

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К УЧЕТУ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Р.Л. Гилязов, В.Ю. Столбов

Рассмотрена задача выбора оптимальной конфигурации мультисервисной сети связи. Предложена методика учета иерархической структуры конфликтных нечетко формализованных интересов различных групп пользователей сети. Приведены примеры, демонстрирующие применение методики.

Ключевые слова: мультисервисные сети связи, оптимизация, социальные группы пользователей, иерархическая структура нечетких предпочтений.

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве случаев территориально-распределенная сеть передачи данных служит для обеспечения возможности удобного, качественного и дешевого взаимодействия отдельных пользователей или их групп между собой. Оптимальное использование сети зависит от услуг, которые она предоставляет: насколько хорошо каждая услуга разрешает проблемы потребителя, насколько быстро она может быть доставлена потребителю и насколько она надежно функционирует. Стоимость сети (включая расходы на ее содержание) зависит от инфраструктуры, развернутой для ее поддержания: общей стоимости требуемого оборудования и стоимости поддержки информационных систем. Число потребителей информационных услуг неуклонно растет, повышаются их требования к качеству обслуживания. В последнее время в отрасли связи произошли радикальные перемены, затронувшие деятельность почти всех телекоммуникационных компаний: появились и активно внедряются новые технологии доступа, транспорта и предоставления услуг, возник широкий спектр новых услуг, и снизилась доходность традиционных услуг связи [1].

Наибольшее влияние на телекоммуникационный рынок нашей страны за последние 5–7 лет, вне всякого сомнения, оказал процесс предоставления абонентам цифровых клиентских окончатий, позволяющих оказывать услуги высокоско-

ростной передачи данных. Несмотря на то, что цифровые технологии давно используются в сетях передачи данных, на уровне абонентского доступа долгое время безраздельно господствовал доступ посредством установления телефонного соединения с помощью аналогового модема. Внедрение цифровых технологий абонентского доступа и стремительное снижение стоимости оборудования для организации оптических каналов связи привело к тому, что стоимость организации абонентского широкополосного доступа снизилась настолько, что стали возможны массовые продажи широкополосных услуг. В свою очередь, это привело к тому, что операторы связи получили техническую возможность оказывать конвергентные услуги, связанные с передачей голосовой и видеoinформации по одному и тому же каналу связи. В специальной литературе эти услуги стали называть Triple Play Services.

Широкое распространение услуг Triple Play, в свою очередь, ставит вопрос о выборе эффективных решений при проектировании и эксплуатации сети. Внедрение математических моделей, позволяющих быстро и качественно анализировать и оптимизировать имеющиеся проектные решения и проектировать новые сети, позволяет изменить процесс построения сети и ее эксплуатацию. Вместо интуитивных решений, основанных только на личном опыте людей, их принимающих, приходит математический аппарат, позволяющий этим людям принимать решения на основе данных моде-



лирования, что значительно повышает эффективность управленческих решений. Задача становится еще более актуальной, если учесть, что рынок передачи видеoinформации тоже находится на пороге значительных перемен. Уже в каждом магазине можно купить телевизор с надписью HDTV (технология передачи видеоизображения высокой четкости), а эта технология предъявляет повышенные требования к пропускной способности сетей передачи данных, и необходимо умение предсказать поведение сети при внедрении HDTV, чтобы полученное решение было надежным и финансово эффективным. Такое умение может стать ключевым фактором успешности внедрения HDTV проекта.

В современных сетях передачи данных выделяют магистральный (ядро сети, *core*), пользовательский (последняя миля) и распределительный уровни [2]. При проектировании сети передачи данных стремятся найти такой вариант построения транспортной сети, который бы удовлетворял необходимую потребность в связи при наименьших общих затратах на построение, обслуживание и последующее развитие сети. Важно понимать, что выбор пользовательского уровня сети, как правило, достаточно прост: его пропускная способность и становится тем фактором, который влияет на спектр услуг, которые можно оказать именно этому абоненту. Кроме того, выбор этого уровня большей частью определяется тем, какими ресурсами располагает оператор связи. В то же время выбор архитектуры собственно сети передачи данных (магистральный и распределительный уровни) может представлять собой достаточно сложную задачу. При создании и эксплуатации любой сети связи капитальные затраты и эксплуатационные расходы должны быть минимальны при условии, что сеть выполняет с заданными качественными показателями возложенные на нее функции по передаче и распределению информационных потоков, поступающих от потребителей [3]. Задачи моделирования магистрального и распределительного уровней сети рассматриваются в работах [4–6]. Здесь же рассмотрим вопросы построения обобщенного критерия оптимальности сети с учетом нечетких предпочтений различных социальных групп.

