

УДК 621.391

**Р. Р. Рзаев**, д-р, профессор, гл. науч. сотр., e-mail: raminrza@yahoo.com,  
**А. И. Гююшов**, докторант, e-mail: geyushev@hotmail.com,  
**А. Ш. Алмасов**, докторант, e-mail: askalmasov@gmail.com,  
Институт Систем Управления НАН Азербайджана

## Оценка качества услуг телекоммуникационной сети связи на основе метода нечеткого моделирования

*Предлагается подход к формированию модульной интеллектуальной системы оценки качества услуг телекоммуникационных сетей связи, основанный на применении метода нечеткого логического вывода. Предлагаемая в рамках данного подхода базовая нечеткая модель оценки в необходимой мере учитывает рекомендации Международного Союза Электросвязи в части, касающейся функционирования сетей пакетной коммутации на основе IP-протокола.*

**Ключевые слова:** IP-телефония, качество связи, параметр производительности сети связи, нечеткое множество, нечеткая импликация, нечеткое отношение

### Введение

На современном этапе развития телекоммуникационных сетей связи и беспроводных технологий наиболее остро стоит задача повышения качества услуг связи, которая постоянно совершенствуется по мере увеличения скорости передачи данных, повышения степени мобильности пользователей, расширения ассортимента предоставляемых услуг, улучшения степени использования радиочастотного спектра и степени интеллектуализации сетевого оборудования и абонентских гаджетов. При этом совершенствование телекоммуникационных сетей связи происходит на стыке противоречий между постоянно растущим потребительским спросом на абонентские услуги и ограниченным числом частот, что является вполне объективным. В свою очередь, это обуславливает существенное расширение спектра предоставляемых операторами связи услуг, увеличение потребительских требований к их качеству и, как следствие, совершенствование применяемых технологий управления.

Дело в том, что в процессе эксплуатации объективные технические характеристики сетей связи наследуются системами телекоммуникационных услуг, трансформируясь тем самым в характеристики предоставляемых услуг. Но и сами услуги связи имеют свои характерные особенности, среди которых доминирующей является качество телекоммуникационных услуг. При этом если на начальном этапе становления и продвижения сетей связи качество

предоставляемых ими услуг характеризуется совокупностью объективных технических характеристик, то уже на стадии эксплуатации происходит трансформация этих характеристик, так как в условиях конкурентного рынка телекоммуникационных услуг качество сетей становится предметом обсуждения и субъективных оценок их пользователей. В результате категория качества предоставляемых телекоммуникационных услуг все больше смещается в сторону неметризуемых характеристик, отражающих общую меру субъективной удовлетворенности потребителей.

Как и любой потребительский товар, услуга связи подчиняется законам рынка. Поэтому увеличение клиентской базы, обеспечивающей конкурентную позицию и, соответственно, рост прибыли становится основной прерогативой телекоммуникационных компаний. При этом требования абонентов связи, которые в основном оценивают услугу связи через свои субъективные суждения, такие, например, как "наличие (или отсутствие) прерываний связи", "недостаточно (или достаточно) хорошая слышимость", "приемлемая (или неприемлемая) разборчивость речи" и т. д., становятся доминирующими факторами, с которыми руководству телекоммуникационных компаний приходится считаться. Собственно по набору перечисленных субъективных требований к качеству связи и осуществляется абонентский выбор в пользу той или иной услуги связи.

## Постановка задачи

Очевидно, что субъективные оценки пользователей к качеству связи являются производными от объективных (технических) характеристик сети и результата их взаимодействия с характеристиками информационного трафика. В условиях жесткой конкуренции эти неметризуемые субъективные оценки пользователей становятся целевыми функциями, через которые менеджменту компании необходимо оценить субъективную удовлетворенность клиента. С учетом мультисервисности современных телекоммуникационных сетей необходимо решить эту задачу для всего спектра услуг связи в рамках создания единой системы оценки качества, обрабатывающей как объективные (структурированные), так и субъективные (слабо структурированные) показатели качества.

