

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 004.725.7

*Ю.Л. Ижванов, В.П. Корячко, А.П. Шибанов,
А.Н. Сапрыкин, О.В. Лукьянов*

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ С ДОЗИРОВАННОЙ БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ И ПИРИНГОВЫМИ КАНАЛАМИ

На основе технологии открытых потоков оптимизируется сеть с перестроением и распределением пакетов по двухфазным параллельным путям в автономных системах сети с дозированной балансировкой нагрузки. Для оптимизации совокупной резервной мощности сети, состоящей из двух сетей с дозированной балансировкой нагрузки, соединенных пиринговыми каналами, используются генетические алгоритмы.

Ключевые слова: многопоточная маршрутизация, двухфазная маршрутизация, балансировка нагрузки, генетические алгоритмы.

Введение. В данной статье рассматривается оптимизация работы высокоскоростных каналов сети с дозированной балансировкой нагрузки (VLB) с использованием технологии OpenFlow.

Технология OpenFlow (технология открытых потоков) – это новая сетевая концепция, которая принципиально отличается от семиуровневой системы протоколов OSI (Open Systems Interconnection) международной организации по стандартам ISO (International Organization for Standardization), где основным используемым стеком протоколов является TCP/IP, а наиболее яркой реализацией – сеть Internet. В традиционном Internet решение проблемы управления сетью для борьбы с перегрузками в сети возлагается на двух «игроков» – на сетевых операторов и на алгоритмы динамической маршрутизации сети. В сетях TCP/IP произвольные соединения в процессе передачи пакетов (в пределах по схеме «каждый с каждым») могут быть реализованы только на третьем (сетевом) уровне протокола с существенными затратами времени на передачу пакета. При этом пользовательские приложения практически не влияют на характер процесса передачи пакетов по линии. В частности, разработчики приложений не могут оперативно формировать потоки из нескольких пакетов и организовывать параллельную передачу потоков. Это стало серьезным препятствием для создания сетей «со способностью к оптимизации». Если

автор приложения и решал сложные математические задачи, например, распределения трафика в пределах своей крупномасштабной виртуальной частной сети (VLAN), то перед ним вставала проблема реализации своих идей на практике. Это объясняется тем, что для «прошивки» кодов управляющих программ в коммуникационных устройствах нужно обращаться непосредственно к фирмам-разработчикам сетевого оборудования.

Переход на технологию OpenFlow, предложенный исследовательскими группами Стэнфордского университета и Калифорнийского университета в Беркли [1], позволяет разработчикам приложений получить в свое распоряжение средства доступа и программирования таблиц маршрутизаторов и коммутаторов через специальные контроллеры OpenFlow, связанные специальным каналом с основным маршрутизатором или коммутатором. Важным свойством технологии OpenFlow является возможность передачи потоков на втором (канальном) уровне протоколов, что резко повышает скорость передачи.

Пользовательское приложение, получая независимую информацию о состоянии сети (о местах перегрузок, отказе каналов и т.п.) от связанных между собою контроллеров OpenFlow, имеет возможность принять участие в управлении трафиком в сети в качестве «третьего игро-

ка». Например, ограничить на какое-то время объем передаваемого в сеть трафика, перенаправить часть трафика на резервные центры обработки данных (ЦОД) с целью обхода перегруженных участков сети и т.д. Совокупное воздействие многих приложений может существенно разгрузить проблемные участки сети. В России работы по сетям Open Flow только начинаются. В августе 2012 г. крупнейший российский телекоммуникационный оператор «Ростелеком» заключил контракт с резидентом «Сколково» – Центром прикладных исследований компьютерных сетей (ЦПИ КС) на проектирование и создание опытного сегмента на основе программно-конфигурируемых сетей OpenFlow [2]. О намерении внедрять технологию Open Flow для повышения характеристик качества передачи и уменьшения производимых затрат заявил и представитель Центрального банка России.

В работе [3] Valiant. L.G. была впервые предложена двухфазная маршрутизация с дозированием нагрузки по параллельным путям, получившая название VLB-маршрутизации. VLB-маршрутизация была использована в различных сетях с параллельными соединениями: при создании высокопроизводительных масштабируемых коммутаторов без централизованного планировщика; для построения маршрутизаторов [4, 5]; для управления трафиком с двухфазной маршрутизацией в Интернете [6, 7]. Zhang-Shen и McKewon [8, 9] предложили использовать VLB в магистральной сети, которая поддерживает все изменения матрицы входных потоков и управляется на основе заранее рассчитанных сценариев отказов. Использование сетей VLB, имеющих множество связей и разнообразие путей, улучшает вероятностно-временные и надежность характеристики сети.

Применение сетей VLB связано и с решением ряда проблем. Одной из них является увеличение требуемой емкости соединений для обеспечения заданных характеристик производительности и надежности.

При передаче потоков параллельно и согласованно по нескольким путям, состоящим из нескольких каналов, возникает проблема учета времени синхронизации каналов в пути от источника к узлу назначения. Для обеспечения необходимых показателей качества передачи синхронной информации необходимо рассчитывать как величину задержки передачи, так и ее вариацию (джиттер). Превышение допустимых значений этих параметров существенно ухудшает качество передаваемой речи или видео.

Задача заключается в такой балансировке потоков, которая обеспечивала бы минимально

необходимый резерв полосы пропускания наиболее загруженных каналов (например, не менее 20 %) при соблюдении требований к задержкам передачи потоков и джиттеру. Тогда созданные резервные мощности могут быть без существенных задержек времени использованы для прокладки дополнительных VLB-каналов при наступлении отказов, предусмотренных сценарием. При этом нет необходимости производить достаточно длительную динамическую перемаршрутизацию сети.

В статье [10] предложено решение задачи оптимизации потоков в пределах одной VLB-сети. В данной работе рассматривается задача балансировки потоков с учетом заданных ограничений по задержкам и джиттеру пакетов в двух автономных VLB-системах, соединенных пиринговыми каналами.

В работе [11] отмечается, что при объединении значительного количества пользовательских потоков вступает в действие закон больших чисел: пульсации одних потоков накладываются на периоды молчания других, так что суммарный поток пульсирует незначительно и влияние очередей является минимальным. Если трафик становится «идеально» синхронным, то задержки из-за пребывания в очередях исчезают вовсе – пакеты поступают с фиксированной задержкой на обработку коммуникационным устройством и распространение данных по каналам связи. Канал OC-192 (10 Гбит/с) в сети IP может быть загружен до 97 % от своей номинальной скорости, и только после этого порога начинают появляться ощутимые задержки пакетов вследствие ожидания в очередях. При пересылке трафика по каналу OC-48 между Сан-Франциско и Вашингтоном, оказалось, что 99,99 % посланных пакетов прибыли в точку назначения с вариацией задержки меньшей чем 1 мс, и только 0,01 % имели отклонения в 10-20 мс [11].

Синхронная передача потоков имеет место и при пересылке по виртуальному соединению нескольких подряд следующих пакетов для выдачи управляющих воздействий в реальном масштабе времени. При этом используются высокоскоростные оптические магистрали с резервированием полосы пропускания и безынерционные коммутаторы, у которых суммарная средняя скорость передачи выходных портов не меньше, чем у входных портов.

Потоки передаются по множеству соединенных коммутаторами виртуальных каналов. Непрерывная последовательность байт принимается на входной порт коммутатора; анализируются первые байты пакета, в которых находится адрес конечного компьютера сети. По найденному ад-

ресу находится строка в таблице коммутации, из которой определяется номер выходного порта, на который немедленно начинают передаваться байты пакета.

Полоса пропускания каждого виртуального канала должна быть выбрана за счет резервирования так, чтобы влиянием очередей можно было пренебречь. В каналах связи имеются, как постоянные составляющие задержки передачи (за счет распространения сигнала в физической среде, преобразований сигналов из одной формы в другую, усиления и регенерации сигналов и т. п.), так и переменная составляющая или джиттер (из-за нестабильности параметров электронных схем, влияния тепловых шумов в среде передачи, дифференциальной задержки и т.п.). Последние факторы действуют постоянно, т.е. не зависят от времени.

Новизна рассматриваемых в данной статье решений. В развитие результатов исследований, описанных в работах [10, 12-14], получены новые научные результаты, заключающиеся в следующем:

– впервые предложена процедура многопутевой маршрутизации в сети VLB, состоящей из двух автономных систем VLB, соединенных пиринговыми каналами, реализуемая на основе технологии открытых потоков;

– предложен не имеющий аналогов метод контроля вариаций задержек при передаче агрегированных параллельных потоков информации по технологии OpenFlow;

– предложена модификация численного метода нахождения распределений времени передачи потоков по сети с дозированной балансировкой нагрузки, состоящей из двух автономных систем VLB, соединенных пиринговыми каналами, программная реализация которой имеет примерно на порядок большее быстродействие, чем реализация на основе метода, предложенного в [14].

Цель работы. Целью данных исследований является разработка методов и алгоритмов конструирования трафика с использованием технологии открытых потоков в сети, состоящей из двух автономных систем (АС) с дозированной балансировкой нагрузки. Это достигается за счет многопутевой маршрутизации, что позволяет обеспечить требуемые показатели качества сети по надежности и производительности, при гарантированном обеспечении задержек передачи потоков и их вариаций.

Постановка задачи. Сеть состоит из двух автономных систем VLB. Каждая из них имеет свой внутренний трафик, а кроме того, каждая из автономных систем VLB передает и принимает

информацию от соседней VLB-системы через пиринговые каналы (от англ. peering – соседство – соглашение интернет-операторов об обмене трафиком между своими сетями). Передаваемый трафик задается тремя матрицами трафика: две из них определяют внутренний трафик каждой автономной VLB-системы, а третья – трафик между ними.

В обеих автономных VLB-системах по каждому пути от источника к узлу назначения поток передается через промежуточный узел. Каждый входной поток автономной VLB-системы может распределяться по одному, двум или трем путям, каждый из которых может иметь не более одного промежуточного узла. При этом допускается замена одного двухфазового пути прямым соединением. При передаче возникает постоянная составляющая задержки в узлах на преобразования информации и физическая задержка распространения в линиях. Считаем, что она пропорциональна числу каналов в пути и объему потока. Переменная составляющая задержки также увеличивается пропорционально числу каналов.

Задаются: предельно допустимые значения загрузки каналов (запланированный объем всей полосы пропускания канала), необходимый резерв полосы пропускания каждого канала, матрицы внутреннего трафика в автономных VLB-системах, матрица трафика между автономными VLB-системами, матрицы ограничений на задержки и джиттер при передаче потоков.

В качестве критерия оптимизации сети авторы предлагают максимизацию совокупной резервной мощности параллельных путей передачи необходимой:

- 1) для обработки пульсаций трафика;
- 2) прокладки дополнительных виртуальных каналов на случай возникновения отказов, соответствующих заданному сценарию, без проведения перемаршрутизации сети;
- 3) организации дополнительных каналов явной обратной связи в протоколе передачи потоков.

На рисунке 1 проиллюстрирована передача потока от узла 1 автономной системы VLB-1 до узла 9 автономной системы VLB-2.

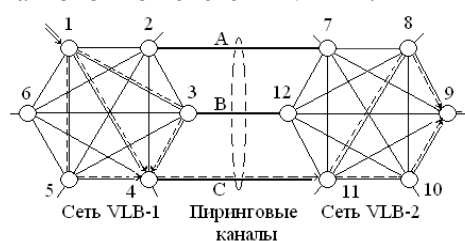


Рисунок 1 – Автономные VLB-системы с пиринговыми каналами

В узле 1 поток разделяется на 3 частичных потока и передается до узла 4 согласованно по трехпоточковому тракту. В узле 4 восстанавливается структура исходного потока, который передается по пиринговому каналу С в узел 11 автономной системы VLB-2. От узла 11 до узла 9 поток передается по двум маршрутам. Из узла 9 исходный поток уходит на выход автономной системы VLB-2.

Моделирование передачи потоков по автономным VLB-системам и пиринговым каналам. Для того чтобы разделять поток в любой пропорции, введем набор балансировочных параметров q_μ , так что $q_\mu \geq 0$ для всех μ и

$$\sum_{\mu=1}^{N-1} q_\mu = 1, \text{ где } N - \text{число узлов в сети VLB.}$$

Входной узел разделяет каждый поток в зависимости от $\{q_\mu\}$ и посылает q_μ каждого потока в промежуточный узел. Это позволяет не использовать некоторые узлы в качестве промежуточных (путем установки соответствующих q_μ к нулю).