В качественном функционировании сети передачи данных заинтересованы различные группы лиц. В первую очередь, это, конечно, оператор сети, который инвестирует средства в строительство сети и несет расходы по поддержанию ее работоспособности. Кроме оператора сети, в ее качественном функционировании заинтересованы операторы и потребители услуг сети. Операторы услуг получают доход от оказания посредством сети передачи данных услуг потребителям, а потребители получают выгоду непосредственно от потре-

ления услуг. Таким образом, при проектировании и использовании современной мультисервисной сети связи (МСС) сталкиваются интересы различных групп потребителей и операторов услуг. Любая, даже самая мощная сеть передачи данных обладает ограниченными ресурсами для удовлетворения запросов пользователей. Увеличение количества доступных ресурсов требует дополнительных затрат от оператора сети. Пользователи сети, с одной стороны, заинтересованы в том, чтобы получать максимальное число услуг с наивысшим качеством, с другой стороны — в снижении своих затрат на пользование сетью. Сообщество потребителей услуг неоднородно, разные группы потребителей хотят получать разные услуги и с разным качеством, что, в свою очередь, приводит к предъявлению противоречивых требований ко всей системе. Для качественного проектирования сетей передачи данных необходим учет всех предъявляемых к сети требований, что невозможно без учета интересов различных социальных групп пользователей.

Таким образом, сеть передачи данных призвана удовлетворять запросам всех заинтересованных лиц, связанных с эксплуатацией сети: пользователей сети, операторов предоставляемых сетью услуг, оператора сети. Поэтому при моделировании МСС ее необходимо рассматривать как единую социально-техническую систему, в которой активную роль играют потребители услуг связи. Подобные подходы к управлению организационными и социально-экономическими системами с использованием теории активных систем и методов комплексного оценивания рассмотрены в работах [7, 8]. В работе [9] приведены подробный обзор и классификация методов комплексного оценивания и рационального выбора. Однако предлагаемые подходы требуют дополнительной конкретизации для решения рассматриваемой задачи.

Большинство работ, посвященных моделированию и оптимизации сетей связи, например, [10, 11], не учитывают социальную составляющую МСС. В то же время проблемам учета интересов пользователей при управлении сетями связи посвящен ряд работ, основанных на теории общественного выбора, например, [12], в которой задача распределения ресурсов сети между потребителями решается оригинальным, но достаточно частным способом. Ее авторы предлагают предоставить пользователям возможность самим устанавливать классы обслуживания (приоритеты при передаче по сети) для получаемых ими услуг. Для обеспечения оптимального назначения приоритетов пользователями предлагается установить особый механизм ценообразования, при котором цена получаемой пользователем услуги зависит от приоритета, установленного пользователем. Предполагается линейная связь между стоимостью услуги и потерями

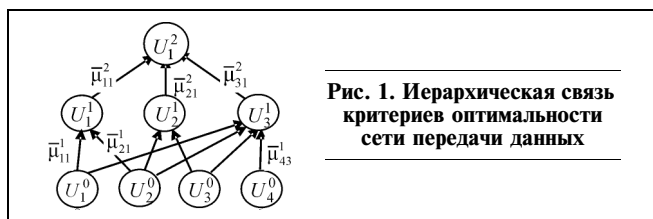


Рис. 1. Иерархическая связь критериев оптимальности сети передачи данных

от отказа в ее получении (или от неудовлетворительного качества услуги). Однако правильный выбор класса обслуживания для услуг различных типов может быть затруднен для недостаточно технически образованных пользователей, что может приводить как к их отказу от услуг сети, так и к неоптимальному ее использованию. В данной работе, в отличие от работы [12], устраняется сильное допущение о линейности и, благодаря кластеризации пользователей на группы, учитываются интересы пользователей без их привлечения к самостоятельному принятию решений.

Предлагаемый подход к проектированию МСС позволяет учесть не только технико-экономические критерии функционирования сети связи, но и интересы (часто конфликтные) различных групп пользователей данной сети. Конечное решение об инвестициях в строительство сети и выборе конкретных параметров сети передачи данных принимает оператор сети с учетом интересов всех сторон, находящихся на различных уровнях системы управления сетями связи. Для этой цели предлагаемый критерий оптимальности сети передачи данных имеет иерархическую структуру, представленную на рис. 1. Стрелками показана зависимость критериев различных уровней, а веса на стрелках задают степень зависимости. Участие весов в формировании критериев оптимальности на каждом структурном уровне будет пояснено далее.

На нулевом уровне находятся технические критерии, характеризующие качество функционирования сети, например: число потерянных пакетов, среднее время задержки для каждой услуги, предоставляемой сетью, стоимость сети и др. На первом уровне находятся комплексные критерии групп потребителей услуг и операторов услуг, характеризующие степень удовлетворенности группы пользователей или оператора услуги качеством функционирования сети. На последнем (втором) уровне находится обобщенный критерий оператора сети, характеризующий степень его удовлетворенности оценками групп пользователей и операторов услуг качеством функционирования сети. Критерии верхних уровней представляют собой свертку (необязательно линейную) критериев нижних уровней. Все критерии, входящие в обобщенный иерархический критерий оптимальности сети, начиная с первого уровня, имеют нечеткую природу. Основная причина нечеткости требований к сети

передачи данных заложена в необходимости учета интересов большого числа пользователей сети и в широком спектре услуг, предоставляемых сетью. Цель строительства мультисервисной сети передачи данных заключается в удовлетворении интересов потребителей услуг, требования которых можно считать конечными. Пользователи сети, по понятным причинам, не могут задать точного критерия, характеризующего их удовлетворенность качеством и стоимостью услуг, предоставляемых сетью. Поэтому в данной методике для описания предпочтений пользователей сети предлагается использовать лингвистическую переменную [7]. Кроме того, сеть передачи данных существует в условиях постоянных изменений: вводятся новые услуги, меняются предпочтения пользователей, повышаются требования к качеству предоставляемых услуг. Таким образом, для выбора оптимальных решений при развертывании мультисервисной сети передачи данных оператору сети необходимо учитывать большое число факторов, что требует применения специального математического аппарата.

1. ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Для учета иерархической природы критерия оптимальности сети передачи данных предлагается следующая методика.

Пусть каждый вариант построения сети передачи данных характеризуется некоторым набором значений критериев $\{U_i^0 = \{u_{ik}^0\}\}$, где $k = \overline{1, K}$ — номер варианта построения системы, i — номер критерия. Необходимо выбрать лучший вариант построения этой системы. В качестве таких критериев для сетей передачи данных могут выступать средние задержки при передаче информации различных типов, дрожание, потеря пакетов, число каналов эфирного видео, доступных в сети, и качество этих каналов и др. При этом критерии оптимальности имеют иерархическую структуру.

На верхнем структурном уровне оптимальность системы зависит от некоторого обобщенного критерия U_1^2 . Значения критерия U_1^2 , в свою очередь, зависят от значений критериев из некоторого множества $\{U_{j2}^1\}$, которые принадлежат уровню 1. Значения каждого критерия уровня, в свою очередь, зависят от значений исходных критериев оптимальности системы $\{U_i^0\}$.

Будем считать, что каждое значение критерия u_{ik}^0 задает степень предпочтительности системы для каждого варианта V_k^0 построения системы по



Таблица 1

Оптимальность вариантов построения системы с учетом критериев нулевого уровня

Критерий	Вариант			
	V_1^0	V_2^0	...	V_K^0
U_1^0	u_{11}^0	u_{12}^0	...	u_{1K}^0
U_2^0	u_{21}^0	u_{22}^0	...	u_{2K}^0
...
$U_{m_0}^0$	$u_{m_0 1}^0$	$u_{m_0 2}^0$...	$u_{m_0 K}^0$

критерию U_i^0 . Результат применения критериев U_i^0 к вариантам V_k^0 отображен в табл. 1, в которой u_{ik}^0 — некоторые числа, имеющие смысл оптимальности соответствующего варианта V_k^0 по критерию U_i^0 .

Отметим, что критерии первого уровня U_j^1 зависят не от самих вариантов построения сети, а от значений критериев нулевого уровня $\{U_i^0\}$.

Введем функции принадлежности $\mu_j^1(u_{ik}^0) \in [0, 1]$, которые показывают «меру удовлетворенности» значениями критерия u_{ik}^0 нулевого уровня в смысле j -го критерия первого уровня (определяемого соответствующей группой пользователей сети), где k — номер варианта построения сети. Например, значением критерия нулевого уровня u_{ik}^0 может быть качество IP-телефонии, обеспечиваемое сетью при k -м варианте построения сети, а значением функции принадлежности $\mu_j^1(u_{ik}^0)$ будет степень удовлетворенности j -й группы пользователей качеством IP-телефонии. Для определения функции принадлежности в данном случае удобно использовать лингвистическую переменную (например, 1 — очень хорошо, 0,8 — хорошо, 0,5 — удовлетворительно, 0,2 — плохо, 0 — очень плохо). Подчеркнем, что такой способ позволяет учесть нелинейную зависимость удовлетворенности пользователей сети от качества предоставляемых услуг, подтверждением которой может служить закон убывающей полезности в экономике [13].

Для каждого критерия U_j^1 введем некоторое нечеткое бинарное отношение $\tilde{R}_j^1(V_a^1, V_b^1)$ с функ-

цией принадлежности $\mu_{\tilde{R}^1}(V_a^1, V_b^1)$, имеющее смысл степени превосходства варианта построения сети $V_a^1 = \{\mu_j^1(u_{ia}^0)/u_{ia}^0\}, i = \overline{1, m_0}$ над вариантом $V_b^1 = \{\mu_j^1(u_{ib}^0)/u_{ib}^0\}, i = \overline{1, m_0}$ и учитывающее важность учета критерия U_i^0 в смысле критерия $U_j^1(\bar{\mu}_{ij}^1)$. Иначе говоря, $\bar{\mu}_{ij}^1$ задает матрицу важностей критериев нулевого уровня в смысле критериев первого уровня.

Каждый критерий первого уровня зависит в общем случае от m_0 критериев нулевого уровня, а введенное нечеткое отношение $\tilde{R}_j^1(V_a^1, V_b^1)$ устраняет многокритериальную неопределенность при вычислении значений критериев первого уровня. Предлагаются два подхода к устранению неопределенности. Первый заключается в замене множества критериев их линейной сверткой. Функция принадлежности нечеткого отношения при таком подходе имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{R}^1}(V_a^1, V_b^1) &= \frac{1 + \sum_i \bar{\mu}_{ij}^1(\mu_j^1(u_{ia}^0) - \mu_j^1(u_{ib}^0))}{2 \sum_i \bar{\mu}_{ij}^1} \equiv \\ &\equiv \mu_{\tilde{R}^1}^I(V_a^1, V_b^1), \end{aligned} \quad (1)$$

где числовые коэффициенты нужны для приведения области значений функции к отрезку $[0, 1]$.

