. Рассмотрено гиперграфовое представление корпоративной сети (рис. 1) и ее сегментов [1 – 3].

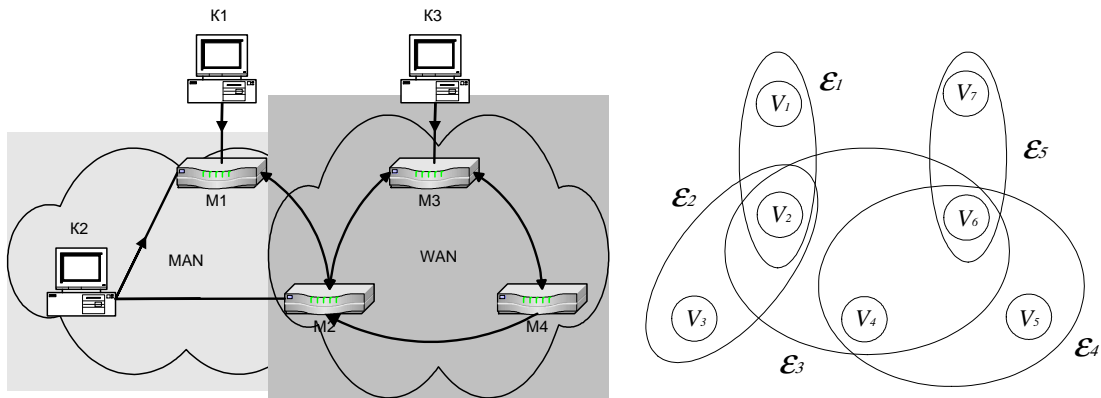


Рис. 1. Представление обмена маршрутными таблицами в КС гиперграфом

В работе для описания моделей корпоративных сетей, предложено использование нечеткого графа и нечеткого гиперграфа. В исследованиях, основанных на использовании математического аппарата, описанного Мондерсоном Ж.Н., Найр П.С., Берге С., Малышевым Н.Г., Берштейном Л.С., Боженюком А.В. [4–5], сделаны выводы, что нечеткие графы являются эффективным способом представления вычислительных сетей, нечеткие гиперграфы являются обобщением понятия нечетких графов на случай, когда произвольные ребра могут иметь любое, в пределах данного числа вершин, количество нечетко инцидентных им вершин [6]. Нечеткий ориентированный гиперграф можно рассматривать как произвольный набор нечетких подмножеств, определенных в одном множестве, алгебраические операции применимы и являются операциями сравнения графовых представлений моделей сетей [7–9]. Использование такого подхода позволяет привлекать возможности теории графов для построения алгоритмов принятия решений и исследования структуры объектов, сетевых взаимодействий (описания маршрутов), представляемых нечеткими гиперграфами.

Исследовано множество алгоритмических подходов для решения задачи поиска пути в графе, которые предложены Ахо А., Хопкрофтом Дж., Ульманом Дж., Асановым М.О., Баранским В.А., Расиным В.В., Кристофидесом Н. [6, 10].

Среди предложенных механизмов были рассмотрены следующие алгоритмы поиска кратчайших путей в графах: алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм Дейкстры, волновой алгоритм, алгоритм Флойда, алгоритм Йена, алгоритм Крускала [11].

В распределенных сетевых структурах параметры узлов маршрутизации и каналов передачи данных, используемые для определения метрики в протоколах маршрутизации, являются непостоянными и могут изменяться [12–13]. Появляется задача поиска оптимального пути в сети с нечетко заданными параметрами или множеством параметров. Поиск пути в вычислительных сетях происходит на любой стадии эксплуатации и проектирования путем приведения к минимизированному виду объединения опорных узлов и каналов связи между ними. Соответственно каждый канал новой сети может быть представлен как канал связи, так и подсеть, состоящая из отдельно взятых промежуточных узлов, связанных между собой каналами связи. При

объединении структуры рассматриваемой сети наглядно вырисовывается логическая схема операторов связи в WAN сетях, большинство которых имеют связи со всеми остальными сетями.