Постоянную задержку в одном канале обозначим через T . Переменную составляющую в одном канале зададим случайной величиной с законом распределения Эрланга с плотностью $f(t) = \lambda(\lambda t)^{n-1} e^{-\lambda t} / (n-1)!, t \geq 0$. Для моделирования джиттера достаточно взять значение $n = 2$, а величину λ используем для того, чтобы добиться по возможности наилучшего совпадения эмпирического и теоретического распределений. Тогда $f(t) = \lambda^2 t e^{-\lambda t}, t \geq 0$. С учетом постоянной задержки пакетов в канале на величину T имеем $f(t) = \lambda^2 (t-T) e^{-\lambda(t-T)}, t \geq T$. Соответствующая функция распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-T)} [1 + \lambda(t-T)], t \geq T.$$

Производящая функция моментов времени передачи пакетов через канал

$$M(s) = e^{sT} [\lambda / (\lambda - s)]^2.$$

Нагрузка на параллельных путях балансируется таким образом, чтобы среднее время передачи потока по каждому из параллельных путей было по возможности одинаковым. Для балансировки нагрузки используем коэффициент $\alpha = qrR\beta$ так, как это описано в [10]. Здесь q – балансировочный параметр, r – коэффициент, учитывающий превышение длины пакета по отношению к стандартной его длине, R – целое число однородных каналов, через которые ведется передача, β – коэффициент, учитывающий величину отклонения полосы пропускания от

стандартной. В этом случае производящая функция моментов времени передачи потока по VLB-сети для одного пути описывается выражением:

$$M(s) = e^{s\alpha T} [\lambda / (\lambda - \alpha s)]^2.$$

Среднее время передачи и его дисперсия равны соответственно

$$\bar{t} = T + (2\alpha / \lambda), \sigma^2 = 2\alpha^2 / \lambda^2.$$

Сбалансированное распределение потоков в сети VLB. При сбалансированном распределении потока между произвольными узлами j и k по l параллельным путям функция распределения времени передачи потока между этими узлами

$$F_{\text{пар}l}(t) = \left\{ 1 - e^{-\frac{\lambda}{\alpha}(t-\alpha T)} \left[1 + \frac{\lambda(t-\alpha T)}{\alpha} \right] \right\}^l, t \geq \alpha T.$$

По этому выражению найдены производящие функции моментов времени передачи пакетов через агрегированные тракты, использующие два и три параллельных пути

$$M_{\text{пар}2}(s) = 2e^{s\alpha T} \left[\frac{\lambda^2}{(\lambda - \alpha s)^2} - \frac{\lambda^2}{(2\lambda - \alpha s)^2} - \frac{2\lambda^3}{(2\lambda - \alpha s)^3} \right],$$

$$M_{\text{пар}3}(s) = 3e^{s\alpha T} \times \left[\frac{\lambda^2}{(\lambda - \alpha s)^2} - \frac{2\lambda^2}{(2\lambda - \alpha s)^2} - \frac{4\lambda^3}{(2\lambda - \alpha s)^3} + \frac{\lambda^2}{(3\lambda - \alpha s)^2} + \frac{4\lambda^3}{(3\lambda - \alpha s)^3} + \frac{6\lambda^4}{(3\lambda - \alpha s)^4} \right].$$

Из последних двух выражений находим математические ожидания и дисперсии времени передачи пакетов по агрегированным трактам, состоящим из двух и трех параллельных путей:

$$\bar{t}_{\text{пар}2} = \alpha T + 2,75\alpha / \lambda, \sigma_{\text{пар}2}^2 = 2,1875\alpha^2 / \lambda^2, (1)$$

$$\bar{t}_{\text{пар}3} = \alpha T + 3,21\alpha / \lambda, \sigma_{\text{пар}3}^2 = 2,24\alpha^2 / \lambda^2. (2)$$

Оценка величины джиттера по интервалу «трех сигм»: $4,24 / \lambda$; $2,22 / \lambda$; $1,50 / \lambda$ подтверждает интуитивный факт его уменьшения при последовательном распараллеливании информационных потоков по двум и трем путям (каналы однородные, балансировка равномерная, используются две фазы).

Несбалансированное распределение потоков в сети VLB. В ряде случаев в сети VLB не удается равномерно сбалансировать нагрузку по двухфазным путям. Например, в потоке часть информации имеет закрытый характер и ее можно передавать через узлы с полномочиями на передачу только этой информации. Рассмотрим случай передачи потоков в сети VLB параллель-

но по двум каналам, в каждом из которых имеется один промежуточный узел.

Для определенности примем, что $\alpha_1 < \alpha_2$.

Тогда

$$f_1^{(\alpha_1)}(t) = \left(\frac{\lambda}{\alpha_1}\right)^2 (t - \alpha_1 T) e^{-\frac{\lambda}{\alpha_1}(t - \alpha_1 T)}, \quad t \geq \alpha_2 T,$$

$$f_2^{(\alpha_2)}(t) = \left(\frac{\lambda}{\alpha_2}\right)^2 (t - \alpha_2 T) e^{-\frac{\lambda}{\alpha_2}(t - \alpha_2 T)}, \quad t \geq \alpha_2 T,$$

$$F_1^{(\alpha_1)}(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{\alpha_1}(t - \alpha_1 T)} \left[1 + \frac{\lambda(t - \alpha_1 T)}{\alpha_1} \right], \quad t \geq \alpha_2 T,$$

$$F_2^{(\alpha_2)}(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{\alpha_2}(t - \alpha_2 T)} \left[1 + \frac{\lambda(t - \alpha_2 T)}{\alpha_2} \right], \quad t \geq \alpha_2 T,$$

$$\begin{aligned} f_{\text{пар}L}(t) &= f_1^{(\alpha_1)}(t)F_2^{(\alpha_2)}(t) + F_1^{(\alpha_1)}(t)f_2^{(\alpha_2)}(t) = \\ &= \left(\frac{\lambda}{\alpha_1}\right)^2 (t - \alpha_1 T) \exp\left[-(\lambda/\alpha_1)(t - \alpha_1 T)\right] + \\ &+ \left(\frac{\lambda}{\alpha_2}\right)^2 (t - \alpha_2 T) \exp\left[-(\lambda/\alpha_2)(t - \alpha_2 T)\right] - \\ &- \frac{\lambda^2 \exp\left[2\lambda T - (\lambda t/\alpha_1\alpha_2)\right] \left[t \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) - T \right]}{\alpha_1\alpha_2} - \\ &- \frac{\lambda^3 \exp\left[2\lambda T - (\lambda t/\alpha_1\alpha_2)\right]}{(\alpha_1\alpha_2)^2} \times \\ &\times (t^2 - tT + \alpha_1\alpha_2 T^2), \quad t \geq \alpha_2 T. \end{aligned}$$

Характеристическая функция времени передачи $\chi_{\text{пар}L}(\zeta) = \int_{\alpha_2}^{\infty} e^{i\zeta t} f_{\text{пар}L}(t) dt$. Вычисляя интеграл и выполняя замену переменных $i\zeta = s$, находим эквивалентную производящую функцию моментов

$$\begin{aligned} M_E(s) &= \lambda^2 \exp\left\{ \lambda \left[T - (\alpha_2/\alpha_1) \right] + s\alpha_2 \right\} \times \\ &\times \left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1 T}{\alpha_1(\lambda - \alpha_1 s)} + \frac{1}{(\lambda - \alpha_1 s)^2} \right] + \\ &+ \lambda^2 \exp\left[\lambda(T - 1) + \alpha_2 s \right] \left[\frac{1 - T}{\lambda - \alpha_2 s} + \frac{1}{(\lambda - \alpha_2 s)^2} \right] - \\ &- \lambda^2 \exp\left[2\lambda T - (\lambda/\alpha_1) + \alpha_2 s \right] \times \\ &\times \left[\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - \alpha_1 T}{\alpha_1(\lambda - \alpha_1\alpha_2 s)} + \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{(\lambda - \alpha_1\alpha_2 s)^2} \right] - \\ &- \lambda^3 \exp\left[2\lambda T - (\lambda/\alpha_1) + \alpha_2 s \right] \times \end{aligned}$$

$$\times \left[\frac{\alpha_2 - T + \alpha_1 T^2}{\alpha_1(\lambda - \alpha_1\alpha_2 s)} + \frac{2\alpha_2 - T}{(\lambda - \alpha_1\alpha_2 s)^2} + \frac{2\alpha_1\alpha_2}{(\lambda - \alpha_1\alpha_2 s)^3} \right].$$

Математическое ожидание и дисперсия времени передачи по агрегированному каналу с разной длиной потоков находятся по формулам

$$\bar{t}_{\text{пар}L} = dM_E(s)/ds|_{s=0},$$

$$\sigma_{\text{пар}L}^2 = d^2M_E(s)/ds^2|_{s=0} - \left[dM_E(s)/ds|_{s=0} \right]^2.$$

Среднее время передачи и дисперсия для пирингового канала определяются выражениями:

$$\bar{t}_{\pi} = T_{\pi} + (2\alpha_{\pi}/\lambda_{\pi}) \sigma_{\pi}^2 = 2\alpha_{\pi}^2/\lambda_{\pi}^2,$$

где индекс π – определяет номер пирингового канала.

Нахождение распределения времени передачи потока. При необходимости получения вероятностно-временных оценок потоков можно найти численно закон распределения времени передачи потока. Рассмотрим случай передачи потока из узла 1 в узел 9 (рисунок 1). Перейдем от производящих функций моментов к характеристическим функциям путем замены переменных $s = i\zeta$. Тогда эквивалентная характеристическая функция $\chi_E(\zeta)$ времени передачи потока из конца в конец равна произведению характеристических функций времени передачи потока через сети VLB-1 и VLB-2 и соединяющий их пиринговый канал:

$$\chi_E(\zeta) = \chi_{\text{пар}3}^{VLB-1}(\zeta) \chi_{\pi}(\zeta) \chi_{\text{пар}2}^{VLB-2}(\zeta).$$

Здесь

$$\begin{aligned} \chi_{\text{пар}3}^{VLB-1}(\zeta) &= 3 e^{i\zeta\alpha_1 T_1} \times \\ &\times \left[\frac{\lambda_1^2}{(\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^2} - \frac{2\lambda_1^2}{(2\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^2} - \frac{4\lambda_1^3}{(2\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^3} + \right. \\ &+ \left. \frac{\lambda_1^2}{(3\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^2} + \frac{4\lambda_1^3}{(3\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^3} + \frac{6\lambda_1^4}{(3\lambda_1 - \alpha_1 i\zeta)^4} \right], \\ \chi_{\pi}(\zeta) &= e^{i\zeta\alpha_{\pi} T_{\pi}} \left[\lambda_{\pi} / (\lambda_{\pi} - \alpha_{\pi} i\zeta) \right]^2, \\ \chi_{\text{пар}2}^{VLB-2}(\zeta) &= 2 e^{i\zeta\alpha_2 T_2} \times \\ &\times \lambda_2^2 \left[\frac{1}{(\lambda_2 - \alpha_2 i\zeta)^2} - \frac{4\lambda_2 - \alpha_2 i\zeta}{(2\lambda_2 - \alpha_2 i\zeta)^3} \right], \end{aligned}$$

где символом χ обозначены характеристические функции, индексами 1 и 2 помечены переменные подсетей VLB-1 и VLB-2 соответственно. По легко определяемым значениям $\text{Re} \chi_E(\zeta)$ и $\text{Im} \chi_E(\zeta)$, вычисленным в узлах интерполяции

функции $\chi_E(\zeta)$ многочленом Лагранжа второй степени, находится плотность распределения времени передачи потока из конца в конец в соответствии с численным методом эквивалентных упрощающих преобразований, изложенным в работе [14].

Случайное время передачи потока из любого узла VLB-сети 1 до любого узла VLB-сети 2 можно найти посредством простой GERT-сети, состоящей из последовательно соединенных дуг. Применение альтернативного подхода, связанного с прямым нахождением сверток распределений с длинными хвостами, приводит к существенному накоплению погрешностей. Поэтому применим численный метод нахождения плотности распределения вероятностей $f(t)$ времени прохождения GERT-сети с использованием формулы обращения [14]

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\zeta t} \chi_E(\zeta) d\zeta.$$

Для упрощения вычислений сначала найдем значение $f(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \chi_E(\zeta) d\zeta$. Выполняем интерполирование эквивалентной характеристической функции времени передачи потока по GERT-сети $\chi_E(\zeta)$ на отрезках $[d_\gamma - \varepsilon, d_\gamma + \varepsilon]$, $\gamma = \overline{1, p}$ (p – число отрезков интерполяции) многочленом Лагранжа $L_2(\zeta)$ второй степени с равноотстоящими узлами (d_γ – середина отрезка интерполяции) в пределах от $[-\tilde{L}, \tilde{L}]$. Точность результата регулируется ошибкой усечения при выборе интервала интегрирования формулы обращения (дополнительно к погрешности интерполяции).