Второй подход заключается в выборе критериев, по которым отклонения варианта a от варианта b максимальны. Функция принадлежности нечеткого отношения при таком подходе может иметь вид

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{R}^1}(V_a^1, V_b^1) &= \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \max \left(\max_i \left(\frac{\bar{\mu}_{ij}^1(\mu_j^1(u_{ia}^0) - \mu_j^1(u_{ib}^0))}{\max(\mu_j^1(u_{ia}^0), \mu_j^1(u_{ib}^0))} \right), 0 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \min \left(\min_i \left(\frac{\bar{\mu}_{ij}^1(\mu_j^1(u_{ia}^0) - \mu_j^1(u_{ib}^0))}{\max(\mu_j^1(u_{ia}^0), \mu_j^1(u_{ib}^0))} \right), 0 \right) \right) \equiv \\ &\equiv \mu_{\tilde{R}^1}^{II}(V_a^1, V_b^1), \end{aligned} \quad (2)$$

где \max показывает максимальное (по критериям нулевого уровня) превосходство варианта a над вариантом b , \min — превосходство варианта b над вариантом a .

Выбор конкретной функции принадлежности, например, (1) или (2), зависит от предметной об-

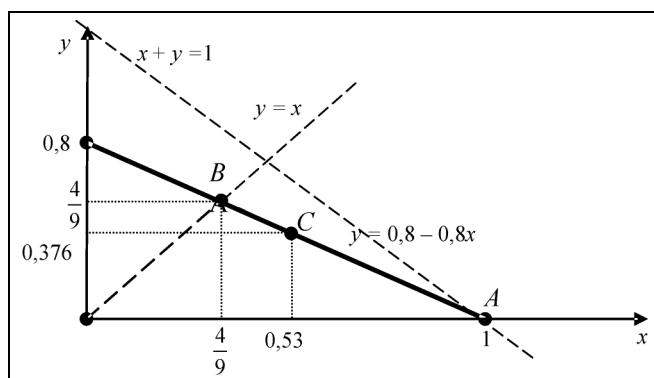


Рис. 2. Пример применения различных подходов к устранению многокритериальной неопределенности

ласти функционирования системы. Возможен также компромиссный вариант:

$$F(\mu_i^j(x_i^k)) = (1 - \alpha)\mu_{R^1}^1(V_a^1, V_b^1) + \alpha\mu_{R^1}^{\text{II}}(V_a^1, V_b^1) \equiv \mu_{R^1}^{\text{III}}(V_a^1, V_b^1), \quad (3)$$

где $\alpha \in [0, 1]$ — некоторая константа. Различия в применении функций принадлежности (1), (2) и (3) могут быть продемонстрированы на следующем примере (рис. 2). Пусть необходимо найти оптимальный вариант построения некоторой системы, имеющей два критерия оптимальности x и y . Важности критериев будем считать одинаковыми и равными единице ($\bar{\mu}_x = \bar{\mu}_y = 1$). Образ Парето-множества решений в пространстве критериев оптимальности пусть имеет вид $y = 0,8 - 0,8x$ (на рис. 2 жирная линия). В случае применения функции (1) лучшим вариантом окажется точка A , в случае функции (2) лучшим вариантом будет точка B , а в случае функции (3) лучшими будут точки отрезка $[A, B]$ в зависимости от коэффициента α , например, при $\alpha = 0,5$ наилучшим решением будет точка C . При изменении важности критериев, точка A будет определяться пересечением отрезка $y = 0,8 - 0,8x$, $x \in [0, 1]$, и прямой $\bar{\mu}_x x + \bar{\mu}_y y = c$, где c — максимальная константа, при которой пересечение существует, а точка B — пересечением того же отрезка и прямой $\bar{\mu}_x x = \bar{\mu}_y y$.

Видно, что первые две функции принадлежности дают крайние результаты из отрезка $[A, B]$, а третья позволяет получать промежуточное решение, учитывающее уровень уступки по некоторым критериям оптимальности. Управлять решением в последнем случае удобно с помощью параметра α .

Коэффициент α в формуле (3) можно считать уровнем некомпенсированности критериев. Смысл ко-

эффициента α заключается в возможности уступить по одному критерию в пользу остальных. Если $\alpha = 1$ (критерии некомпенсированы), то такие уступки можно считать недопустимыми. Если $\alpha = 0$ (критерии компенсированы), то можно игнорировать один из критериев даже при незначительном выигрыше по сумме всех критериев. В приведенном примере, при условии, что критерий y будет находиться в неотрицательной зоне, уступив $0,08$ единиц по критерию y , всегда можно получить выигрыш в $0,1$ единицы по критерию x ; т. е. уступка по критерию y приводит к выигрышу по сумме критериев. Если уровень некомпенсированности критериев равен нулю ($\alpha = 0$), то такая уступка допустима; если уровень некомпенсированности критериев равен единице ($\alpha = 1$), то уступка невозможна. Уровень некомпенсированности критериев зависит исключительно от предметной области задачи и от предпочтений лица, принимающего решение. Например, при выборе места для проживания отдаленность от центра города может быть в значительной степени компенсирована хорошими экологическими условиями, а относительно плохое состояние экологии в центре города компенсируется развитой инфраструктурой. В этом случае можно говорить о низком уровне некомпенсированности критериев. В случае распределения сил между оборонительными районами высокая обороноспособность одного района не может компенсировать низкую обороноспособность другого (противник ударит в слабое место), поэтому здесь можно говорить о некомпенсированности критериев. В рассматриваемом случае оператор сети не всегда может «пожертвовать» интересами одной группы в пользу других, а пользователи сети, в свою очередь, не всегда готовы отказаться от одной услуги ради повышения качества остальных услуг. Поэтому введением параметра α можно решить данную проблему выбора. В общем случае параметр α , как и веса критериев, может выбираться каждым лицом, принимающим решение на своем уровне иерархии, задавая правило свертки критериев нижнего уровня.