### Система контроля качества услуг связи в условиях нечеткой среды

На сегодняшний день одними из эффективных методов управленческих технологий являются элементы искусственного интеллекта, в том числе нечеткая логика и нечеткие процессоры, которые хорошо зарекомендовали себя в управлении беспроводными телекоммуникационными сетями. В частности, применение методов нечеткой логики в управлении когнитивными системами связи позволяет легко учитывать множество параметров для принятия решения и не требует сложных математических расчетов. Более того, математический аппарат теории нечетких множеств позволяет одинаково легко оперировать как метризуемыми, так и неметризуемыми данными.

Рассмотрим типовую функциональную схему системы контроля качества услуг связи [1, с. 26], в основе которой лежит механизм нечеткого логи-

ческого вывода, позволяющий оперативно давать многокритериальную оценку предоставляемой услуги в условиях нечеткой информации (рис. 1). В качестве объективных показателей качества выберем те, которые можно контролировать при определении уровней качества услуг связи. Более того, эти показатели должны быть хорошо известны, однозначно интерпретироваться и, что самое главное, адекватно отражать качество услуг. В ряде рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ) (см. [2, с. 15]) для широко распространенных сетей пакетной коммутации на основе IP-протоколов (IPv4 и IPv6) предлагается контролировать конкретные объективные показатели качества для установления уровня услуг. В частности, в рекомендации Y.1541 МСЭ приводятся сетевые классы обслуживания (*Network QoS Classes*), формируемые по объективным признакам (качествам) пользовательских услуг связи и приложений. В качестве таких признаков в данной рекомендации указаны численные значения параметров производительности сети, которые представлены в таблице.

В качестве примера услуги связи рассмотрим телефонную связь по протоколу IP (IP-телефонию), которая является приложением более общей технологии VoIP (Voice over IP) для передачи голоса. Выбор этой услуги обосновывается еще и тем, что IP-телефония очень чувствительна к джиттеру.

Согласно рекомендации Y.1541 IP-телефония может функционировать при наличии параметров производительности, соответствующих классам 0 и/или 1 [2, с. 15]. При этом предоставление услуги по классу 0 гарантирует высокое качество, а значит, и удовлетворенность пользователей сети. В то же время качество услуги IP-телефонии по классу 1 будет чуть хуже, и это придется компенсировать за счет внедрения дополнительных опций, чтобы продолжать расширять клиентскую базу. В остальных случаях качество связи будет слишком низким.

В работе [1] предложен весьма любопытный подход для формирования нечеткой системы оценки качества услуг связи. По средствам сформированных непротиворечивых лингвистических правил автор проводит тщательный анализ качества предоставляемых услуг на базе доступной информации о параметрах производительности сети (см. таблицу), т. е. судит об их качестве на основе объективных характеристик, интерпретируемых в виде адекватных нечетких множеств. Однако в представленном подходе недостаточно отчетливо проглядывается то, как эти объективные качества сетевых услуг трансформируются в субъективные сужде-