В результате интерполяции имеем $\chi_{E\gamma}(\zeta) \approx L_{2\gamma}(\zeta)$ и

$$\begin{aligned} f(0) &= \frac{1}{2\pi} \sum_{\gamma=1}^p \int_{d_\gamma-\varepsilon}^{d_\gamma+\varepsilon} L_{2\gamma}(\zeta) d\zeta = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{\gamma=1}^p \int_{d_\gamma-\varepsilon}^{d_\gamma+\varepsilon} (U_{0\gamma} + U_{1\gamma}\zeta + U_{2\gamma}\zeta^2) d\zeta, \end{aligned}$$

где $U_{0\gamma}, U_{1\gamma}, U_{2\gamma}$ – значения коэффициентов при степенях ζ многочлена Лагранжа $L_{2\gamma}(\zeta)$ функции $\chi_{E\gamma}(\zeta)$ на отрезке $[d_\gamma - \varepsilon, d_\gamma + \varepsilon]$. Поскольку мнимая часть характеристической функции нечетная, то $f(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \chi_{E\text{Re}}(\zeta) d\zeta$. После интегрирования получаем

$$f(0) = \frac{\varepsilon}{\pi} \sum_{\gamma=1}^p \left(U_{0\gamma} + U_{1\gamma} d_\gamma + U_{2\gamma} \frac{3d_\gamma^2 + \varepsilon^2}{3} \right).$$

Для последовательного вычисления значений функции $f(t_\tau)$ при различных значениях аргумента t_τ , $\tau = \overline{1, \theta}$ плотность пошагово «сдвигаем» по оси t на заранее заданную величину. Фактически на каждом шаге перемещается ось t , а функция плотности «остается на месте». Все остальные значения плотности распределения вероятностей находятся посредством рекуррентного умножения значений характеристической функции $\chi_E(\zeta) = \chi_{E\text{Re}}(\zeta) + i\chi_{E\text{Im}}(\zeta)$, вычисленных на предыдущем шаге, на величину $\exp(i\zeta T) = \cos \zeta T + i \sin \zeta T$, где T – шаг изменения аргумента t .

Так как нахождение плотности распределения вероятностей времени передачи потока в соответствии с предлагаемым численным методом производится с использованием GERT-сети очень простой структуры, то оно может быть реализовано путем добавления выше описанных функций в пакет прикладных программ оптимизации VLB-сети. При этом нет необходимости применять в полном объеме достаточно трудоемкий в вычислительном отношении метод эквивалентных упрощающих преобразований [14], который предназначен для расчетов GERT-сетей большой размерности и сложной структуры.

По полученной плотности распределения вероятностей времени передачи потока можно оценить важные характеристики качества передачи, например вероятность своевременной доставки в узел назначения или уточнить величину и характер джиттера.

Алгоритм оптимизации VLB-сети. Каждая линия l имеет фиксированную предельную скорость передачи c_l . Обозначим через $\rho_l^{(j,k)}$ долю трафика от маршрутизатора j к маршрутизатору k , который проходит по линии l . В процессе многопутевой маршрутизации устанавливаются значения переменных $x^{(j,k)}$, представляющих собой скорость трафика, входящего в маршрутизатор j , который предназначен маршрутизатору k . С учетом запроса на передачу $x^{(j,k)}$ объем трафика по каждой линии есть $y_l = \sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)}$, который суммируется по всем парам вход-выход. Целью оптимизации всей сети считаем сведение к минимуму $\sum_l g(y_l/c_l)$. Штрафная функция g является

выпуклой, неубывающей и дважды дифференцируемой функцией, которая налагает штраф при увеличении нагрузки линии. В качестве штрафной функции выбирается экспоненциальная функция. Тогда формально задача оптимизации при предельно допустимых значениях средней задержки передачи потока \bar{t}_{np} и ее вариации σ_{np} в пути l представляется как

$$\left. \begin{aligned} &\text{минимизировать } \sum_l \exp \left[\left(\sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)} \right) / l \right] \\ &\text{при условии } \sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)} \leq c_l, \mathbf{x} \geq 0, \\ &\bar{t}_l \leq \bar{t}_{np}, \sigma_l \leq \sigma_{np}. \end{aligned} \right\}$$

Для нахождения решения используется генетический алгоритм. На рисунке 2 представлен пример кодирования хромосомы для двух автономных VLB-систем, соединенных между собой пиринговыми каналами.

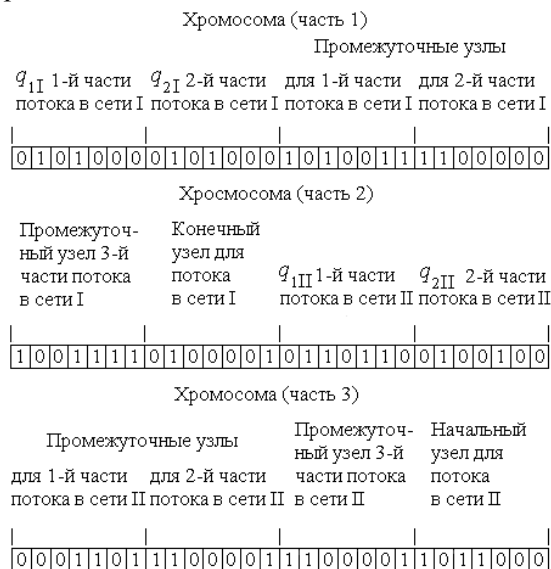


Рисунок 2 – Структура хромосомы

Хромосома описывается набором последовательно записанных элементов: балансировочными параметрами $q_{1I}, q_{2I}, q_{1II}, q_{2II}$ для первой и второй частей потока в обеих VLB-сетях, номерами промежуточных узлов для первой, второй и третьей частей потока в обеих сетях. Величина потока определяется в Мбит/с и характеризуется выражениями (1) и (2). Балансировочные параметры $0 \leq q_1 \leq 1, 0 \leq q_2 \leq 1$ соответственно показывают, какая доля общего потока будет проходить через первый и второй промежуточный узлы. Остальная часть потока определяется величиной $1 - q_1 - q_2$ и направляется в третий промежуточный узел. На кодирование балансировочного параметра отводится 7 бит.

Конечный узел потока в первой автономной VLB-системе и начальный узел второй автономной VLB-системы определяются однозначно, если поток следует из одной VLB-системы в другую.

Начальная популяция особей генерируется так, чтобы отсутствовали запрещенные особи, содержащие несуществующие связи или узлы. В алгоритме применяется одноточечный кроссинговер с заданием вероятности скрещивания особей, что приближает его к реальному отбору в естественной среде. Для выхода алгоритма из возможных «тупиковых» ситуаций используется оператор мутации, который производит случайное изменение каждой позиции в хромосоме с вероятностью 5-10 %. Однако при увеличении вероятности мутации повышается вероятность появления недействительных хромосом (несуществующих номеров промежуточных узлов). Запрещенными считаются хромосомы, в которых после скрещивания получаются недействительные номера узлов, а также те из них, для которых не выполняются ограничения по задержкам и джиттеру.

Отбор в новое поколение происходит по методам турнирного отбора и элитизма. Чтобы избежать потери хорошего промежуточного решения, заданное число особей формируется с использованием стратегии элитизма. Для этого популяция отсортировывается по убыванию функции полезности, после чего лучшие особи гарантированно переходят в новое поколение. Такой подход позволяет анализировать различные варианты хромосом из пространства поиска. Остальное количество необходимых для скрещивания особей выбирается турнирным отбором.

В реализованной программе предусмотрена выдача графика функции приспособленности и диаграмм суммарных нагрузок на каждый канал после оптимизации. На рисунке 3 изображены типовые диаграммы загрузки автономной VLB-системы до и после оптимизации.

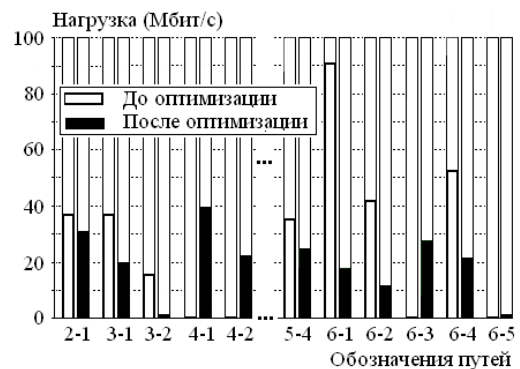


Рисунок 3 – Нагрузка каналов автономной VLB-системы до и после оптимизации

После оптимизации нагрузка наиболее загруженных каналов значительно снизилась, что увеличивает резервную полосу пропускания. Аналогичные диаграммы получены и для пиринговых каналов.

Заключение. Результатом оптимизации является увеличение резервной полосы пропускания как наиболее загруженных внутренних каналов автономных VLB-систем, так и соединяющих их пиринговых каналов. Относительный выигрыш при сравнении с типовыми «ручными» решениями сетевых операторов составляет в среднем 5-7 %. Это увеличивает возможности обработки случайно возникающих во времени пульсаций трафика, организации новых параллельных путей при возможных отказах без выполнения перемаршрутизации сети, а также для создания виртуальных каналов явной обратной связи для протокола передачи потоков. Задача решается с контролем задержек передачи пакетов и их вариаций.

Статья подготовлена при поддержке Министерства образования и науки России (контракт 14.514.11.4040), а также Российского фонда фундаментальных исследований, грант 11-07-00121-а.

Библиографический список

1. Miller Rich. Tech Titans Back OpenFlow Networking Standard. – электр. дан. – URL: <http://blog.adivohost.ru/?p=27>.
2. Крупин А. «Ростелеком» займется проектированием решений на базе программно-реконфигурируемых сетей – электр. дан. – URL: <http://www.servernews.ru/tags/OpenFlow>.
3. Valiant. L.G. A scheme for fast parallel communication. SIAM Journal on Computing, 1982. 11(2): p. 350–361.
4. Bernasconi P., Gripp J., Neilson D., Simsarian J., Stiliadis D., Varma A. and Zirngibl M. Architecture of an integrated router interconnected spectrally (IRIS). High Performance Switching and Routing, 2006. Workshop on, p. 8.
5. Argyraki K., Baset S. Chun B.-G, Fall K., Iannaccone G., Knies A., Kohler E., Manesh M., Nedeveschi S. and Ratnasamy S. Can software routers scale? In PRES-TO'08: Proceedings of the ACM workshop on Programmable routers for extensible services of tomorrow, 2008. p. 21–26.
6. Kodialam M., Lakshman T.V., Orlin J.B. and Sengupta S. A Versatile Scheme for Routing Highly Variable Traffic in Service Overlays and IP Backbones. In Proc. IEEE INFOCOM, April 2006.
7. Kodialam M., Lakshman T.V. and Sengupta S. Efficient and robust routing of highly variable traffic. In HotNets III, November 2004.
8. Zhang-Shen R. and McKeown N. Designing a Predictable Internet Backbone Network. In HotNets III, November 2004.
9. Zhang-Shen R. and McKeown N. Designing a Fault-Tolerant Network Using Valiant Load-Balancing. Proc. IEEE INFOCOM, 2008. p. 2360–2368.
10. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сети с дозированной балансировкой нагрузки // Системы управления и информационные технологии № 3(49). 2012. С. 37-42.
11. Олифер В., Олифер Н, Петрусов Д. ATM и MPLS враги или союзники? // Журнал сетевых решений LAN, 2002. № 12.
12. Jiayue He, Jennifer Rexford, and Mung Chiang. Design for Optimizability: Traffic Management of a Future Internet // Computer communication and networks, Springer, 2010. p. 3 – 18.
13. Rui Zhang-Shen. Valiant Load-Balancing: Building Networks That Can Support All Traffic Matrices // Computer communication and networks, Springer, 2010. p. 19-30.
14. Shibanov A.P. Finding the distribution density of the time taken to fulfill the GERT network on the basis of equivalent simplifying transformation // Automation and Remote Control. Plenum Press New York, NY, USA. February 2003 . Volume 64. Issue 2. p. 279–287.

УДК 004.827

Л.А. Демидова, Н.А. Хэбе

ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ОТБОРА КОНКУРСНЫХ ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается задача многокритериального отбора конкурсных проектов, решаемая в ходе группового экспертного оценивания в условиях неточных знаний экспертов как об оценках конкурсных проектов по критериям оценивания, так и о значимости самих критериев в процессе принятия решения. Предложен подход к задаче отбора конкурсных проектов, реализующий представление неточных знаний экспертов с использованием нечетких лингвистических переменных.

Ключевые слова: нечеткая лингвистическая переменная, экспертное оценивание, конкурсный проект.

Введение. В современных социально-экономических условиях в России существует объективная необходимость в привлечении инвестиций в различные отрасли экономики, что, в свою очередь, требует применения передовых информационных технологий, обеспечивающих эффективность процесса принятия управленческих решений.

В инвестиционной деятельности применение передовых информационных технологий к принятию решений предполагает обеспечение адекватного выполнения классификации и отбора конкурсных проектов с последующим распределением финансовых ресурсов между ними.

Зачастую при реализации инвестиционных конкурсных проектов приходится сталкиваться с повышенным риском невозврата вложенных средств, особенно когда к реализации принимаются проекты, не имеющие аналогов в прошлом.