В описании объектов сети также появляются как четкие, так и нечеткие параметры. В процессе описания межсетевых процессов появляются различные параметры, которые описывают передачу трафика и взаимодействие межсетевых процессов. К любой составляющей сети можно применить термин “плохой канал”, “быстрая линия”, “медленный маршрутизатор”, “хороший мультиплексор” и т.д.

Введены параметры, относящиеся к узлам маршрутизации: P_r – пропускная способность маршрутизатора, Z_r – задержка при передаче, S_r – стабильность работы и параметры, относящиеся к каналам связи, P_k – пропускная способность канала, S_k – стабильность работы, Z_k – задержка.

Экспертом описаны каждые переменные с 7 лексическими значениями на примере переменной S_r , определяющей факторы, влияющие на лексическое значение: перегрузка, нагрев, круглосуточный режим работы, погодные условия.

Таблица 1. Описание S_r

Лексическое значение	Очень большая	Высокая	Большая	Хорошая	Средняя	Низкая	Очень малая
$S_r(\max)$	5 лет	3 года	1 год	6 мес	3 мес	1 мес	1 день
$S_r(\min)$	3 года	1 год	6 мес	3 мес	1 мес	1 день	1 час

$$O_k = f_1 \frac{1}{Z_k} + f_2 S_k + f_3 P_k,$$

где f_1, f_2, f_3 – коэффициенты на основе нечетких характеристик канала.

$$O_r = t_1 \frac{1}{Z_r} + t_2 S_r + t_3 P_r,$$

где t_1, t_2, t_3 – коэффициенты на основе нечетких характеристик узла.

Общая оценка пути вычисляется следующим образом:

$$O_p = \sum_{i=1}^n O_{r_i} + \sum_{j=1}^{n-1} O_{k_j}.$$

Каждые нечёткие величины O_{r_i} и O_{k_j} рассматриваются как объединение трапецевидных нечетких интервалов параметров узлов и каналов. Каждый из этих нечётких интервалов M_i представлен пятёркой [7]:

$$M_i = (\underline{m}_i, \overline{m}_i, \alpha_i, \beta_i, h_i),$$

где \underline{m}_i – нижнее модальное значение нечеткого интервала M_i ;

\overline{m}_i – верхнее модальное значение нечеткого интервала M_i ;

α_i – левый коэффициент нечеткости;

β_i – правый коэффициент нечеткости;

h_i – высота нечеткого интервала.

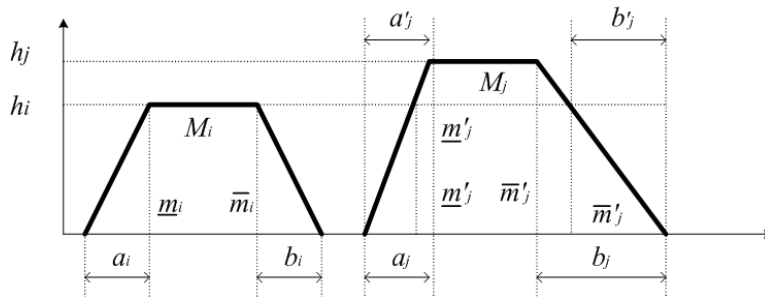


Рис. 2. Формирование нечеткой метрики

Нечёткая величина $M_i + M_j$, где M_i, M_j – два трапециевидных нечётких интервала (рис. 2), есть также трапециевидный нечёткий интервал $(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta, h)$, где $h = \min(h_i, h_j)$;

$$\beta = h \left(\frac{\beta_i}{h_i} + \frac{\beta_j}{h_j} \right); \underline{m} = \underline{m}_i + \underline{m}_j - \alpha_i - \alpha_j + a; \bar{m} = \bar{m}_i + \bar{m}_j - \beta_i - \beta_j + \beta.$$