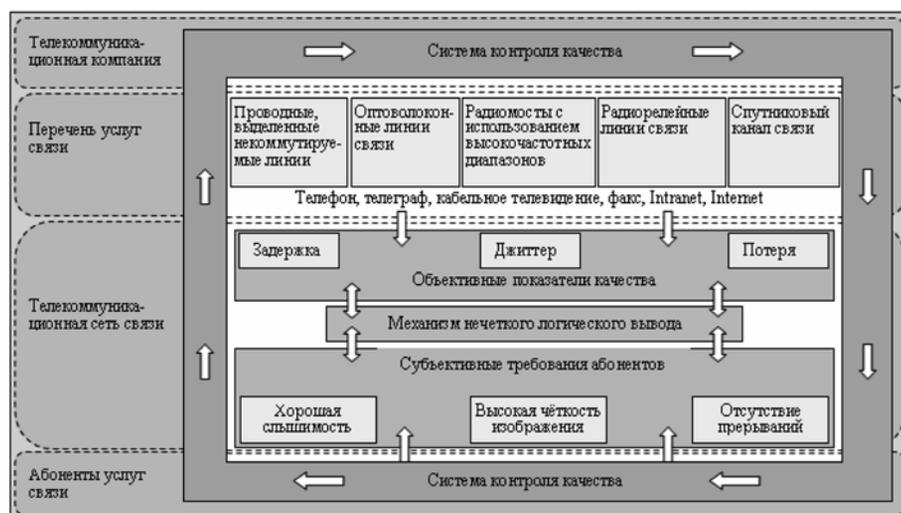


Рис. 1. Схема функционирования системы контроля качества услуг связи

**Классификация обслуживания по параметрам производительности сети**

Параметр производительности сети	Комментарий	QoS классы					
		Класс 0	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
Задержка в передаче (IPTD — IP-packet Transfer Delay)	Верхняя граница от среднего IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	U <sup>1</sup>
Джиттер (IPDV — IP-packet Delay Variation)	Разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета	50 мс	50 мс	U	U	U	U
Вероятность потери (IPLR — IP-packet Loss Ratio)	Верхняя граница вероятности потери IP-пакета	$1 \cdot 10^{-3}$	U				
Вероятность ошибки (IPER — IP-packet Error Ratio)	Верхняя граница вероятности ошибки в передаче IP-пакета			$1 \cdot 10^{-4}$			U

<sup>1</sup>U означает неустановленность

ния потребителей, в их субъективные критерии оценки. Другими словами, формируя причинно-следственные связи между этими характеристиками, можно было бы классифицировать качества предоставляемых услуг по степеням удовлетворенности пользователей сети, чем, собственно, мы и собираемся далее заняться.

**Классификация степеней удовлетворенности потребителей телекоммуникационных услуг (на примере IP-телефонии)**

Очевидно, что оценка качества услуг связи является многокритериальной процедурой, подразумевающей применение композиционного правила агрегирования оценки в каждом конкретном случае. Для оценки качества услуг IP-телефонии выберем пять оценочных понятий для значений параметров производительности сети:  $u_1$  — "СЛИШКОМ НИЗКОЕ";  $u_2$  — "НИЗКОЕ";  $u_3$  — "ДОСТАТОЧНО НИЗКОЕ";  $u_4$  — "СУЩЕСТВЕННОЕ";  $u_5$  — "ВЫСОКОЕ". Проще говоря, под множеством  $S = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$  будем понимать совокупность признаков, по которым будем классифицировать качество услуг связи. Тогда, полагая технические характеристики сети (критерии оценки качества) нечеткими множествами, оценку предоставляемых услуг IP-телефонии проведем с использованием достаточного набора нечетких импликативных правил вида "Если ..., тогда ..." и на их основе установим соответствующую шкалу градации удовлетворенности потребителей услуг.

Итак, сформулируем наши суждения следующим образом:

$e_1$ : "Если при передаче IP-пакета не наблюдаются задержка и существенный разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета, тогда качество сети удовлетворительное";

$e_2$ : "Если вдобавок к перечисленным выше требованиям не имеют место потери IP-пакета, тогда качество сети более чем удовлетворительное";

$e_3$ : "Если дополнительно к условиям, оговоренным в  $e_2$ , не имеют место ошибки в передаче IP-пакета, тогда качество сети безупречное";

$e_4$ : "Если при передаче IP-пакета не наблюдается существенного разброса от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета и не имеют место потери и ошибки, тогда качество сети очень удовлетворительное";

$e_5$ : "Если при передаче IP-пакета не имеют место задержки и потери, но при этом наблюдаются ошибки в передаче IP-пакета, тогда качество сети все же удовлетворительное";

$e_6$ : "Если при передаче IP-пакета наблюдаются потери и ошибки, тогда качество сети неудовлетворительное".

В приведенных высказываниях (причинно-следственных связях) входными характеристиками будем считать следующие признаки:

- $X_1$  — наличие задержки в передаче IP-пакета;
- $X_2$  — наличие джиттера в передаче IP-пакета;
- $X_3$  — вероятность потерь при передаче IP-пакета;
- $X_4$  — вероятность ошибки при передаче IP-пакета,

а выходной характеристикой  $Y$ , собственно, саму оценку качества услуги связи — уровень удовлетворенности потребителя. Тогда, определив соответствующие значения (термы) лингвистических переменных  $X_i$  ( $i = 1 \div 4$ ) и  $Y$ , на базе приведенных высказываний построим следующие импликативные правила:

$e_1$ : "ЕСЛИ  $X_1 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_2$ : "Если  $X_1 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_3$ : "Если  $X_1 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  БЕЗУПРЕЧНОЕ";

$e_4$ : "ЕСЛИ  $X_2 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  ОЧЕНЬ УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_5$ : "ЕСЛИ  $X_1 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3 =$  НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4 =$  ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_6$ : "ЕСЛИ  $X_3 =$  ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4 =$  ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y =$  НЕУДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ".