Отбор конкурсных проектов в большинстве случаев заключается в выборе таких проектов из числа возможных, в которых с учетом разнообразных критериев оценивания и противоречивых требований будет оптимизирована общая ценность, в максимальной степени обеспечивающая достижение поставленных целей. Наличие большого количества критериев оценивания, противоречивость требований, неоднозначность и неуверенность экспертов при выставлении оценок проектов по критериям, ошибки в выборе приоритетов усложняют процедуру принятия решений по отбору конкурсных проектов.

Для выполнения процедуры отбора конкурсных проектов, особенно в сложных и уникальных ситуациях, привлекаются эксперты, консультанты, системные аналитики, которые должны, основываясь на своих субъективных

представлениях и знаниях в конкретной предметной области, выявить достоинства и недостатки конкурсных проектов и оценить последствия принятия их к реализации.

Однако довольно часто даже высококвалифицированные эксперты в процессе оценивания могут давать противоречивые оценки как самих конкурсных проектов по критериям оценивания, так и важности (значимости) критериев оценивания. Кроме того, иногда эксперты способны определить лишь интервалы принадлежности оценок, затрудняясь выставить однозначные (четкие) оценки по какой-либо балльной шкале.

В настоящее время, несмотря на наличие разнообразных подходов к решению задачи упорядочения и отбора различных объектов на основе оценок, полученных при групповом экспертном оценивании [1, 2, 5, 6], существует необходимость в разработке математического аппарата, позволяющего принимать адекватные и обоснованные решения с использованием субъективных качественных данных, представленных, в том числе, в виде интервальных оценок.

В качестве инструментария при разработке такого математического аппарата может быть использована теория нечетких множеств [3, 4], в частности, широко применяемые в ней нечеткие лингвистические переменные, а также непрерывный расширенный оператор упорядоченного взвешенного среднего над нечеткими (неопределенными) лингвистическими переменными *ULWC – EOWA* (Uncertain Linguistic Weighted Continuous – Extended Ordered Weighted Averaging) [7].

Цель работы. Целью настоящей работы является повышение качества решений по отбору конкурсных проектов в условиях неточной и не-

определенной экспертной информации посредством разработки математического аппарата, основанного на применении нечетких лингвистических переменных и позволяющего принимать адекватные и обоснованные решения с использованием субъективной качественной экспертной информации, представленной, в том числе, в виде интервальных оценок.

Теоретическая часть. Пусть в задаче отбора конкурсных проектов заданы:

– $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множество конкурсных проектов;

– $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множество критериев, по которым оцениваются конкурсные проекты;

– $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ – множество экспертов.

При этом предполагается, что для некоторых оценок конкурсных проектов по критериям оценивания и некоторых оценок важности (значимости) критериев оценивания определены лишь интервалы принадлежности оценок, а не однозначные (чёткие) оценки по какой-либо балльной шкале (как это требуется в большинстве подходов, обеспечивающих классификацию и отбор объектов).

Для представления неточных знаний экспертов как об оценках конкурсных проектов по критериям оценивания, так и о значимости самих критериев целесообразно использовать принципы описания и обработки (например, с целью упорядочения) неточных данных об объектах с применением нечетких лингвистических переменных.

Пусть $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -L, -L+1, \dots, L-1, L\}$ – некоторая дискретная лингвистическая шкала, где s_α – лингвистическая переменная; L – некоторое натуральное число ($L \in \mathbb{N}$) [7].

Например, при $L = 3$ лингвистическая шкала оценок $S = (s_{-L}, s_{-L+1}, \dots, s_0, \dots, s_{L-1}, s_L)$ может быть определена как:

$S = (s_{-3}, s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3) =$ («чрезвычайно низкая», «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая», «чрезвычайно высокая»), где каждый лингвистический терм (например, «чрезвычайно низкая», «очень низкая» и т.п.) соответствует классической чёткой оценке (-3 , -2 и т.п.), которая будет являться одной из границ (левой или правой) интервала оценивания в случае представления неточных знаний экспертов [при этом, если знания (оценки) являются точными, то левая граница будет совпадать с правой].

Во избежание потери лингвистической информации о том или ином принимаемом решении, дискретная лингвистическая шкала

$S = (s_{-L}, s_{-L+1}, \dots, s_0, \dots, s_{L-1}, s_L)$ может быть расширена на непрерывную лингвистическую шкалу $\tilde{S} = \{s_\alpha \mid \alpha \in [-q, q]\}$, где q – достаточно большое положительное число ($q \in \mathbb{R}_+$). Тогда, если $s_\alpha \in S$, то s_α называют исходным лингвистическим термом, в противном случае s_α называют расширенным лингвистическим термом.

Исходные лингвистические термы используются для оценки каких-либо объектов (например, для оценки как самих конкурсных проектов, так и значимости критериев их оценивания), а расширенные лингвистические термы – для реализации вычислений и выполнения упорядочения объектов [7].

Лингвистические термы s_i и s_j ($s_i, s_j \in S$) обладают следующими свойствами:

– если $i > j$, то $s_i \succ s_j$ (s_i лучше s_j);

– если $s_i \geq s_j$, то $\max(s_i, s_j) = s_i$;

– если $s_i \leq s_j$, то $\min(s_i, s_j) = s_i$.

Для лингвистических термов s_i и s_j определены операции:

– сложения: $s_i \oplus s_j = s_{i+j}$;

– умножения: $s_i \otimes s_j = s_{i \cdot j}$,

где \oplus – знак сложения; \otimes – знак умножения.

Кроме того, к лингвистическому терму s_i могут быть применены операции:

– отрицания: $\text{neg}(s_i) = s_{-i}$;

– возведения в степень $(s_i)^j = s_{i \cdot j}$;

– умножения на произвольное число λ ($\lambda \in \mathbb{R}$): $\lambda \otimes s_i = s_{\lambda \cdot i}$.

Интервал $\tilde{s} = [s_a, s_b]$ называется нечеткой лингвистической переменной, если $s_a, s_b \in \tilde{S}$, где s_a, s_b термы определяют нижнюю и верхнюю границы интервала соответственно ($a \leq b$).

Пусть \tilde{S} – множество нечетких лингвистических переменных. Тогда для нечетких лингвистических переменных $\tilde{s}_1 = [s_{a_1}, s_{b_1}]$ и $\tilde{s}_2 = [s_{a_2}, s_{b_2}]$ определены операции:

$\tilde{s}_1 \oplus \tilde{s}_2 = [s_{a_1}, s_{b_1}] \oplus [s_{a_2}, s_{b_2}] = [s_{a_1+a_2}, s_{b_1+b_2}]$;

$\lambda \tilde{s}_1 = \lambda [s_{a_1}, s_{b_1}] = [s_{\lambda \cdot a_1}, s_{\lambda \cdot b_1}]$;

$\tilde{s}_1 \otimes \tilde{s}_2 = [s_{a_1}, s_{b_1}] \otimes [s_{a_2}, s_{b_2}] = [s_{a_1 \cdot a_2}, s_{b_1 \cdot b_2}]$;

$\lambda(\tilde{s}_1 \oplus \tilde{s}_2) = \lambda \tilde{s}_1 \oplus \lambda \tilde{s}_2$;

$(\lambda_1 + \lambda_2) \tilde{s}_1 = \lambda_1 \tilde{s}_1 \oplus \lambda_2 \tilde{s}_1$.

В случае когда при выполнении расчетов с нечеткими лингвистическими переменными необходимо учитывать их различные степени зна-

чимости (важности), может быть использован расширенный оператор упорядоченного взвешенного среднего (*EOWA* – extended ordered weighted averaging) $EOWA_w: \tilde{S}^n \rightarrow \tilde{S}$, определяемый как [7, 8]:

$$\begin{aligned} EOWA_w(s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_n}) = \\ = (w_1 \otimes s_{b_1}) \oplus (w_2 \otimes s_{b_2}) \oplus \dots, \\ \oplus (w_n \otimes s_{b_n}) = s_{\tilde{b}} \end{aligned} \quad (1)$$

где n – количество нечетких лингвистических переменных; s_{b_i} – i -й наибольший элемент в множестве лингвистических переменных $(s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_n})$; $s_{\tilde{b}} = \sum_{i=1}^n w_i b_i$; $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ – вектор весов (коэффициентов относительной важности) нечетких переменных лингвистических переменных ($w_i \in [0, 1]$; $\sum_{i=1}^n w_i = 1$).

Для вычисления величины веса (коэффициента относительной важности) w_i ($i = \overline{1, n}$) может быть использована формула, предложенная Ягером:

$$w_i = Q\left(\frac{i}{n}\right) - Q\left(\frac{i-1}{n}\right), \quad (2)$$

где

$$Q(r) = \begin{cases} 0, & r < \alpha \\ \frac{r - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq r \leq \beta \\ 1, & r > \beta. \end{cases} \quad (3)$$

Квантификатор Q в формуле (3) определяется как линейная функция принадлежности при $\alpha, \beta, r \in [0, 1]$ [7, 8].

Значения параметров (α, β) определяются в зависимости от лингвистического смысла квантификатора Q . Квантификатору Q , описывающему понятие «много» (например, «много» экспертов, поддерживающих консервативную стратегию принятия решений), соответствует пара значений $(\alpha, \beta) = (0, 3; 0, 8)$; квантификатору Q , описывающему понятие «по меньшей мере половина», соответствует пара значений $(\alpha, \beta) = (0, 0; 0, 5)$; квантификатору Q , описывающему понятие «столько, сколько возможно», соответствует пара значений $(\alpha, \beta) = (0, 5; 1, 0)$ [7].

Кроме того, квантификатор Q может быть определен с помощью произвольной нелинейной функции, удовлетворяющей требованию неубывания. Так, например, в качестве квантификато-

ра Q могут использоваться функции $Q(r) = r^2$; $Q(r) = r^{1/2}$ и т.п. [8].

К нечеткой лингвистической переменной $[s_\alpha, s_\beta]$ может быть применен непрерывный оператор интервального аргумента f (*C* – *EOWA* – continuous *EOWA*), определяемый как [7]:

$$f_\rho([s_\alpha, s_\beta]) = s_J, \quad (4)$$

где

$$J = \int_0^1 \frac{d\rho(y)}{dy} (\beta - y(\beta - \alpha)) dy; \quad (5)$$

$\rho: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ – функция, обладающая следующими свойствами: $\rho(0) = 0$; $\rho(1) = 1$; если $x > y$, то $\rho(x) > \rho(y)$.

Функция ρ является базисной монотонной функцией, определенной на единичном интервале. Функция ρ характеризует стратегию риска лица, принимающего решения.

Так, если $\rho(y) = y^\delta$ ($\delta \geq 0$), то непрерывный оператор интервального аргумента f принимает вид:

$$f_\rho([s_\alpha, s_\beta]) = s_{\frac{\beta + \delta\alpha}{\delta + 1}}. \quad (6)$$

Параметр δ в формуле (6) характеризует степень риска, а выбор значения параметра δ определяет стратегию, в соответствии с которой принимается решение по упорядочению объектов.

При выполнении расчетов по формуле (6) определяется расширенный лингвистический терм s_γ , где $\gamma = \frac{\beta + \delta\alpha}{\delta + 1}$.

Если $\delta \rightarrow 0$, то $\delta\alpha \rightarrow 0$, роль термина s_α становится минимальной, терм s_β играет определяющую роль в принятии решения и $s_\gamma \rightarrow s_\beta$. В этом случае стратегия принятия решения является рискованной. При $\delta = 0$: $s_\gamma = s_\beta$ и стратегия принятия решения является стратегией абсолютного риска.

Если $\delta \rightarrow \infty$, то $\delta\alpha \rightarrow \infty$, роль термина s_β становится минимальной, терм s_α играет определяющую роль в принятии решения. В этом случае стратегия принятия решения является консервативной.

Если $\delta = 1$, то $\gamma = \frac{\beta + \alpha}{2}$. В этом случае стратегия принятия решения является нейтральной.

Для нечетких лингвистических переменных вида $[s_{a_i}, s_{b_i}]$ ($i = \overline{1, n}$) определен чёткий лингвистический взвешенный (*PLW* – pure linguistic weighted) оператор *C* – *EOWA* (*PLWC* – *EOWA*), определяемый как [7]:

$$\begin{aligned} \phi_{s_\lambda} ([s_{a_1}, s_{b_1}], [s_{a_2}, s_{b_2}], \dots, [s_{a_n}, s_{b_n}]) = \\ = (s_{\lambda_1} \otimes f_\rho ([s_{a_1}, s_{b_1}])) \oplus \\ \oplus (s_{\lambda_2} \otimes f_\rho ([s_{a_2}, s_{b_2}])) \oplus \dots \\ \oplus (s_{\lambda_n} \otimes f_\rho ([s_{a_n}, s_{b_n}])) \end{aligned} \quad (7)$$

где $s_\lambda = (s_{\lambda_1}, s_{\lambda_2}, \dots, s_{\lambda_n})^T$ – лингвистический вектор весов (коэффициентов относительной важности) нечетких лингвистических переменных $[s_{a_i}, s_{b_i}]$ ($i = \overline{1, n}$); $s_{\lambda_i} \in S$; $f_\rho ([s_{a_i}, s_{b_i}])$ ($i = \overline{1, n}$) вычисляется по формулам (4) и (5).