Вернемся к построению обобщенного критерия оптимальности сети передачи данных. Построим интегральную оценку варианта построения сети $V_a^1 = \{\mu_j^1(u_{ia}^0)/u_{ia}^0\}$, $i = \overline{1, m_0}$ в смысле критерия U_j^1 , $i = \overline{1, m_1}$, следующим образом: $F_j^1(V_a^1) \equiv \min_{b, b \neq a} (\mu_{R^1}^1(V_a^1, V_b^1))$. Обозначим $u_{ji}^1 \equiv F_j^1(V_i^1)$. Результат применения критериев U_i^1 к вариантам V_j^1 (табл. 2) будет выглядеть аналогично табл. 1.



Таблица 2

Оптимальность вариантов построения системы с учетом критериев первого уровня

Критерий	Вариант			
	V_1^1	V_2^1	...	V_K^1
U_1^1	u_{11}^1	u_{12}^1	...	u_{1K}^1
U_2^1	u_{21}^1	u_{22}^1	...	u_{2K}^1
...
$U_{m_1}^1$	$u_{m_11}^1$	$u_{m_12}^1$...	$u_{m_1K}^1$

Применив аналогичные рассуждения для последующих уровней, для уровня p получим:

$$u_{ik}^p \equiv F_i^p(V_k^p) = \min_{b, b \neq k} (\mu_{\bar{R}^p}(V_k^p, V_b^p)) =$$

$$= \min_{b, b \neq k} (\mu_{\bar{R}^p}(\{\mu_i^p(u_{jk}^{p-1})/u_{jk}^{p-1}\}, \{\mu_i^p(u_{jb}^{p-1})/u_{jb}^{p-1}\})),$$

где i — номер критерия уровня p , k — номер варианта построения системы, j — номер критерия уровня $p - 1$. Заметим, что функции принадлежности μ_i^p могут зависеть не только от значений критериев предыдущего уровня u_{jk}^{p-1} , но и от значений критериев нулевого уровня u_{ik}^0 , тогда $\mu_i^p = \mu_i^p(u_{jk}^{p-1}, u_{ik}^0)$, $V_k^{p-1} = \mu_i^p(u_{jk}^{p-1}, u_{ik}^0)/(\{\mu_i^p(u_{jk}^{p-1})\}, \{u_{ik}^0\})$. Такая зависимость может появиться вследствие того, что на каждом последующем уровне значения критериев теряют физический смысл. Потеря физического смысла значений критериев связана с тем, что процедура оценки вариантов построения системы, вследствие многокритериальной неопределенности, может иметь достаточно сложный вид, а результат этой процедуры выражаться безразмерными параметрами. Поэтому, если критерии уровня p не полностью «доверяют» критериям предыдущих уровней, то может возникнуть зависимость критериев уровня p от критериев нулевого уровня. Критерии нулевого уровня в этом случае можно назвать техническими критериями, так как они имеют смысл для предметной области функционирования системы.

На последнем уровне в рассматриваемом случае имеется только один обобщенный критерий U_1^2 , и

$$u_{0k}^2 \equiv F_0^2(V_k^2) = \min_{b, b \neq k} (\mu_{\bar{R}^2}(V_k^2, V_b^2)) =$$

$$= \min_{b, b \neq k} (\mu_{\bar{R}^2}(\{\mu_1^2(u_{jk}^1)/u_{jk}^1\}, \{\mu_1^2(u_{jb}^1)/u_{jb}^1\})).$$

Иначе говоря, на последнем уровне критериев варианту построения системы номер k ставится в соответствие некоторое число $u_{0k}^2 \in [0, 1]$ — степень предпочтительности данного варианта в смысле критерия U^n . Вариант a можно считать лучшим, если $u_{0a}^2 = \max_k(u_{0k}^2)$.

Таким образом, для выбора лучшего варианта построения системы при иерархической структуре критериев необходимо знать:

— степень предпочтительности вариантов построения системы в смысле критериев нулевого уровня (u_{ik}^0);

— степень предпочтительности значений критериев уровня $p - 1$ в смысле критериев уровня p ($\mu_j^p(u_{ik}^{p-1})$);

— важность каждого критерия уровня $p - 1$ в смысле каждого критерия уровня p , $\bar{\mu}_{ij}^p, p = \overline{2, n}$, где n — число уровней критериев (в данной задаче $n = 2$).