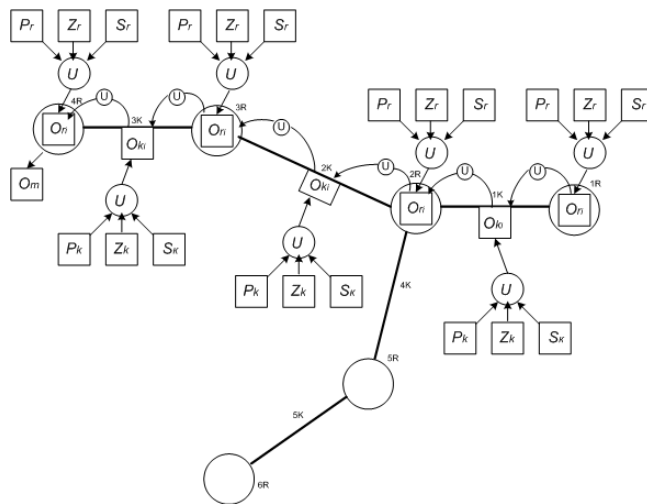
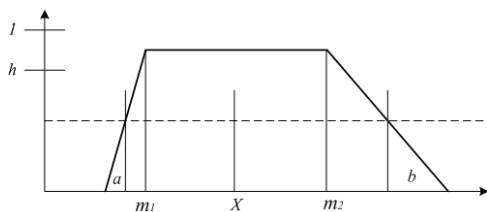


Рис. 3. Объединение нечетких интервалов ФП

Таким образом, общей метрикой маршрута является объединение нечётких величин параметров каналов связи и узлов маршрутизации, которые в свою очередь представляют собой объединение нечетких интервалов ФП каждой из локальных характеристик (рис. 3).

В моменты выбора узла с наименьшей накопленной метрикой происходит дефаззификация и сравниваются два чётких числа [7] (рис. 4).



$$x = \frac{m1 + m2 + b/2 - a/2}{2}$$

Рис. 4. Дефаззификация

Нечеткий ориентированный гиперграф первого рода $\tilde{H}=(V,D)$ будет являться адекватной математической моделью маршрутных таблиц при моделировании процесса маршрутизации в вычислительных сетях, если предположить, что множеству вершин V гиперграфа взаимно однозначно сопоставлено множество активных элементов I – узлов КС, а каждый маршрут прохождения по элементам $j \in J$ представляет собой последовательность прохождения по множеству I и соответствует ориентированному ребру $\tilde{d}_j \in D$ гиперграфа $\tilde{H}=(V,D)$. Причем значения функции принадлежности μ_{d_j} определяются исходя из особенностей передачи информационных пакетов по каналам связи и обработки их в узлах связи.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Введено понятие нечеткой метрики маршрута, которая представляет собой объединение нечетких величин параметров каналов и узлов, описываемых с помощью нечетких интервалов функции принадлежности.

2. Использование понятия «нечеткая метрика» позволяет более гибко проводить анализ работы крупных корпоративных и глобальных сетей, повысить экономическую эффективность проектируемых и уже развернутых сетей связи и сократить трудоемкость их моделирования за счет более быстрого подбора характеристик активного оборудования.

3. Модель корпоративной сети на основе нечеткого гиперграфа позволяет описывать процессы передачи информационных потоков в магистральной сети с учетом механизмов и алгоритмов маршрутизации, коммутации, передачи и хранения, потерь в результате перегрузок и искажений.

4. Предложенный алгоритм поиска кратчайшего пути оперирует неточными категориями при описании характеристик устройств и моделирует работу сетевой архитектуры с учетом непостоянства количественных характеристик, описывающих работу узла системы.

5. На каждом шаге поиска формируется наилучшее (в смысле принятого выбранного критерия) подмножество элементов.

3. Особенности программной реализации и вычислительный эксперимент

Целью моделирования является определение оптимальной топологии, адекватный выбор сетевого оборудования, определение рабочих характеристик сети и возможных этапов будущего развития, возможные изменения с целью оптимального использования сетевой инфраструктуры. На модели можно опробовать влияние всплесков широковебательных запросов или реализовать режим коллапса. В процессе моделирования выясняются следующие параметры:

1. Предельные пропускные способности различных фрагментов сети и зависимости потерь пакетов от загрузки отдельных станций и внешних каналов.