Кроме того, для нечетких лингвистических переменных вида $[s_{a_i}, s_{b_i}]$ ($i = \overline{1, n}$) определен нечёткий лингвистический взвешенный (*ULW* – uncertain linguistic weighted) оператор *C* – *EOWA* вида [7]:

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{s_\lambda} ([s_{a_1}, s_{b_1}], [s_{a_2}, s_{b_2}], \dots, [s_{a_n}, s_{b_n}]) = \\ = (f_\rho () \otimes f_\rho ([s_{a_1}, s_{b_1}])) \oplus \\ \oplus (f_\rho ([s_{a_2}, s_{b_2}]) \otimes f_\rho ([s_{a_2}, s_{b_2}])) \oplus \dots \\ \oplus (f_\rho ([s_{a_n}, s_{b_n}]) \otimes f_\rho ([s_{a_n}, s_{b_n}])) \end{aligned} \quad (8)$$

где $\tilde{s}_\lambda = ([s_{a\lambda_1}, s_{b\lambda_1}], [s_{a\lambda_2}, s_{b\lambda_2}], \dots, [s_{a\lambda_n}, s_{b\lambda_n}])^T$ – нечеткий лингвистический вектор весов (коэффициентов относительной важности) нечетких лингвистических переменных $[s_{a_i}, s_{b_i}]$ ($i = \overline{1, n}$); $s_{\lambda_i} \in S$; $f_\rho ([s_{a_i}, s_{b_i}])$ ($i = \overline{1, n}$) вычисляется по формулам (4) и (5).

Определенные выше понятия и операторы позволяют сформулировать новый подход к упорядочению и отбору конкурсных проектов, представленных с помощью нечетких лингвистических переменных.

Пусть $X^k = [\tilde{x}_{ij}^k]_{m \times n}$ – матрица оценок конкурсных проектов, данных экспертом e_k ($k = \overline{1, p}$), где $\tilde{x}_{ij}^k = [x_{a_{ij}}^k, x_{b_{ij}}^k]$ – интервальная оценка конкурсного проекта a_i ($i = \overline{1, m}$) по критерию c_j ($j = \overline{1, n}$), данная экспертом e_k

($k = \overline{1, p}$) и представленная в виде нечеткой лингвистической переменной; $x_{a_{ij}}^k, x_{b_{ij}}^k \in S$; $x_{a_{ij}}^k \leq x_{b_{ij}}^k$.

Пусть $W^k = \{\tilde{w}_1^k, \tilde{w}_2^k, \dots, \tilde{w}_n^k\}$ – вектор весов (коэффициентов относительной важности) критериев, определенный экспертом e_k ($k = \overline{1, p}$), где $\tilde{w}_j^k = [w_{a_j}^k, w_{b_j}^k]$ – интервальная оценка значимости (важности) критерия c_j ($j = \overline{1, n}$), представленная в виде нечеткой лингвистической переменной; $w_{a_j}^k, w_{b_j}^k \in S$; $w_{a_j}^k \leq w_{b_j}^k$.

Пусть $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}$ – вектор весов экспертов, где $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$ и λ_k – вещественное число.

Тогда упорядочение и отбор конкурсных проектов могут быть реализованы в соответствии со следующим алгоритмом.

Шаг 1. Формирование экспертом e_k ($k = \overline{1, p}$) матрицы $X^k = [\tilde{x}_{ij}^k]_{m \times n}$ оценок конкурсных проектов по критериям оценивания и вектора весов критериев W^k ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$). Вычисление обобщенной матрицы оценок конкурсных проектов по критериям оценивания $X = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$ и обобщенного вектора весов критериев $W = \{\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n\}$, где $\tilde{x}_{ij} = [x_{a_{ij}}, x_{b_{ij}}]$; $\tilde{w}_j = [w_{a_j}, w_{b_j}]$.

Так как $\tilde{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p (\lambda_k \tilde{x}_{ij}^k)$; $\tilde{w}_j = \sum_{k=1}^p (\lambda_k \tilde{w}_j^k)$, то

$$x_{a_{ij}} = \sum_{k=1}^p (\lambda_k x_{a_{ij}}^k); \quad x_{b_{ij}} = \sum_{k=1}^p (\lambda_k x_{b_{ij}}^k); \quad (9)$$

$$w_{a_j} = \sum_{k=1}^p (\lambda_k w_{a_j}^k); \quad w_{b_j} = \sum_{k=1}^p (\lambda_k w_{b_j}^k). \quad (10)$$

Шаг 2. Вычисление значений $f_\rho(\tilde{x}_{ij})$ и $f_\rho(\tilde{w}_j)$ с использованием оператора *C*-*EOWA* в соответствии с формулами (4) и (5).

Шаг 3. Агрегирование значений оценок $f_\rho(\tilde{x}_{ij})$ ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$) для конкурсных проектов и значений оценок для коэффициентов относительной важности критериев $f_\rho(\tilde{w}_j)$ ($j = \overline{1, n}$) с использованием оператора *ULWC*-*EOWA* для получения комплексных оценок конкурсных проектов z_i ($i = \overline{1, m}$):

$$z_i = (f_p(\tilde{w}_1) \otimes f_p(\tilde{x}_{i1})) \oplus (f_p(\tilde{w}_2) \otimes f_p(\tilde{x}_{i2})) \oplus \dots \oplus (f_p(\tilde{w}_n) \otimes f_p(\tilde{x}_{in})) \quad (11)$$

Шаг 4. Упорядочение конкурсных проектов a_i ($i = \overline{1, m}$) в порядке убывания значений комплексных оценок конкурсных проектов z_i ($i = \overline{1, m}$) и отбор лучших [в соответствии с максимальными значениями z_i ($i = \overline{1, m}$)].

Самостоятельной задачей при реализации процедуры отбора конкурсных проектов является задача формирования множества значимых критериев оценивания. Известны различные алгоритмы, разработанные под те или иные методики анализа данных и реализующие выявление наиболее значимых критериев.

В частности, при формировании такого множества критериев оценивания могут быть использованы результаты группового экспертного опроса, в котором эксперты по пятибалльной шкале должны оценить степень влияния каждого критерия из исходного списка критериев на отбор (принятие к реализации) конкурсного проекта [7].

При этом полагается, что степень влияния критерия в баллах с лингвистической точки зрения описывается как: «5» – «очень сильное влияние»; «4» – «сильное влияние»; «3» – «среднее влияние»; «2» – «слабое влияние»; «1» – «влияние отсутствует». На основе таких экспертных балльных оценок u_j^k , данных экспертом e_k ($k = \overline{1, p}$) по критерию c_j ($j = \overline{1, n}$), вычисляются:

– математическое ожидание:

$$m_j = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p u_j^k;$$

– среднееквадратическое отклонение:

$$\sigma_j = \left(\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (u_j^k - m)^2 \right)^{1/2};$$

– коэффициент вариации:

$$v_j = \sigma_j / m_j.$$

Критерии, для которых $m_j \leq 3,4$ и $v_j \geq 0,3$ ($j = \overline{1, n}$), исключаются из дальнейшего рассмотрения, а из оставшихся критериев формируется множество значимых критериев отбора [7]. При этом количество экспертов p должно быть достаточно большим (не менее 20). В данном случае формирование множества критериев выполняется на основе результатов явного группового экс-

пертного оценивания степени влияния критериев на отбор (принятие к реализации) произвольного конкурсного проекта.

В качестве еще одного альтернативного способа формирования множества значимых критериев оценивания может быть предложен способ, основанный на неявном выявлении значимых критериев отбора, осуществляемом в процессе группового экспертного оценивания конкурсных проектов по исходному множеству критериев оценивания по балльной шкале, посредством формирования обобщающих решающих аппроксимирующих правил классификации с применением мультимножественного подхода [2, 5]. При этом обычно достаточным является количество экспертов p , равное 6-10 человек. В этом случае критерии, не вошедшие ни в одно из решающих правил классификации, полагаются незначимыми.

Следует отметить, что для более уверенного формирования множества значимых критериев отбора целесообразно одновременно применять различные способы выявления значимых критериев (в том числе, и описанные выше) с последующим согласованием полученных списков критериев.

Экспериментальная часть. Описанный выше алгоритм отбора конкурсных проектов, представленных с помощью нечетких лингвистических переменных, был применен к множеству из 4 инвестиционных конкурсных проектов, оценивание которых должны были выполнить 4 эксперта.

Первоначально предполагалась реализовать отбор по 4 критериям («конкурентоспособность проекта», «актуальность и новизна проекта», «социально-экономическая значимость проекта для города и области», «финансовый уровень предприятия-заявителя»). Однако на основе предварительно полученных решающих аппроксимирующих правил классификации, выявленных ранее с применением мультимножественного подхода при решении аналогичной задачи классификации и отбора 15 инвестиционных конкурсных проектов по 4 вышеуказанным критериям семью экспертами [2], из исходного множества критериев удалось выделить два значимых критерия («конкурентоспособность проекта», «финансовый уровень предприятия-заявителя»), которые в дальнейшем и были использованы при решении задачи отбора конкурсных проектов. Пусть значимые критерии отбора «конкурентоспособность проекта» и «финансовый уровень предприятия-заявителя» обозначены соответственно как c_1 и c_2 .

Пусть каждый эксперт e_k ($k = \overline{1,4}$) выполняет оценивание каждого конкурсного проекта a_i ($i = \overline{1,4}$) по критериям c_j ($j = \overline{1,2}$), а также – оценивание значимости (коэффициента относительной важности) каждого критерия c_j ($j = \overline{1,2}$). Для простоты расчетов предполагается, что все эксперты равноценны, то есть имеют одинаковые значения коэффициентов относительной важности λ_k ($k = \overline{1,4}$).

Пусть дискретная лингвистическая шкала, по которой выполняется экспертное оценивание конкурсных проектов по критериям и значимости самих критериев, определена как: $S = (s_{-3}, s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3) =$ («чрезвычайно низкая», «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая», «чрезвычайно высокая»).

Ниже рассмотрен пример упорядочения и отбора конкурсных проектов, демонстрирующий возможность получения на множестве значений степени риска δ , соответствующих тем или иным стратегиям принятия решений, различных вариантов упорядочения и отбора конкурсных проектов.

Экспертные интервальные оценки значимости критериев, представленные в виде нечетких лингвистических переменных, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспертные интервальные оценки значимости критериев

Эксперт \ Критерий	c_1	c_2
e_1	$[s_1, s_2]$	$[s_0, s_1]$
e_2	$[s_2, s_3]$	$[s_0, s_0]$
e_3	$[s_2, s_3]$	$[s_1, s_2]$
e_4	$[s_0, s_2]$	$[s_0, s_2]$

Таблица 2 – Интервальные оценки конкурсных проектов по критериям, данные первым экспертом

Проект \ Критерий	c_1	c_2
a_1	$[s_0, s_1]$	$[s_1, s_2]$
a_2	$[s_{-1}, s_2]$	$[s_{-1}, s_0]$
a_3	$[s_1, s_1]$	$[s_0, s_2]$
a_4	$[s_1, s_2]$	$[s_0, s_2]$

В таблицах 2-5 приведены экспертные интервальные оценки конкурсных проектов по критериям, значения которых таковы, что при разных значениях степени риска δ (разных страте-

гиях упорядочения и отбора) формируются отличающиеся друг от друга варианты упорядочения конкурсных проектов.