Применение изложенного подхода продемонстрируем на следующем примере.

2. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ПРИМЕР

Пусть оператору сети необходимо выбрать лучший из трех вариантов построения сети передачи данных, каждый вариант характеризуется тремя показателями (табл. 3). К сети подключены бизнес-центры и жилые дома, и все пользователи сети разбиты на 2 группы (корпоративные и домашние пользователи).

Оператор определил степень удовлетворенности пользователей качеством функционирования сети по каждому из показателей, а также важность каждого показателя для конкретной группы пользователей, например, путем социологического опроса, (табл. 4 и 5).

В табл. 5 показано, что корпоративные пользователи уделяют повышенное внимание качеству услуг Интернета и телефонии, предоставляемых сетью, и игнорируют качество передачи видеодан-

Таблица 3

Технические показатели функционирования сети передачи данных

Показатель, с	Вариант		
	1	2	3
Средняя задержка Интернета	1	2,8	3
Средняя задержка видео	0,011	0,005	0,01
Средняя задержка телефонии	0,015	0,013	

Таблица 4

Степень удовлетворенности групп пользователей качеством функционирования сети для трех вариантов построения сети u_{ik}^0

Социальная группа	Вариант								
	1			2			3		
	Качество								
	Интернета	видео	телефонии	Интернета	видео	телефонии	Интернета	видео	телефонии
Домашние пользователи	0,5		0,6	0,2	1	0,6	0,2	0,6	0,7
Корпоративные пользователи	0,5	0,6		0,3	0,9	0,7	0,2	0,5	0,8

ных. Для домашних пользователей важен весь спектр услуг.

Будем считать, что $\mu_j^1(u_{ik}^0) \equiv u_{ik}^0$. В соответствии с изложенным подходом, для каждой группы пользователей необходимо выработать свой интегральный показатель оценки качества функционирования сети в целом $F_i^1(V_k^1)$, где i — номер группы. Для этого необходимо определить нечеткое отношение $\tilde{R}_j^1(V_a^1, V_b^1)$, заданное своей функцией принадлежности $\mu_{\tilde{R}^1}^1(V_a^1, V_b^1)$. Предположим, выбрана функция принадлежности (1), т. е. уровень некомпенсируемости критериев $\alpha = 0$.

Тогда для демонстрационного примера

$$\mu_{\tilde{R}^1}^1(V_1^1, V_2^1, \bar{\mu}_{i1}^1) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_i \bar{\mu}_{i1}^1 (\mu_1^1(u_{i1}^0) - \mu_1^1(u_{i2}^0))}{\sum_i \bar{\mu}_{i1}^1} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1(0,3) + 1(-0,5) + 0,8(-0,1)}{(1 + 1 + 0,8)} \right) = 0,450.$$

Аналогично вычисляются остальные значения функции принадлежности. Результат сравнения вариантов построения сети приведен в табл. 6.

С учетом табл. 6 имеем: $u_{11}^1 \equiv F_1^1(V_1^1) = \min(\mu_{\tilde{R}^p}^1(V_1^1, V_b^1)) = \min(0,450; 0,507) = 0,450$.

Аналогично вычисляются остальные значения оптимальности вариантов построения сети с точек зрения групп пользователей. Результат приведен в табл. 7.

Предположим, что $\mu_j^2(u_{ik}^1) \equiv \begin{cases} u_{ik}^1, & \text{если } u_{ik}^1 < 0,3 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}$,

т. е. оператор считает, что если оценка группой пользователей варианта построения сети меньше 0,3, то такой вариант полностью не устраивает группу, и выбор этого варианта приведет к отказу использования сети. Оператор сети также устанавливает важность групп пользователей μ_{ij}^{-2} . Важность может быть пропорциональна числу пользователей в группе или ожидаемому доходу от подключения группы пользователей (табл. 8).

ливают важность групп пользователей μ_{ij}^{-2} . Важность может быть пропорциональна числу пользователей в группе или ожидаемому доходу от подключения группы пользователей (табл. 8).

Таблица 5

Матрица важности показателей качества функционирования сети с точек зрения пользователей μ_{ij}^{-1}

Социальная группа	Качество		
	Интернета	видео	телефонии
Домашние пользователи	1		0,8
Корпоративные пользователи	1	0,5	0,8

Таблица 6

Результат сравнения вариантов построения сети с точки зрения различных групп пользователей

Вариант	V_1	V_2	V_3
Домашние пользователи			
V_1	—	0,450	0,507
V_2	0,550	—	0,557
V_3	0,493	0,443	—
Корпоративные пользователи			
V_1	—	0,483	0,530
V_2	0,517	—	0,548
V_3	0,470	0,452	—

Таблица 7

Оптимальность вариантов построения сети с точек зрения групп пользователей u_{ik}^1

Группа пользователей	Вариант		
	V_1	V_2	V_3
U_1^1 (домашние пользователи)	0,450	0,550	0,443
U_2^1 (корпоративные пользователи)	0,482	0,517	0,452