Лингвистическую переменную  $Y$  зададим на дискретном множестве  $J = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$ . Тогда используемые в импликативных правилах ее термы опишем нечеткими множествами с соответствующими функциями принадлежности [4, с. 78]:

- $\tilde{S}$  = УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{\tilde{S}}(x) = x, x \in J$ ;
- $M\tilde{S}$  = БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{M\tilde{S}}(x) = \sqrt{x}, x \in J$ ;
- $\tilde{P}$  = БЕЗУПРЕЧНОЕ,  $\mu_{\tilde{P}}(x) = \begin{cases} 1, & x = 1, \\ 0, & x < 1, \end{cases} x \in J$ ;
- $V\tilde{S}$  = ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{V\tilde{S}}(x) = x^2, x \in J$ ;
- $U\tilde{S}$  = НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{U\tilde{S}}(x) = 1 - x, x \in J$ .

Далее, фаззификацию термов в левых частях принятых правил осуществим с помощью гауссовских функций принадлежности  $\mu(u) = \exp(-u^2/\sigma_k^2)$  ( $k = 1 \div 4$ ), восстанавливающих нечеткие множества по опорному вектору  $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ , где  $u_i = (d_{i-1} + d_i)/2$  ( $i = 1 \div 5$ ) (рис. 2). При этом значения для  $\sigma_k$  подбираются исходя из степени важности признаков, по которым классифицируется качество услуг связи.

На рис. 2 градация уровней производительности сети представлена в общем виде. Однако очевидно, что простым преобразованием  $t = (x - d_0)/(d_5 - d_0)$ , где  $x \in [d_0, d_5]$ ,  $t \in [0, 1]$ , данный интервал  $[d_0, d_5]$  можно легко свести к единичному интервалу  $[0, 1]$ . Поэтому, оценивая качество услуг связи с точки зрения ее технических характеристик, градуированных в масштабе единичного интервала (рис. 3), где

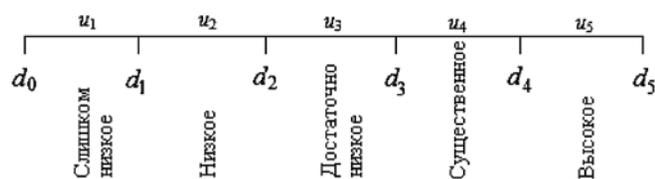


Рис. 2. Равномерная градация параметров производительности по уровням<sup>1</sup>

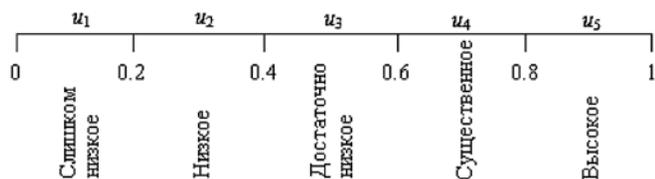


Рис. 3. Уровни значений параметров производительности сети в масштабе единичного отрезка

<sup>1</sup> Данная градация может быть и неравномерной, что несколько не меняет сути подхода.

$d_i = 0,2i$  ( $i = 0 \div 5$ ), фаззифицируем термы из левых частей импликативных правил в следующем виде:

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (задержка в передаче IP-пакета):

$$\tilde{A} = \frac{0,9394}{u_1} + \frac{0,5698}{u_2} + \frac{0,2096}{u_3} + \frac{0,0468}{u_4} + \frac{0,0063}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета):

$$\tilde{B} = \frac{0,9518}{u_1} + \frac{0,6412}{u_2} + \frac{0,2910}{u_3} + \frac{0,0889}{u_4} + \frac{0,0183}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (потеря IP-пакета):

$$\tilde{C} = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (ошибка при передаче IP-пакета):

$$\tilde{D} = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5}.$$

Тогда с учетом этих формализмов нечеткие правила сформулируем как:

$$e_1: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B}, \text{ то } Y = \tilde{S}\text{"};$$

$$e_2: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C}, \text{ то } Y = M\tilde{S}\text{"};$$

$$e_3: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = \tilde{D}, \text{ то } Y = \tilde{P}\text{"};$$

$$e_4: \text{"Если } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = \tilde{D}, \text{ то } Y = V\tilde{S}\text{"};$$

$$e_5: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = -\tilde{D}, \text{ то } Y = \tilde{S}\text{"};$$

$$e_6: \text{"Если } X_3 = -\tilde{C} \text{ и } X_4 = -\tilde{D}, \text{ то } Y = U\tilde{S}\text{"}.$$

Далее, для левых частей этих правил вычислим функции принадлежности  $\mu_{\tilde{M}_i}(u)$  ( $i = 1 \div 6$ ). В частности, имеем:

$$e_1: \mu_{\tilde{M}_1}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_1 = \frac{0,9394}{u_1} + \frac{0,5698}{u_2} + \frac{0,2096}{u_3} + \frac{0,0468}{u_4} + \frac{0,0063}{u_5};$$

$$e_2: \mu_{\tilde{M}_2}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_2 = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

$$e_3: \mu_{\tilde{M}_3}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_3 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5};$$

$$e_4: \mu_{\tilde{M}_4}(u) = \min\{\mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_4 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5};$$

$$e_5: \mu_{\tilde{M}_5}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), 1 - \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_5 = \frac{0,1052}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

$$e_6: \mu_{\tilde{M}_6}(u) = \min\{1 - \mu_{\tilde{C}}(u), 1 - \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_6 = \frac{0,0784}{u_1} + \frac{0,5203}{u_2} + \frac{0,8701}{u_3} + \frac{0,9817}{u_4} + \frac{0,9987}{u_5}.$$

В итоге правила запишем в еще более компактной форме:

- $e_1$ : "Если  $X = \tilde{M}_1$ , то  $Y = \tilde{S}$ ";
- $e_2$ : "Если  $X = \tilde{M}_2$ , то  $Y = M\tilde{S}$ ";
- $e_3$ : "Если  $X = \tilde{M}_3$ , то  $Y = \tilde{P}$ ";
- $e_4$ : "Если  $X = \tilde{M}_4$ , то  $Y = V\tilde{S}$ ";
- $e_5$ : "Если  $X = \tilde{M}_5$ , то  $Y = \tilde{S}$ ";
- $e_6$ : "Если  $X = \tilde{M}_6$ , то  $Y = U\tilde{S}$ ".

Для преобразования этих импликативных правил воспользуемся импликацией Лукасевича [3, с. 54; 6, с. 78]:

$$\mu_{\tilde{H}}(u, j) = \min(1, 1 - \mu_{\tilde{M}}(w) + \mu_{\tilde{Y}}(j)). \quad (1)$$

Тогда для каждой пары  $(u, j) \in U \times Y$  получим следующие нечеткие отношения на  $U \times Y$ :

$$R_1 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0606 & 0,1606 & 0,2606 & 0,3606 & 0,4606 & 0,5606 & 0,6606 & 0,7606 & 0,8606 & 0,9606 & 1 \\ 0,4302 & 0,5302 & 0,6302 & 0,7302 & 0,8302 & 0,9302 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,7904 & 0,8904 & 0,9904 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9532 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9937 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_2 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0784 & 0,3946 & 0,5256 & 0,6261 & 0,7108 & 0,7855 & 0,8530 & 0,9150 & 0,9728 & 1 & 1 \\ 0,5203 & 0,8366 & 0,9676 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8701 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9817 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9987 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_3 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 1 \\ 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 \\ 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 \\ 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 \\ 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_4 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,1052 & 0,1152 & 0,1452 & 0,1952 & 0,2652 & 0,3552 & 0,4652 & 0,5952 & 0,7452 & 0,9152 & 1 \\ 0,6321 & 0,6421 & 0,6721 & 0,7221 & 0,7921 & 0,8821 & 0,9921 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9378 & 0,9478 & 0,9778 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9957 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9999 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_5 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,8948 & 0,9948 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5203 & 0,6203 & 0,7203 & 0,8203 & 0,9203 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8701 & 0,9701 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9817 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9987 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_6 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,9216 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,9797 & 0,8797 & 0,7797 & 0,6797 & 0,5797 & 0,4797 \\ 1 & 1 & 0,9299 & 0,8299 & 0,7299 & 0,6299 & 0,5299 & 0,4299 & 0,3299 & 0,2299 & 0,1299 \\ 1 & 0,9183 & 0,8183 & 0,7183 & 0,6183 & 0,5183 & 0,4183 & 0,3183 & 0,2183 & 0,1183 & 0,0183 \\ 1 & 0,9013 & 0,8013 & 0,7013 & 0,6013 & 0,5013 & 0,4013 & 0,3013 & 0,2013 & 0,1013 & 0,0013 \end{array} \right. \end{matrix}$$