Таблица 3 – Интервальные оценки конкурсных проектов по критериям, данные вторым экспертом

Проект \ Критерий	c_1	c_2
a_1	$[s_1, s_1]$	$[s_1, s_1]$
a_2	$[s_0, s_1]$	$[s_{-1}, s_0]$
a_3	$[s_1, s_2]$	$[s_2, s_3]$
a_4	$[s_1, s_2]$	$[s_0, s_0]$

Таблица 4 – Интервальные оценки конкурсных проектов по критериям, данные третьим экспертом

Проект \ Критерий	c_1	c_2
a_1	$[s_{-1}, s_0]$	$[s_2, s_3]$
a_2	$[s_0, s_1]$	$[s_1, s_2]$
a_3	$[s_0, s_1]$	$[s_0, s_1]$
a_4	$[s_0, s_1]$	$[s_0, s_1]$

Таблица 5 – Интервальные оценки конкурсных проектов по критериям, данные четвертым экспертом

Проект \ Критерий	c_1	c_2
a_1	$[s_0, s_1]$	$[s_2, s_2]$
a_2	$[s_0, s_0]$	$[s_0, s_1]$
a_3	$[s_1, s_2]$	$[s_0, s_1]$
a_4	$[s_2, s_2]$	$[s_1, s_2]$

Таблица 6 – Результаты упорядочения конкурсных проектов в соответствии с различными стратегиями

Значение степени риска δ	Результаты упорядочения
1/9	$a_3 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_2$
1/4	$a_3 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_2$
1/3	$a_3 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_2$
1/2	$a_3 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_2$
0	$a_3 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_2$
1	$a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$
2	$a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$
3	$a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$
4	$a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$
9	$a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$

На основе данных таблиц 1-5 могут быть получены следующие обобщенный вектор весов

критериев $W = \{\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n\}$ и обобщенная матрица оценок конкурсных проектов по критериям оценивания $X = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$:

$$W = [[1,25; 2,5] \quad [0,25; 1,25]];$$

$$X = \begin{bmatrix} [0,00; 0,75] & [1,50; 2,00] \\ [-0,25; 1,00] & [-0,25; 0,75] \\ [0,75; 1,50] & [0,5; 1,75] \\ [1,00; 1,75] & [0,25; 1,00] \end{bmatrix}.$$

В таблице 6 приведены результаты упорядочения конкурсных проектов, полученные при разных значениях степени риска δ на основе операции агрегирования в соответствии с формулой (10) значений $f_p(\tilde{x}_{ij})$ и $f_p(\tilde{w}_j)$, вычисленных с использованием формул (4) и (5), в виде комплексных оценок конкурсных проектов z_i ($i = \overline{1, m}$).

В частности, при $\delta = 3$: $z_1 = 1,106$; $z_2 = 0,098$; $z_3 = 1,871$; $z_4 = 2,074$, и, соответственно, конкурсные проекты упорядочиваются как: $a_4 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_2$. При этом лучшим является проект a_4 , а худшим – a_2 .

Анализ результатов упорядочения конкурсных проектов (таблица 6) показывает, что:

– если стратегия принятия решения консервативна или нейтральна ($\delta \geq 1$), то лучшим для вложения инвестиций является конкурсный проект a_4 ;

– если стратегия принятия решения является рискованной ($0 \leq \delta < 1$), то лучшим для вложения инвестиций является конкурсный проект a_3 .

При этом худшим для вложения инвестиций при любых стратегиях принятия решений является конкурсный проект a_2 .

При решении практических задач возможны ситуации, когда:

– результаты упорядочения конкурсных проектов (а, следовательно, и результаты отбора) одинаковы при различных значениях степени риска δ (то есть при любых стратегиях принятия решений);

– результаты упорядочения конкурсных проектов, полученные при некоторых значениях степени риска δ , соответствующих рискованным стратегиям ($0 \leq \delta < 1$), совпадают с результатами упорядочения конкурсных проектов, полученными при значениях степени риска δ , соответствующих консервативным или нейтральным стратегиям ($\delta \geq 1$) [то есть существует такое пороговое значение $\delta^* \neq 1$ ($0 \leq \delta^* < 1$), что

при δ , удовлетворяющих условию: $\delta^* \leq \delta < 1$, результаты упорядочения конкурсных проектов совпадают с результатами упорядочения конкурсных проектов, полученных при $\delta \geq 1$].

Необходимо отметить, что существенный интерес представляет исследование влияния различных значений числа L ($L \in N$), используемого при формировании дискретной лингвистической шкалы $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -L, -L + 1, \dots, L - 1, L\}$ на результаты упорядочения конкурсных проектов.

Заключение. Предлагаемый подход к отбору конкурсных проектов позволяет принимать адекватные и обоснованные решения с использованием субъективной качественной экспертной информации, представленной в виде интервальных оценок, посредством формирования на ее основе нечетких лингвистических переменных и применения к ним непрерывного расширенного оператора упорядоченного взвешенного среднего *ULWC – EOWA* [7, 8]. При этом упорядочение и отбор конкурсных проектов может быть реализован с применением различных стратегий (рискованной, нейтральной или консервативной) принятия решений. Рассматриваемый подход прост в реализации и может служить хорошей альтернативой методу анализа иерархий, который характеризуется более высокой сложностью как на этапе проведения экспертного опроса, так и на этапе выполнения расчетов (и, в частности, предъявляет принципиальные требования к согласованности результатов оценивания объектов) [6]. Предлагаемый способ неявного выявления значимых критериев оценивания может служить альтернативой способам, реализующим их явное выявление как по результатам экспертного опроса [2, 5], так и на основе сложных математических алгоритмов.

Библиографический список

1. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 234 с.
2. Гусева М.В., Демидова Л.А. Классификация инвестиционных проектов на основе систем нечеткого вывода и мультимножеств // Вестник РГРТА. – Рязань, 2006. – Выпуск 19. – С. 157-166.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
4. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.: ил.
5. Петровский А.Б. Многокритериальное принятие решений по противоречивым данным: подход теории мультимножеств // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004. – №2. – С. 56-66.

6. Saatu T. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 215 с.

7. Liu P., Zhang X., Liu W. A risk evaluation method for the high-tech project investment based on uncertain linguistic variables // Technological Forecasting and So-

cial Change, 2011. – Vol. 78. – No. 1. – P. 40-50.

8. Mas M., Mayor G., Suner J., Torrens J. Generation of Multi-dimensional Aggregation Functions // Mathware and Soft Computing, 1998. – No 5. – P. 233 - 242.

УДК 621.391:621.317

И.А. Саитов, О.В. Романюк

МОДЕЛЬ ВЫДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ СЕТИ ПРИ ДОПУСКЕ IP- ПОТОКОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ГРУППИРОВАНИЯ КОНВЕРГЕНТНОГО ТРАФИКА

Предложена математическая модель группирования потоков блоков данных на сетевом уровне в терминах теории сетевых исчислений (Network calculus). Получены аналитические выражения расчета резервируемых ресурсов сети при изолированном и групповом типах обслуживания потоков с соблюдением гарантий качества. Обоснованы предложения учета эффекта экономии ресурсов от группирования за счет совместного использования ошибочных членов планирования передачи пакетов при допуске IP-потоков в сеть.

Ключевые слова: теория сетевых исчислений, резервирование сетевых ресурсов.

Введение. Цель работы – повысить эффективность использования арендуемых пропускных способностей сети с соблюдением гарантий по качеству обслуживания IP-потоков при их допуске и обработке в пограничных криптомаршрутизаторах.

Одним из действенных способов защиты конфиденциальной информации, передаваемой по открытым сетям общего пользования (Internet), является использование коммерческих криптомаршрутизаторов при построении виртуальных частных сетей (VPN). Реализация в криптомаршрутизаторах таких защитных функций, как шифрование, фильтрация пакетов, трансляция сетевых адресов и туннелирование, определила более широкий круг проблем, связанных с обеспечением гарантированного качества обслуживания (ГКО) пользователей и выделением объема сетевых ресурсов, необходимых для его поддержания. Сокращение внутренней структуры сети от злоумышленника за счет динамической замены адресов назначения или источника в крипто-маршрутизаторах не позволяет классифицировать отдельные потоки данных и обрабатывать их по правилам Tspec (Traffic specification) в сегменте транспортной сети (DiffServ) [1]. Это значит, что с точки зрения детерминированных служб криптомаршрутизатор

выступает в роли объекта группирования потоков и в транспортной сети обрабатываются только группированные потоки с удовлетворением наивысших требований к качеству обслуживания предоставляемых услуг. В данных условиях функционирования защищенных частных сетей крупных организаций некоторую специфику приобретает задача эффективного использования арендуемых пропускных способностей сети с учетом эффекта группирования трафика.

Теоретическая часть. Известно, что ГКО инфокоммуникационных услуг обеспечивается при выделении ресурсов сети каждому отдельному потоку. Математика ГКО представлена в [2] по кривым поступления на основе Tspec [3] и обслуживания на основе планировщика «взвешенной справедливой буферизации» WFQ. Модель ГКО описывается в терминах идемпотентной математики сетевых исчислений [4, 5], позволяющей сложные нелинейные процессы привести к линейным, основываясь на интервальных оценках [6]. Кривые поступления, соответствующие спецификации трафика TSpec на базе контроллеров Token Bucket, описывают наихудший случай поведения источника трафика в заданные интервалы времени и оценивается как количество нагрузки $A_i(t)$ i -го потока, поступившей в систему за период времени $(0, t]$

$$A_i(t) = \min\{M + p_i t, b_i + r_i t\}, t \geq 0, \quad (1)$$

где: r_i – средняя скорость поступления пакетов (в байтах/с); b_i – глубина «ведра жетонов» (в байтах); p_i – пиковая скорость (в байтах/с); M – максимальный размер пакета (в байтах).

Кривые обслуживания определяют минимальный сервис, который предоставляется узлами коммутации. В модели WFQ процесс планирования обслуживания характеризуется двумя типами ошибок – C и D , позволяющими учесть, насколько точно реализовано планирование по сравнению с моделью в непрерывном времени [7]. В [8] для одного узла коммутации доказаны соотношения:

$$C = M, \quad (2)$$

$$D = \frac{MTU}{c}, \quad (3)$$

где c – пропускная способность выходного порта узла коммутации; MTU – максимальный размер дейтаграммы. Для архитектуры Intserv ошибочные члены C и D суммируются вдоль всего пути передачи данных для каждого сервера/маршрутизатора на протяжении всего пути оповещения и могут быть рассчитаны для K узлов как:

$$C_{totK} = \sum_{j=1}^K C_j, \quad (4)$$

$$D_{totK} = \sum_{j=1}^K D_j. \quad (5)$$

Комбинируя модели источников нагрузки и функции обслуживания, можно получить объективные сведения относительно потерь и задержки в условиях наихудшего сценария источника и полностью загруженного узла коммутации.

Так, гарантированное значение времени задержки $d_{\max K}$ может быть обеспечено при резервировании пропускной способности R_i (в байтах/с) в K узлах коммутации и рассчитывается как:

$$d_{\max K} = \begin{cases} \frac{(b_i - M)(p_i - R_i)}{R_i(p_i - r_i)} + \frac{M + C_{totK}}{R_i} + D_{totK}, & \text{при } p_i \geq R_i \geq r_i \\ \frac{M + C_{totK}}{R_i} + D_{totK}, & \text{при } R_i \geq p_i \geq r_i. \end{cases} \quad (6)$$

Значение $d_{\max K}$, в свою очередь, зависит от значения выделяемой обслуживаемому потоку полосы пропускания R_i .

$$R_i = \frac{p_i \frac{b_i - M}{p_i - r_i} + M + C_{totK}}{d_{\max} + \frac{b_i - M}{p_i - r_i} - D_{totK}}, \text{ при } p_i \geq R_i \geq r_i. \quad (7)$$

Одним из ресурсов сети, выделяемых также для гарантированного обслуживания потока i , является буферное пространство выходного порта маршрутизатора B_i .

$$\text{При } p_i \geq R_i \geq r_i \text{ и } \frac{C_{totK}}{R_i} + D_{totK} \leq \frac{b_i - M}{p_i - r_i},$$

$$B_i = M + \frac{(p_i - R_i)(b_i - M)}{p_i - r_i} + C_{totK} + R_i D_{totK}. \quad (8)$$

С точки зрения эффективности использования ресурсов сети условия $R_i \geq p_i \geq r_i$ не вызывают практического интереса.

Выделенные значения (R_i, B_i) совместно с планировщиком класса WFQ позволяют утверждать, что поток i получит долю обслуживания без потерь пакетов из-за недостатка буферного пространства, а потери пакетов возможны за счет искажений в канале связи. Применение аналитических выражений в алгоритмах управления допуском соединений (7, 9) при расчете и выделении ресурсов (R_i, B_i) в узлах коммутации, функционирующих в архитектуре IntServ (сети доступа), в целом позволяет гарантировать требуемое значение задержки пакетов «из конца в конец» $d_{\max K}$, а также обеспечить предсказуемый уровень потерь и джитера задержки, который может изменяться в пределах диапазона $[0, d_{\max K}]$. Представленная модель ГКО в IntServ не может быть масштабируема на магистральные сети. После процедуры зашифрования данных и динамической замены адресов заголовков пакетов отдельные соединения не могут быть классифицированы и обслужены индивидуально согласно представленной модели, а обслуживаются как один групповой поток.

Для аналитического описания группированного потока, поступающего с выходного порта криптомаршрутизатора, предлагается воспользоваться представленной в RFC 2216 [9] концепцией характеристики трафика групповых потоков, где сумма n потоков, специфицированных как TSPEC, определяется следующим выражением:

$$\sum_{i=1}^n (r_i, b_i, p_i, M_i) = (\sum_{i=1}^n r_i, \sum_{i=1}^n b_i, \sum_{i=1}^n p_i, \max M_i). \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет вычислить суммарную кривую поступления от группового по-

тока и размер суммарной резервируемой полосы пропускания для n -потоков с учетом обеспечения $\min(d_{\max})$ из всех поступивших требований к качеству обслуживания. При этом групповой поток обслуживается в магистральных маршрутизаторах как изолированное соединение (крипто-туннель) с дисциплиной обслуживания WFQ в отдельно зарезервированном буфере. Обращаясь к утверждению о накоплении ошибок планирования типа C и D в узлах коммутации на всем пути следования пакетов, становится очевидным, что в случае группового потока ошибки в области группирования формируются не для каждого IP-соединения, а однократно для всего группового потока в каждом транзитном узле коммутации. Следует понимать, что обслуживаться этот групповой поток должен по наивысшему классу качества предоставляемых инфокоммуникационных услуг, т.е. можно их рассматривать как однородные с точки зрения требований GoS.