2. Время отклика основных серверов в самых разных режимах, в том числе таких, которые в реальной сети крайне нежелательны.

3. Решение оптимизации топологии при возникновении узких мест в сети (размещение серверов, DNS, внешних шлюзов, организация опорных каналов и пр.).

4. Выбор того или иного типа сетевого оборудования.
5. Оценка влияния мультимедийного трафика на работу локальной сети.
6. Оценка необходимой полосы пропускания внешнего канала для обеспечения требуемого уровня QoS.

Разработанная модель, методика и программный пакет успешно использованы для выдачи рекомендаций при коррекции конфигурации маршрутизаторов сегментов вычислительной сети для передачи и обработки цифрового видеопотока на объекте заказчика (Marco Polo hotel management, г. Москва) с целью оптимизации использования предоставленных магистральных линий передачи цифровых данных и снижения затрат на аренду данных линий. Сегмент обеспечивает передачу, защиту, обработку и хранение видеoinформации, информационных и служебных данных предприятия и его подразделений. Обеспечивает сетевое взаимодействие с другими территориально распределенными узлами. В рамках работы была поставлена задача оптимизации трафика, который создавался на рабочих станциях, отображенных на графе вершинами. Измерения были проведены с использованием программно-аппаратного анализатора трафика FrameScore 350 (тестер, измеряющий и оценивающий время реакции следующих сетевых ресурсов: Web-сервер, файловый сервер, сервер электронной почты, а также серверы печати, DNS и DHCP).