В результате пересечения нечетких отношений  $R_1, R_2, \dots, R_6$  в итоге получим следующее общее функциональное решение, отражающее причинно-следственную связь между параметрами производительности сети и качеством предоставляемых ею услуг:

$$R = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0606 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,9216 \\ 0,4302 & 0,5302 & 0,6302 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,5797 & 0,4797 \\ 0,7904 & 0,8904 & 0,9299 & 0,8299 & 0,7299 & 0,6299 & 0,5299 & 0,4299 & 0,3299 & 0,2299 & 0,1299 \\ 0,9532 & 0,9183 & 0,8183 & 0,7183 & 0,6183 & 0,5183 & 0,4183 & 0,3183 & 0,2183 & 0,1183 & 0,0183 \\ 0,9937 & 0,9013 & 0,8013 & 0,7013 & 0,6013 & 0,5013 & 0,4013 & 0,3013 & 0,2013 & 0,1013 & 0,0013 \end{array} \right. \end{matrix}$$

Далее, для определения уровня качества услуг связи применим правило композиционного вывода в нечеткой среде:

$$\tilde{E}_k = \tilde{G}_k \circ R, \quad (2)$$

где  $\tilde{E}_k$  — качество услуг связи  $k$ -го уровня;  $\tilde{G}_k$  — отображение  $k$ -го уровня параметров производительности в виде нечеткого подмножества. Тогда, выбирая композиционное правило как

$$\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \max_u \{\min(\mu_{\tilde{G}_k}(u), \mu_R(u))\} \quad (3)$$

и полагая, что  $\mu_{\tilde{G}_k}(u) = \begin{cases} 0, & u \neq u_k; \\ 1, & u = u_k, \end{cases}$  в итоге имеем:

$$\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \mu_R(u_k, j), \text{ т. е. } \tilde{E}_k \text{ есть } k\text{-я строка матрицы } R.$$

Теперь для классификации качества услуг применим процедуру дефаззификации нечетких выходов примененной модели. Итак, для оценочного понятия производительности сети  $u_1$  нечеткой интерпретацией соответствующего ему уровня качества услуг связи будет нечеткое множество

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1 &= \frac{0,0606}{0} + \frac{0,1052}{0,1} + \frac{0,1052}{0,2} + \frac{0,1052}{0,3} + \\ &+ \frac{0,1052}{0,4} + \frac{0,1052}{0,5} + \frac{0,1052}{0,6} + \frac{0,1052}{0,7} + \\ &+ \frac{0,1052}{0,8} + \frac{0,1052}{0,9} + \frac{0,9216}{1,0}. \end{aligned}$$

Устанавливая уровневые множества  $E_{1\alpha}$  и вычисляя соответствующие их мощности  $M(E_{1\alpha})$  по

формуле  $M(E_{1\alpha}) = \sum_{j=1}^n \frac{x_j}{n}$ , имеем:

- для  $0 < \alpha < 0,0606$ :  $\Delta\alpha = 0,0606$ ,  $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,5$ ;
- для  $0,0606 < \alpha < 0,1052$ :  $\Delta\alpha = 0,0446$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,1052 < \alpha < 0,9216$ :  $\Delta\alpha = 0,8164$ ,  $E_{1\alpha} = \{1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 1$ .