Это означает, что имеется выигрыш в резервировании ресурсов при групповом обслуживании потоков $R^G(n)$ в отличие от изолированного $R^I(n)$. Этот эффект экономии ресурсов от группирования является результатом «совместного использования ошибочных членов» для потоков группы, в то время как для изолированных потоков эти ошибочные члены должны учитываться по отдельности. Эффективность группирования $GE(n)$ для спецификаций TSPEC в качестве кривой поступления для группового потока вычисляется как:

$$GE(n) = R^I(n) - R^G(n), \quad (10)$$

$$\text{где: } R^I(n) = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \frac{b_i - M_i}{p_i - r_i} + M_i + C_{totK}}{d_{\max} + \frac{b_i - M_i}{p_i - r_i} - D_{totK}}, \quad (11)$$

$$R^G(n) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \frac{\sum_{i=1}^n b_i - \max(M_i)}{\sum_{i=1}^n p_i - r_i} + \max(M_i) + C_{totK}}{\min(d_{\max i}) + \frac{\sum_{i=1}^n b_i - \max(M_i)}{\sum_{i=1}^n p_i - r_i} - D_{totK}}. \quad (12)$$

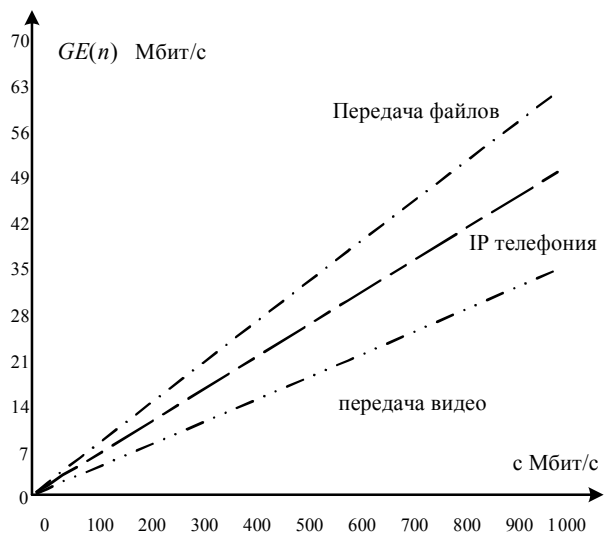
Анализ выражений (4, 5, 10-12) показывает, что $GE(n)$ возрастает с увеличением числа узлов коммутации на пути передачи пакетов.

Экспериментальные исследования. Для наглядности эффекта выделения арендуемой пропускной способности при различных схемах

обслуживания рассчитаем значения $GE(n)$ для трех основных инфокоммуникационных услуг n , предполагая, что вся полоса пропускания зарезервирована для обслуживания максимально возможного количества однотипных услуг. Параметры TSPEC инфокоммуникационных услуг представлены в таблице при $MTU = 1500$ байт, $M = 1400$ байт

Услуга	p_i кбит/с	b_i байт	r_i кбит/с
Видеоуслуга	384	6315	345
Телефонная услуга	80	11640	64
Передача файлов	64	13685	45

Произведенные расчеты по полученным аналитическим зависимостям представлены на рисунке.



Зависимость $GE(n)$ от арендуемой пропускной способности c

$GE(n)$ может учитываться в алгоритмах управления допуском IP-потоков, позволяя при этом повысить степень использования арендуемых пропускных способностей в условиях перегрузки.

Функционирование алгоритма управления допустимостью IP-соединения в общем случае заключается в проверке следующего условия: существуют ли свободные ресурсы, требуемые для удовлетворения запрашиваемой услуги j при обслуживании i IP-потоков и имеющейся пропускной способности c :

$$R_j \leq c - R^I(n). \quad (13)$$

Возвращаясь к сформулированной ранее задаче эффективного использования ресурсов сети в условиях взаимодействия сегментов транс-

портной сети и сети доступа с обработкой трафика в криптомаршрутизаторе, выражение (13) может быть модифицировано, например, следующим образом:

$$R_j \leq c - R^G(n). \quad (14)$$

При этом степень использования арендуемой пропускной способности в большинстве случаев может быть увеличена на $GE(n)$ с предсказуемым соблюдением гарантий по качеству обслуживания. Следует подчеркнуть, что реализация такой схемы управления допуском с учетом эффекта группирования потребует решения задач оценки количества транзитных узлов коммутации и характеристик TSpec уже обслуживаемых IP-поток.

Заключение. В статье предложена модель выделения ресурсов сети при изолированном и групповом обслуживании IP-поток, позволяющая рассчитать долю высвобождаемой пропускной способности за счет эффекта группирования. Объем высвобождаемых ресурсов составляет 2-5% от ширины полосы пропускания арендуемого канала в зависимости от параметров обслуживаемых услуг. Предложен вариант применения модели в алгоритмах управления допуском IP-поток в сеть.

УДК 004.62

З.В. Страхова, Н.И. Цуканова

ОНТОЛОГИЯ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Предложено для организации быстрого доступа к учебно-методическим комплексам кафедры (УМК) использовать программную надстройку, реализующую онтологию предметной области. Проведена разработка онтологии предметной области «Учебно-методический комплекс», показана возможность ее реализации в табличном процессоре Microsoft Excel. Полученная программная надстройка позволяет не только организовать быстрый доступ к нужному элементу, но и проводить анализ процесса разработки УМК на кафедре.

Ключевые слова: учебно-методический комплекс, онтология, концепты, классы, отношения, таксономия, дерево классов, гиперссылка, сводная таблица.

Введение. В настоящее время методические материалы по дисциплине подготавливаются преподавателями в электронном виде как учебно-методические комплексы (УМК). Затем УМК передаются на кафедру и в отдел методического обеспечения (ОМО), где регистрируются и хранятся на диске персонального компьютера в определенном каталоге. Каталог с УМК представляет собой хранилище неструктурированной

Библиографический список

1. Blake S., Black D., Carlson M., Davies E., Wang Z., Weiss W. An Architecture for Differentiated Services. - RFC 2475.: December, 1998.
2. Boudec J., Patrick T. Network calculus. A theory of deterministic queuing systems for the internet. - Online version of the book Springer Verlag - Incs 2050.
3. Shenker S., Partridge C., Guerin R. Specification of Guaranteed Quality of Service. - RFC 2212. September 1997.
4. Cruz R.L. A calculus for network delay. 1. Network elements in isolation. - IEEE Transactions on Information Theory, Volume: 37, Issue: 1, January 1991.
5. Cruz R.L. A calculus for network delay. 2. Network analysis. - IEEE Transactions on Information Theory, Volume: 37, Issue: 1, January 1991.
6. Maslov V.P., Samborski S.N. Idempotent analysis // Advances in Soviet Mathematics. Vol. 13 / Providence: Amer. Math. Society, 1992.
7. Parekh A.K., Gallager R.G. A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Multiple Node Case. - IEEE/ACM Transaction on Networking, vol.1, no.3, June 1993, pp.344-357.
8. Georgiadis L., Guerin R., Parekh A. Efficient Support of Delay and Rate Guarantees in an Internet. - in Proceedings of ACM SIGCOMM, August 1996, pp. 106-116.
9. Shenker S., Wroclawski J. «Element Service Specification Template». September 1997. RFC 2216.

информации, так как каждый УМК содержит текстовые документы и файлы разного формата. **Цель работы:** найти способ организации этой информации, обеспечивающий по заданным критериям быстрый доступ к элементу хранилища без его реорганизации.

Разработка онтологии УМК. Для решения этой задачи в работе предлагается использовать онтологию [1] предметной области «Учебно-

методический комплекс». Сначала проводится разработка онтологии УМК с использованием редактора Protege 4.1, а затем рассматривается вопрос ее реализации в виде программной оболочки, обеспечивающей доступ к элементам хранилища на основе их свойств.

Онтология как модель выражает определенный взгляд (разработчика) на некоторую предметную область и формально может быть описана следующим набором множеств [1]:

$O = \langle X, R, \Phi \rangle$, где:

X – конечное множество концептов (понятий, терминов) предметной области;

R – конечное множество отношений между концептами (понятиями, терминами);

Φ – конечное множество функций интерпретации (аксиоматизация), заданных на концептах и/или отношениях онтологии O .

Например, для предметной области «Учебно-методический комплекс» основными концептами X являются дисциплина, кафедра, факультет, разработчик, УМК, специальность. Базовыми отношениями R являются $умк_специальность$, $специальность_дисциплина$, $умк_форма_обучения$, $умк_разработчик$. Роль функции интерпретации Φ может играть словесное пояснение термина (аннотация), алгоритмическое описание, а также определение в виде логической формулы.

Из всего множества отношений в онтологии выделяется специальный класс – простая таксономия: $O = T = \langle X, \{is_a\}, \{\} \rangle$. Под таксономической структурой понимается иерархическая система понятий, связанных между собой отношением is_a («быть элементом класса» или «быть подклассом класса»). Это отношение (is_a) позволяет организовать структуру понятий онтологии в виде дерева классов (рисунок 2).

В целом потребность в разработке онтологий объясняется следующими причинами [1]:

1) совместное использование людьми или программными агентами общего понимания структуры информации;

2) получение логической теории, которая состоит из словаря и набора утверждений на некотором языке логики, что позволяет на основе этой теории получать вывод новых знаний, явно не заложенных в онтологии;

3) с помощью онтологии [4] решается задача классификации, т.е. разбиения неструктурированной информации хранилища на группы в соответствии с интересами пользователя и организации доступа к элементам выбранной группы.

При разработке онтологии «Учебно-методический комплекс» использовалась методика, из-

ложенная в [2-3]. В соответствии с этой методикой была разработана в Power Designer [5] концептуальная модель, приведенная на рисунке 1.

В соответствии с основными концептами предметной области в редакторе онтологий Protege 4.1 было получено следующее базовое дерево классов:

❖ *Thing*

- *Дисциплина*
- *Кафедра*
- *Сотрудники*
- *Специальность*
- *УМК*
- *УчебныйПлан*
- *Факультет*
- *ФормаОбучения*

Между концептами предметной области были определены следующие бинарные связи:

❖ *topObjectProperty*

- *умк_дисциплина*
- *умк_направление*
- *умк_форма_обучения*
- *умк_специальность*
- *умк_составлен_сотрудником*
- *умк_заказала_кафедра*
- *умк_разработала_кафедра*
- *специальность_умк*
- *сотрудник_разработчик_умк*
- *кафедра_факультет*
- *кафедра_разработчик_умк*
- *кафедра_заказчик_умк*
- *дисциплина_умк*

Свойства каждого класса были описаны логическими формулами, благодаря которым добавленный в систему элемент после указания его свойств будет отнесен в процессе вывода к соответствующему классу (группе).

Так, например, элементы класса *УМК* были описаны следующей логической формулой:

$УМК \leftrightarrow Thing$ (1)
and (*умк_дисциплина some Дисциплина*)
and (*умк_заказала_кафедра some Кафедра*)
and (*умк_разработала_кафедра some Кафедра*)
and (*умк_специальность some Специальность*)
and (*умк_форма_обучения some ФормаОбучения*)
and (*умк_составлен_сотрудником some Разработчик*)
and (*умк_дисциплина only Дисциплина*)
and (*умк_заказала_кафедра only Кафедра*)
and (*умк_разработала_кафедра only Кафедра*)
and (*умк_специальность only Специальность*)
and (*умк_форма_обучения only ФормаОбучения*)
and (*умк_составлен_сотрудником only Разработчик*)

Здесь знаки \leftrightarrow , *and*, *or*, *some*, *only* соответствуют логическим операциям: эквивалентность, конъюнкция, дизъюнкция, квантор существования, квантор всеобщности.