Далее оператор сети строит свою интегральную оценку вариантов построения сети на основании аналогичных оценок групп пользователей (u_{ik}^1). В рассматриваемом случае

$$\mu_{\bar{R}^2}(V_1^2, V_2^2) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_i \mu_{i0}^{-2} (\mu_0^2(u_{i1}^1) - \mu_0^2(u_{i2}^1))}{\sum_i \mu_{i0}^{-2}} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1(0,450 - 0,550) + 0,9(0,482 - 0,517)}{(1 + 0,9)} \right) =$$

$$= 0,465.$$

Результат сравнения вариантов построения сети оператором приведен в табл. 9.

$$u_{01}^2 \equiv F_0^2(V_1^2) = \min_{b, b \neq 1} (\mu_{\bar{R}^2}(V_1^2, V_b^2)) =$$

$$= \min(0,465; 0,509) = 0,465,$$

$$u_{02}^2 \equiv F_0^2(V_2^2) = \min_{b, b \neq 2} (\mu_{\bar{R}^2}(V_2^2, V_b^2)) =$$

$$= \min(0,535; 0,544) = 0,535,$$

$$u_{03}^2 \equiv F_0^2(V_3^2) = \min_{b, b \neq 3} (\mu_{\bar{R}^2}(V_3^2, V_b^2)) =$$

$$= \min(0,491; 0,456) = 0,456.$$

Следовательно, при сделанных допущениях вариант V_2 лучше варианта V_3 , который, в свою очередь, лучше варианта V_1 . Поэтому оператору сети выгодно выбирать вариант V_2 . С учетом весов критериев оптимальности, вариант 2 имеет наибольшую среднюю степень удовлетворенности пользователей качеством функционирования сети (0,56 для домашних пользователей и 0,44 для корпоративных). Поэтому при нулевом уровне не-

Таблица 8

Матрица важности групп пользователей с точки зрения оператора сети μ_{i0}^{-2}

Группа пользователей	U_0^2 (общая оценка сети)
U_1^1 (домашние пользователи)	1
U_2^0 (корпоративные пользователи)	0,9

Таблица 9

Результат сравнения вариантов построения сети оператором

Вариант	V_1	V_2	V_3
V_1	—	0,465	0,509
V_2	0,535	—	0,544
V_3	0,491	0,456	—

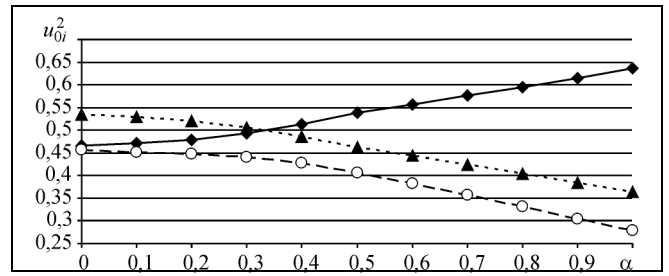


Рис. 3. Зависимость обобщенного критерия оптимальности от уровня некомпенсируемости критериев для трех вариантов построения сети: —◆— u_{01}^2 ; —▲— u_{02}^2 ; —○— u_{03}^2

компенсируемости критериев оптимальным оказался вариант 2. В то же время в приведенном примере трудно предположить нулевой уровень некомпенсируемости критериев. Например, плохое качество услуг Интернета, предоставляемых сетью, не может компенсироваться отличным качеством телефонии и, наоборот, плохое качество телефонии не может компенсироваться отличным доступом в Интернет. При условии полной некомпенсируемости критериев ($\alpha = 1$) лучшим окажется вариант 1. При этом $u_{01}^2 = 0,636$, $u_{02}^2 = 0,364$, $u_{03}^2 = 0,279$. График зависимости значений обобщенного критерия оптимальности от уровня некомпенсируемости критериев изображен на рис. 3.

Видно, что задание уровня некомпенсируемости критериев оптимальности в значительной мере влияет на выбор оптимального решения. При значениях $\alpha \leq 0,336$ второй вариант построения сети с точки зрения оператора намного выгоднее других. Это связано с тем, что оператор сети судит о качестве предоставляемых услуг через оценки пользователей. Если оператор убежден, что для пользователей услуг важны средние оценки качества функционирования сети ($\alpha \leq 0,336$), то второй вариант предпочтительнее. Но, если оператор считает, что для пользователей важен каждый показатель качества предоставляемых услуг и нельзя добиться успеха за счет высокого качества одних услуг в ущерб другим, то ему следует выбрать первый вариант построения сети. Равнооптимальность вариантов V_1 и V_2 достигается при значении $\alpha \approx 0,336$. Эту точку можно считать началом отрезка значительного параметра α , при которых уровень некомпенсируемости критериев оптимальности для данной системы можно считать значительным. В данном примере для упрощения представления результатов параметр α выбирался общим для всех уровней принятия решений. Однако, как отмечалось выше, каждое лицо, принимающее решение, может выбирать свой уровень некомпенсируемости критериев, что позволит более правильно учитывать предпочтения всех групп пользователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика учета иерархической структуры конфликтных нечетко формализованных интересов различных групп пользователей сети. Для учета требований к качеству функционирования сети со стороны каждой группы пользователей построены нечеткие критерии. Для устранения многокритериальной неопределенности предложен подход, основанный на учете уровня некомпенсируемости критериев оптимальности. Интересы всех социальных групп учитываются с помощью обобщенного критерия в виде нечеткого множества с нечетким носителем. Сравнение вариантов построения сети с учетом нечетких предпочтений различных социальных групп осуществляется с помощью специально разработанных индексов ранжирования. Для демонстрации предложенной методики приведен пример выбора лучшего варианта построения мультисервисной сети связи для двух групп пользователей и трех вариантов построения сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулешов К.В., Нетес В.А. Опыт совершенствования процессов управления трафиком и качеством работы телефонной сети // *Электросвязь*. — 2006. — № 9. — С. 2–5.
2. Гилязов Р.Л., Столбов В.Ю. Моделирование цифровой сети передачи данных с учетом случайных потребностей в доставке информации // *Труды XXXIV Междунар. конф. IT-S&E'07*. — Украина, Гурзуф, 2007. — С. 84–86.
3. Давыдов Г.Б. Информатизация и сети связи. — М.: Наука, 1984. — 128 с.
4. Гилязов Р.Л., Столбов В.Ю., Киндеркнехт С.В. Имитационное моделирование распределительного уровня цифровой