Для нахождения точечных оценок нечетких выходов  $\tilde{E}_k$  воспользуемся равенством

$$F(\tilde{E}_k) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(\tilde{E}_{k\alpha}) d\alpha, \quad (k = 1 \div 5), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\max}$  — максимальное значение на  $\tilde{E}_k$  [6, с. 56]. В данном случае имеем

$$F(\tilde{E}_1) = \frac{1}{0,9987} \int_0^{0,9987} M(E_{1\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,0606 + 0,55 \cdot 0,0446 + 1 \cdot 0,8164) = 0,9454.$$

Для оценочного понятия производительности сети  $u_2$ :

$$\tilde{E}_2 = \frac{0,4302}{0} + \frac{0,5302}{0,1} + \frac{0,6302}{0,2} + \frac{0,6321}{0,3} + \frac{0,6321}{0,4} + \frac{0,6321}{0,5} + \frac{0,6321}{0,6} + \frac{0,6321}{0,7} + \frac{0,6321}{0,8} + \frac{0,5797}{0,9} + \frac{0,4797}{1,0},$$

соответственно имеем:

- для  $0 < \alpha < 0,4302$ :  $\Delta\alpha = 0,4302$ ,  $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,4302 < \alpha < 0,4797$ :  $\Delta\alpha = 0,0494$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,4797 < \alpha < 0,5302$ :  $\Delta\alpha = 0,0506$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,5302 < \alpha < 0,5797$ :  $\Delta\alpha = 0,0494$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,5797 < \alpha < 0,6302$ :  $\Delta\alpha = 0,0506$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,6302 < \alpha < 0,6321$ :  $\Delta\alpha = 0,0019$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ .

Точечной оценкой нечеткого выхода  $\tilde{E}_2$  будет

$$F(\tilde{E}_2) = \frac{1}{0,6321} \int_0^{0,6321} M(E_{2\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,4302 + 0,55 \cdot 0,0494 + 0,5 \cdot 0,0506 + 0,55 \cdot 0,0494 + 0,5 \cdot 0,0506 + 0,55 \cdot 0,0019) = 0,5080.$$

Аналогичными действиями устанавливаем точечные оценки и для остальных выходов:

- при уровне производительности сети  $u_3$  —  $F(\tilde{E}_3) = 0,3161$ ;

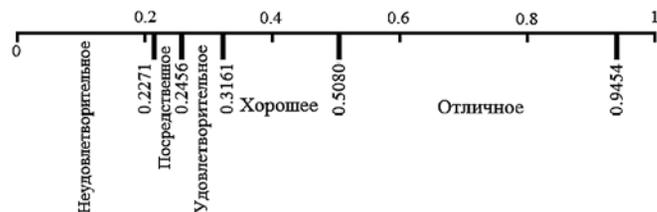


Рис. 4. Шкала градации качества услуг связи

- при уровне производительности сети  $u_4$  —  $F(\tilde{E}_4) = 0,2456$ ;
- при уровне производительности сети  $u_5$  —  $F(\tilde{E}_5) = 0,2271$ .

Таким образом, в принятых допущениях итоговая шкала для оценки качества IP-телефонии может выглядеть так, как это показано на рис. 4.

По существу, значение 0,2271, являющееся наименьшим дефазсифицированным выходом нечеткой модели многокритериальной оценки качества IP-телефонии, как верхняя граница соответствует консолидированной неудовлетворительной оценке пользователей сети. Аналогичным образом имеется в виду, что с точки зрения потребителей услуг IP-телефонии дефазсифицированный выход:

- 0,2456 — верхняя граница посредственной оценки;
- 0,3161 — верхняя граница удовлетворительной оценки;
- 0,5080 — верхняя граница хорошей оценки;
- 0,9454 — верхняя граница отличной оценки.

### Система оценки качества услуг связи и ее анализ (на примере IP-телефонии)

Теперь, после того как мы установили обоснованную шкалу для классификации качества услуг связи, рассмотрим, собственно, саму нечеткую модель для оценки качества услуг связи. Для этого воспользуемся следующими достаточно тривиальными импликативными правилами.