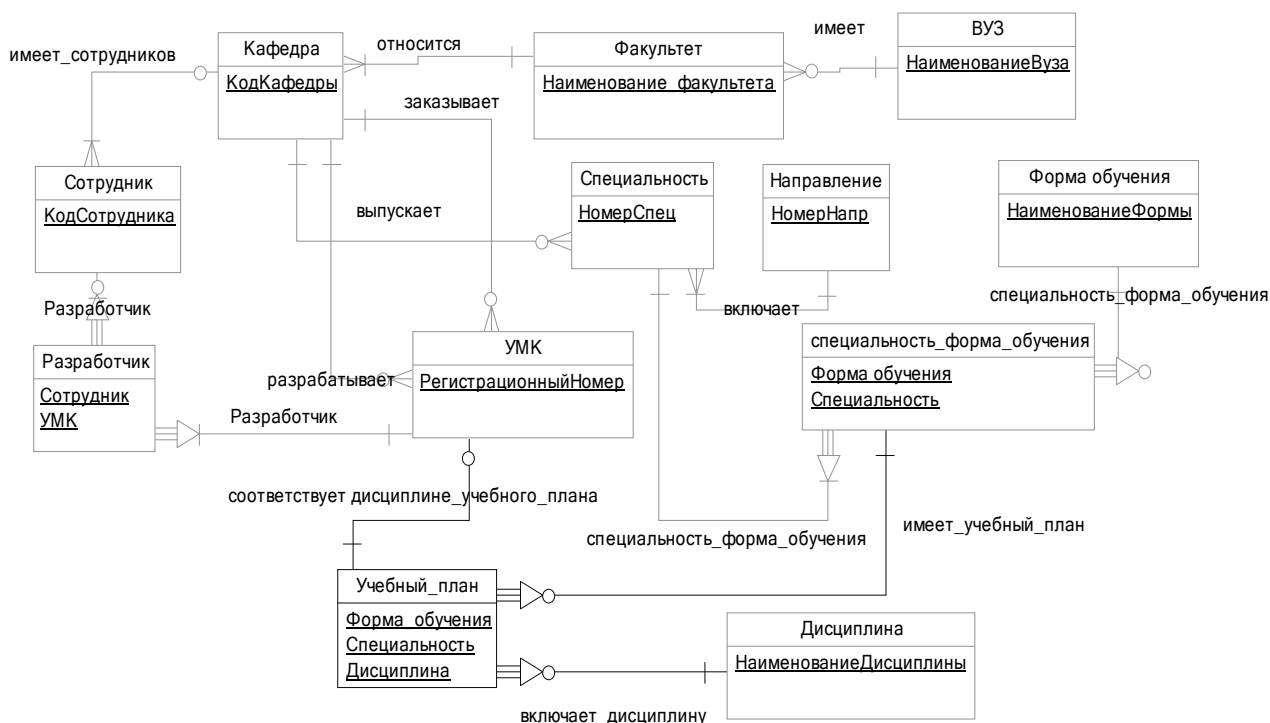


Рисунок 1- Концептуальная модель предметной области «Учебно-методический комплекс»

Смысл формулы (1) можно пояснить так: УМК – это сущность, которая имеет хотя бы одну (*some*) связь с элементами классов *Дисциплина*, *Кафедра*, *Специальность*, *Форма обучения*, *Разработчик*, а также элементы класса УМК имеют именованные связи только с элементами соответствующих классов. Так, например, связью *умк_дисциплина* элементы УМК могут быть связаны только (*only*) с элементами класса *Дисциплина*, связью *умк_специальность* только (*only*) с элементами класса *Специальность* и т.д. При таком описании элементы (экземпляры), вносимые в систему, даже при отсутствии их полного описания путем вывода могут быть правильно отнесены к соответствующим группам (классам).

Если в классе *Дисциплина* определить подклассы для каждой дисциплины, в классе *Специальность* определить подклассы для каждой специальности с соответствующим именем и для класса *Форма_обучения* – подклассы для каждой формы, то можно осуществить разбиение всех УМК на подгруппы по специальностям, по дисциплинам, по форме обучения.

На рисунке 2 показано полученное в редакторе онтологий Protege 4.1 дерево классов, подклассов, далее приведены логические формулы, описывающие подклассы. Благодаря формулам в процессе вывода элементы УМК будут автоматически отнесены к соответствующему подклассу.

$$\begin{aligned} & \text{УМК_Анализ_данных} \leftarrow \text{По_дисциплине} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{and (умк_дисциплина some Анализ_данных)} \\ & \text{УМК_ИИС} \leftarrow \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \text{По_специальностям} \\ & \text{and (умк_дисциплина some ИИС)} \\ & \text{УМК_230105} \leftarrow \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{По_форме_обучения} \\ & \text{and (умк_специальность some C230105)} \\ & \text{УМК_очники} \leftarrow \end{aligned} \quad (5)$$

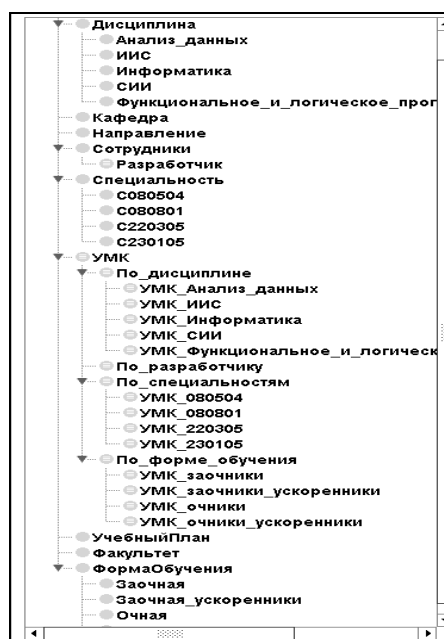


Рисунок 2 - Дерево классов, подклассов предметной области «Учебно-методический комплекс»

Формула (2) описывает все УМК, разработанные для дисциплины «Анализ данных», формула (3) – для дисциплины «ИИС», (4) описывает все УМК по специальности «230105», а (5) – все УМК для очной формы обучения.

С каждым элементом онтологии связан URI – уникальный идентификатор ресурса, однозначно задающий элемент онтологии. В результате пользователь, выбрав нужную ему подгруппу УМК, получит доступ по URI к любому ее элементу.

Разработанная онтология УМК может быть преобразована с помощью редактора Protege 4.1 в один из форматов Semantic Web: RDF/XML, OWL и в дальнейшем использоваться при информационном поиске в сети Интернет [1].

Практическая реализация онтологии. Так как логическая формула представляет собой один из возможных способов описания запроса к базе данных, то для программной реализации онтологии может быть выбран программный инструмент, обладающий развитыми средствами создания запросов. Авторами было отдано предпочтение табличному процессору Microsoft Excel. Он предоставляет богатые возможности для работы с данными, находящимися в таблицах.

Будем считать, что файл с онтологией располагается в том же каталоге, что и все УМК. Под онтологией будем понимать таблицу, созданную с помощью табличного процессора Microsoft Excel. Структура таблицы (таблица 1) отражает онтологию. Имя каждого столбца таблицы совпадает с именем одного из классов онтологии: *Кафедра_заказчик*, *Кафедра_разработчик*, *Специальность*, *Квалификация*, *Форма_обучения*, *Дисциплина*, *Разработчик*, *Регистрационный_номер*, *Дата_регистрации* *Гиперссылка_на_УМК*. Заголовок таблицы определяет связи между концептами.

Наиболее важным является последний столбец «Гиперссылка на УМК». Для каждой строки в нем должна находиться гиперссылка на тот каталог, где расположен УМК с описанными в строке свойствами. Таким образом, гиперссылка – это аналог URI для каждого УМК.

В результате применения к таблице автофильтра будут получены элементы всех классов, предоставлена возможность пользователю формировать по интересующим его критериям подгруппы УМК и с помощью гиперссылок получать доступ к нужному комплексу.

В таблице 1 приведен фрагмент онтологии с включенным автофильтром.

Чтобы получить доступ к нужному комплексу, пользователь должен с помощью автофильтра

указать известные ему характеристики УМК. Выполнив фильтрацию, получить группу ссылок и по выбранной им гиперссылке перейти к УМК. Этот процесс иллюстрируется таблицей 2 и рисунком 3.

Таблица 1 - Фрагмент онтологии

Специальность	Квалификация	Форма обучения	Дисциплина	Разработчик	Гиперссылка на УМК
245364'	магистр	заочная	Интеллектуальный	Демидова	
230105'	бакалавр	заочная	Теория нечетких м-	Демидова	
080500'	бакалавр	заочная	Анализ данных	Дмитриева	
080500'	бакалавр	заочная	Базы данных	Дмитриева	
200504'	бакалавр	заочная	Информатика	Дмитриева	
045634'	магистр	заочная	Математическая логика	Пруцков	
230105'	бакалавр	заочная	СИИ	Цуканова	Готовые\УМК_СИИ

Таблица 2 - Результат фильтрации по критериям: Форма обучения = очная, Разработчик = Цуканова

Специальность	Квалификация	Форма обучения	Дисциплина	Разработчик	Гиперссылка на УМК
080801'	бакалавр	очная	ИИС	Цуканова	Готовые\УМК_ИИС
080504'	бакалавр	очная	ИТУ	Цуканова	Готовые\ГМУ_ИТУ
220305'	бакалавр	очная	Онтология производств	Цуканова	Готовые\УМК_Онто
230105'	бакалавр	очная	Пролог	Цуканова	Готовые\УМК_Прол
230105'	бакалавр	очная	СИИ	Цуканова	Готовые\УМК_СИИ

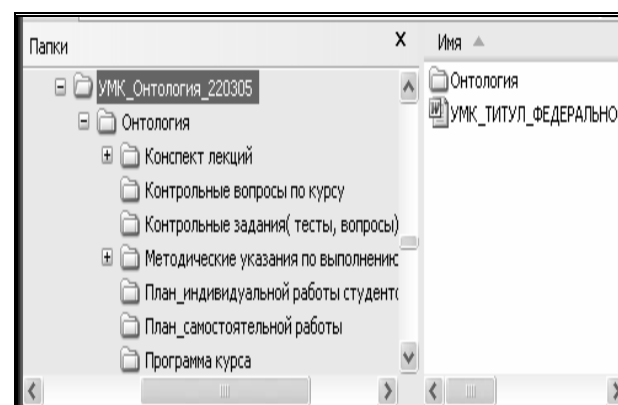


Рисунок 3 - По гиперссылке открылся каталог с УМК по дисциплине «Онтология производственной сферы»

В таблице 2 показан результат фильтрации по критериям: *Форма обучения = очная*, *Разработчик = Цуканова*. Если пользователь выберет гиперссылку, связанную с дисциплиной «Онтология производственной сферы», то перед ним откроется каталог, где расположен УМК данной дисциплины (рисунок 4).

Анализ процессов подготовки УМК можно проводить средствами работы с данными в Excel. Можно выполнить различные виды сортировок строк таблицы. После сортировки получить итоги по каждому из показателей. Но самым интересным и важным инструментом анализа является «Сводная таблица». Если классы считать измерениями, а количество разработанных УМК ресурсом, то с помощью сводной таблицы можно

получать итоги в разрезе любых измерений как в виде таблицы, так и в виде диаграммы. Пример приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Рейтинг разработчиков

Количество по полю Регистрационный номер УМК	
Разработчик	Итого
Дмитриева	12
Цуканова	10
Демидова	6
Пруцков	4
Общий итог	32

Рассмотренная онтология отвечает цели анализа работы кафедры по обеспечению учебно-методическими комплексами дисциплин, читаемых сотрудниками кафедры. Если целью будет анализ обеспеченности учебно-методическими комплексами дисциплин специальностей, выпускаемых кафедрой, то онтология изменится. При этом само хранилище УМК не потребует никакой реорганизации.

Результаты. На кафедре вычислительной и прикладной математики РГРТУ создано хранилище УМК в виде каталога. В табличном процессоре Microsoft Excel разработана онтология УМК, и файл с онтологией размещен в каталоге с УМК. Полученная в результате программная надстройка предоставляет возможность получить быстрый доступ к УМК при указании свойств комплекса с помощью автофильтра. Встроенные средства Microsoft Excel позволяют проводить анализ процесса разработки УМК на кафедре и оценивать его качество.

Заключение. Онтология – это метаданные о данных, она описывает сущности и связи предметной области. Описание зависит от цели использования данных, поэтому для одних и тех же данных можно создать несколько онтологий, которые будут отличаться выбранными для рассмотрения свойствами, классами и бинарными связями.

Онтология УМК, преобразованная в формат RDF/XML, может использоваться при информационном поиске.

Библиографический список

1. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.М. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
2. Цуканова Н.И., Чикалин К.Д., Гришин Б.С. Разработка онтологии на основе ER-диаграммы. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сборник науч. труд./под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань (РГРТУ), 2012. 5 с.
3. Страхова З.В., Цуканова Н.И. Разработка онтологии документальной информационной системы «Учебно-методические комплексы кафедры»: монография. – Вып. 2. – Пенза; М.: Приволжский Дом знаний; МИЭМП, 2012.-16 с.
4. Каширин Д.И., Пылькин А.Н. Структуризация и унификация онтологических описаний на языке OWL в задачах информационного поиска //Проблемы полиграфии и издательского дела. № 4. М., 2008. – С. 45-57.
5. Благодаров А.В., Тишкин Р.В. Автоматизация проектирования баз данных в среде Sybase PowerDesigner: мет. указ. к лаб. раб. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2010. 40 с.