сети передачи данных с учетом предпочтений пользователей и оператора сети // *Теоретические и прикладные аспекты информационных технологий*. Сб. науч. тр. НИИУМС. — Пермь, 2007. — Вып. 56. — С. 52–55.

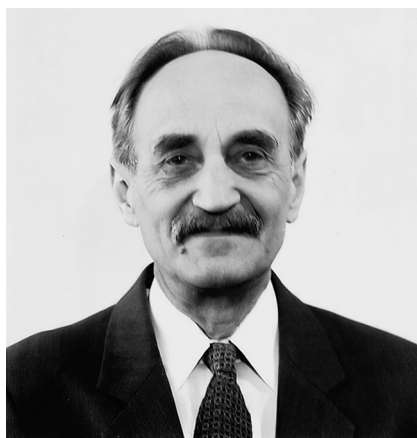
5. Гилязов Р.Л., Столбов В.Ю. Имитационное моделирование цифровой сети передачи данных с учетом предпочтений различных социальных групп // *Вестник ПГТУ. Прикл. математика и механика*. — 2007. — № 8. — С. 90–101.
6. Гилязов Р.Л., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Управление транспортными сетями электросвязи с учетом нечетких предпочтений // *Проблемы управления*. — 2008. — № 1. — С. 62–67.
7. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — М.: Физматлит, 2007. — 584 с.
8. Микони С.В. Теория и практика рационального выбора. — М.: Маршрут, 2004. — 463 с.
9. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. — М.: Физматлит, 2007.
10. Сычев К.И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи // *Телекоммуникации*. — 2007. — № 9. — С. 2–7.
11. Оптимизация процедур обслуживания вызовов на узлах коммутации корпоративной мультисервисной сети связи / А.В. Королев и др. // *Телекоммуникации*. — 2007. — № 8. — С. 2–8.
12. Orda A., Rom R., Shimkin N. Competitive routing in multi-user communication networks // *IEEE/ACM Trans. on Networking*. — 1993. — N 5. — P. 510–521.
13. Гальперин В.М., Игнатьев С.М., Моргунов В.И. Микроэкономика. — Т. 1. — СПб.: Экономическая школа, 1999. — 348 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Гилязов Руслан Леонидович — аспирант,
e-mail: Gilyazov@er-capital.ru,

Столбов Валерий Юрьевич — д-р техн. наук, профессор,
e-mail: svu@matmod.pstu.ac.ru,

Пермский государственный технический университет,
☎ (342) 239-12-97.

**Владимир Александрович ЖОЖИКАШВИЛИ
1925–2008**

1 ноября 2008 года скончался заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, видный учёный, академик Международной академии информатизации, иностранный член Академии наук Грузии, заслуженный машиностроитель РСФСР, доктор технических наук, профессор Владимир Александрович Жожикашвили.

Его научная деятельность началась в 1949 г., когда он впервые появился в Институте в качестве аспиранта. За годы работы В.А. Жожикашвили сформулировал, развил и довел до внедрения в народное хозяйство три фундаментальных научно-технических направления в области автоматического управления: бесконтактные системы телемеханики с использованием магнитных гистерезисных элементов, общесоюзную систему резервирования мест и продажи билетов на самолеты "Сирена", давшую начало теоретическим работам в области автоматизированных систем массового обслуживания, и создание теории и практики построения таких систем на основе речевых технологий.

Результаты проведенных В.А. Жожикашвили научных исследований опубли-

кованы более чем в 140 научных публикациях, включая монографии, авторские свидетельства, брошюры и статьи в различных журналах, в том числе и в журнале "Проблемы управления". Под его научным руководством подготовлено и защищено более 40 кандидатских диссертаций.

Владимир Александрович любил свою работу, очень ценил Институт, отличался широтой и разнообразием интересов, был внимателен к людям. До последних дней своей жизни он активно работал, строил планы развития лаборатории, живо интересовался событиями в стране и мире.

Светлая память о Владимире Александровиче сохранится в наших сердцах.

*Сотрудники Института проблем
управления им. В.А. Трапезникова РАН
Редколлегия
Редакция*