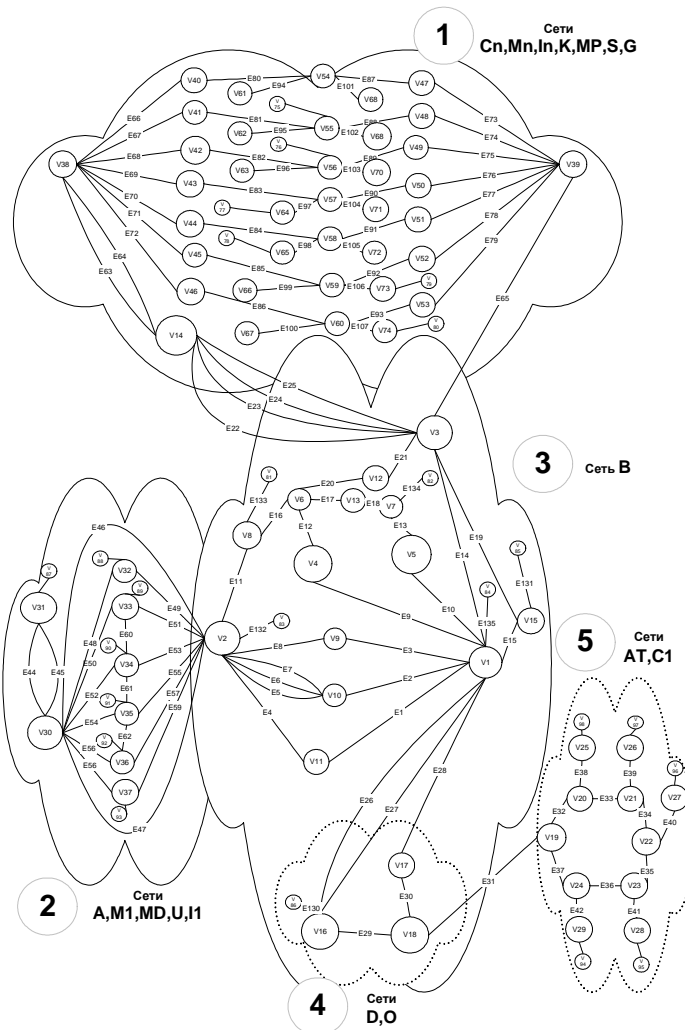


Рис. 5. Представление сегмента сети с помощью мультиграфа

Сегмент корпоративной сети был разделен на пять основных сетевых сообществ и представлен в виде гиперграфа (рис. 5), где $V_{75}-V_{80}, V_{87}$ – вершины графа, соответствующие выборочным серверам и рабочим станциям, V_1-V_{74} – вершины графа соответствуют сетевому оборудованию, где $V_{81}-V_{863}$, – вершины графа, соответствующие выборочным серверам, которые взаимодействуют с типом трафика, переназначенным для оптимизации. Ребра $E_1 - E_{107}$ соответствуют каналам связи, причем ребро E_{26}, E_{27} , ребро E_{44}, E_{45} , ребро E_7, E_8, E_9 , ребро E_{46}, E_{47} , ребро E_{64}, E_{63} , ребро $E_{22}, E_{23}, E_{24}, E_{25}$, являются отображением резервных каналов связи.

Рекомендации визуальной среды моделирования трафика с использованием нечетких параметров были использованы при изменении в таблицах маршрутизации. В результате оптимизации маршрутов появилась возможность прохождения трафика через маршрутизаторы с большими вычислительными способностями при реализации механизма QoS, что, в первую очередь, отразилось на уменьшении полосы пропускания трафика и более плотном ее использовании.

При проведении оптимизации была предложена следующая методика:

1. Произведены тестовые замеры работы ИВС.
2. Произведено моделирование работы ИВС в разработанном программном пакете, получены рекомендации для коррекции маршрутных таблиц на маршрутизаторах.
3. Произведена коррекция маршрутных таблиц с учетом рекомендаций среды моделирования.
4. Произведены тестовые замеры работы ИВС после коррекции маршрутных таблиц.
5. Произведена систематизация полученных данных.
6. Определена эффективность работы нечеткого алгоритма над четким, а также достигнуто более плотное заполнение предоставленной полосы канала, достигнуто увеличение пропускной способности каналов.

Таблица 2. Результат измерения оптимизации трафика

Трафик	Четкий алгоритм	Нечеткий алгоритм
Общее время выполнения задачи	70 мин. 00 сек	62 мин. 00 сек
Общее время выполнения приложения	71 мин. 37 сек	64 мин. 21 сек
Общий исходящий трафик	768 345 байт	794 357 байт
Общий входящий трафик	375 439 байт	403 547 байт
Потери пакетов входящего трафика	137 байт	104 байта
Потери пакетов исходящего трафика	656 байт	594 байта

Как видно из вышеприведенной таблицы, время работы, общий трафик, общие потери трафика снизились примерно на 10–12%. Результаты экспериментов подтверждают превосходство работы нечеткого алгоритма над четким. Использование подобного алгоритма ведет к существенному повышению качества работы эксплуатируемых ИВС.

Разработанный программный комплекс обеспечивает пользователю (проектанту, системному инженеру, сетевому аналитику, архитектору ИВС и пр.) следующие важные преимущества:

1. Возможность быстрого построения структурно-логических описаний сложных комплексов взаимодействующих между собой объектов, динамических процессов, потоков и баз при представлении моделируемых архитектур ИВС. Быстрота разработки моделей принципиально важна, так как моделирование должно служить не сдерживающим фактором, а ускорителем процесса оптимизации систем.

2. Возможность представления логико-динамических процессов обработки информационных потоков системы на разных уровнях детализации архитектур с использованием обобщений, адекватных данным уровням детализации.

3. Возможность прототипирования динамических моделей архитектур, т.е. представление их в принципиально открытой, реконфигурируемой, модифицируемой, уточняемой и детализируемой форме. Для крупномасштабных организаций процесс создания прикладных моделей может начинаться и параллельно развиваться в разных точках. Поэтому необходимо обеспечить единообразие создания моделей на базе единого каркаса, а именно на базе общего прототипа. Важно, чтобы этот процесс не сопровождался каждый раз перепрограммированием моделей, а состоял в редактировании и детализации простых структурно-визуальных компонент, логических связей, а также правил функционирования моделей.

4. Возможность создания библиотек типовых объектов и моделей типовых процессов, с помощью которых могут строиться конкретные модели топологий ИВС. Предусмотрена также возможность встраивания результатов моделирования одной из взаимодействующих между собой информационных систем в имитационные эксперименты с другой информационной системой для упрощения процесса исследования их совместного функционирования.

5. Возможность интеллектуальной обработки результатов динамического моделирования для оперативного получения требуемых оценочных метрик и характеристик исследуемой архитектуры ИВС по результатам имитационных экспериментов на продолжительных отрезках модельного времени.

6. Методы построения динамических моделей ориентированы одновременно на разработчиков информационных систем и экспертов предприятий, осуществляющих не только формирование и оценку требований к информационным системам ИВС, но и выполняющих реинжиниринг автоматизируемых бизнес-процессов организации.

Таким образом, можно сделать следующие выводы по реализации нечеткого алгоритма в программном пакете визуальной среды моделирования:

1. Программа имеет оконный графический интерфейс, предоставляющий пользователю удобство создания топологии корпоративной сети и настройки необходимых свойств для каждого объекта сети.

2. В программе IP-Lab реализован механизм работы с нечеткими характеристиками сети, которые представляются в виде нормированной трапециевидной функции принадлежности, формируемой на основе нечетких интервалов, установленных пользователем для соответствующих объектов корпоративной сети.

3. Объектно-ориентированное описание программы позволило создать ясную структуру потоков данных, протекающих при моделировании алгоритмов передачи пакетов и формировании

маршрутных таблиц. Кроме того, такой подход к программированию обеспечивает простоту дальнейшего усовершенствования программного средства.

4. Заключение

На сегодняшний день не существует протокола маршрутизации, который может использовать нечеткие данные, определенные экспертами, эксплуатирующими ИВС, о составе оборудования, его поведении в разные моменты времени, качестве каналов, параметрах местности, помещениях эксплуатации. Однако, используя именно эти данные, разработанный алгоритм дает возможность выдачи рекомендации по корректировке стандартных протоколов маршрутизации, которые осуществляются путем изменения маршрутных таблиц в маршрутизаторах. При оптимизации трафика в ИВС существуют этапы, когда необходимо оценить ситуацию в целом (при оптимизации крупных сегментов) и только потом оптимизировать более мелкие сегменты ИВС.

Используя систему визуального моделирования и предложенную методику, специалист может создавать наглядные проекты сетей, достаточно быстро их оценивать и динамически перестраивать, проводить предварительные эксперименты, не влияя на бизнес-процессы. Использование подобного инструмента ведет к существенному повышению качества эксплуатируемых ИВС.

Результаты экспериментов, произведенных в ходе исследования, подтверждают, что оптимизация с использованием предлагаемых моделей и методов дает лучший результат по сравнению с типовыми процедурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова М.В. Некоторые аспекты векторной оптимизации и ее приложения: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 1987. – С. 12–14.
2. Кораблин М.А., Симонова Е.В. Информационная технология компьютерного исследования коммуникационных сетей. – Киев: Электронное моделирование, 1991. – С. 59–71.
3. Вольфсон И.Е. Критерии надежности и синтез коммуникационных сетей с их учетом // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2000. – № 6. – С. 112–113.
4. Малышев Н.Г. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР / Н.Г. Малышев, Л.С. Берштейн, А.В. Боженюк. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 89–141.
5. Бернштейн Л.С., Боженюк А.В. Введение в теорию нечетких графов: Учебное пособие. – Таганрог: ТРТУ, 1999. – С. 26–31.
6. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М.: Мир, 1979. – С. 91
7. Аверкин А.Н. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – С. 77–94.
8. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. – М.: МИР, 1978. – С. 418.
9. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 1999. – С. 122.
10. Асанов М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – С. 88–94.
11. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – С. 189–211.
12. Вишневский В.М., Федотов Е.В. Анализ методов маршрутизации при проектировании сетей пакетной коммутации. BrdLS. "Teletraffic Theory and Computing Modeling". – София, 1990. – С. 66–68.
13. Иерархические схемы проектирования и декомпозиционные численные методы / П.С. Краснощеков, В.В. Морозов, И.М. Попов и др. // Известия РАН. ТиСУ. – 2001. – С. 54–59.

Стаття надійшла до редакції 03.09.2007