1. Если задержка в передаче слишком низкая, и джиттер слишком низкий, и вероятность потерь слишком низкая, и вероятность ошибки слишком низкая, то качество IP-телефонии отличное.

2. Если задержка в передаче низкая, и джиттер низкий, и вероятность потерь низкая, и вероятность ошибки низкая, то качество IP-телефонии хорошее;

3. Если задержка в передаче достаточно низкая, и джиттер достаточно низкий, и вероятность потерь достаточно низкая, и вероятность ошибки достаточно низкая, то качество IP-телефонии удовлетворительное.

4. Если задержка в передаче существенная, и джиттер существенный, и вероятность потерь существенная, и вероятность ошибки существенная, то качество IP-телефонии посредственное.

5. Если задержка в передаче высокая, и джиттер высокий, и вероятность потерь высокая, и вероят-

ность ошибки высокая, то качество IP-телефонии неудовлетворительное.

В качестве входных характеристик здесь используются пять оценочных понятий, которые являются терминами лингвистических переменных — параметров производительности сети. Используя диапазоны численных значений параметров про-

изводительности сети (см. таблицу), реализуем данные правила в нотации MATLAB/Fuzzy Sets Toolbox. Здесь выходной характеристикой является лингвистическая переменная "качество услуги связи", которая принимает пять нечетких значений (термов), формализуемых с помощью гауссовских функций принадлежности с вершинами соответственно в точках: 0,2271, 0,2456, 0,3161, 0,5080 и 0,9454.

Итак, после задания входных и выходных характеристик нечеткой модели в виде гауссовских функций принадлежности и нечетких импликативных правил приступим к анализу работы построенной системы. Реализация правил в нотации MATLAB/Fuzzy Sets Toolbox наглядно демонстрирует, что консолидированный уровень качества сети при гипотетически наилучших значениях параметров ее производительности не превышает значения 0,837 (рис. 5).

С увеличением задержек IP-пакетов до 376 мс уровень услуг падает до 0,417 (что согласно нашей градации соответствует хорошему качеству сети) и остается неизменным при дальнейшем их росте (рис. 6, а). При потере доли IP-пакета до  $10^{-3}$  качество услуг сети резко падает до значения 0,417 (рис. 6, б). Отметим также, что при данных сценариях качество услуг связи не меняется при увеличении уровня джиттера.

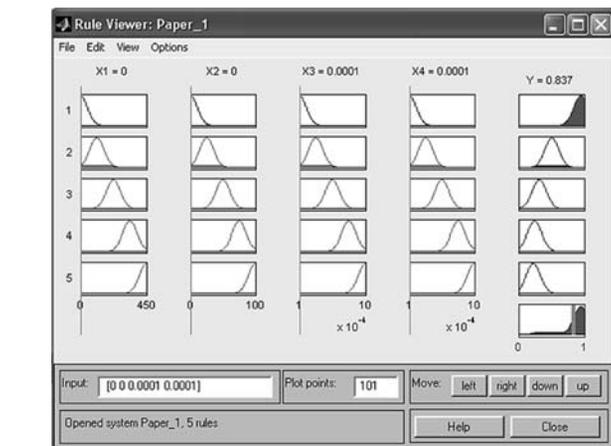


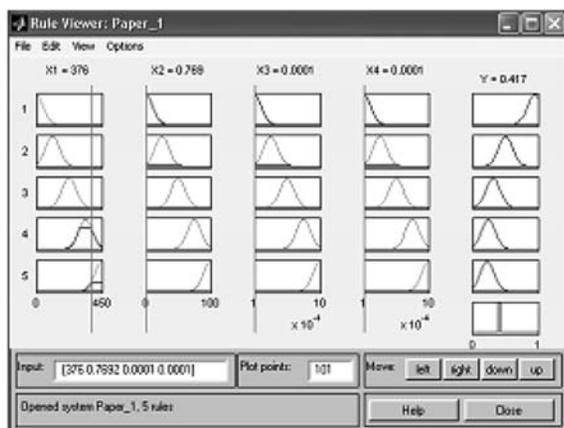
Рис. 5. Оценка качества услуг сети при наилучших значениях параметров производительности

## Заключение

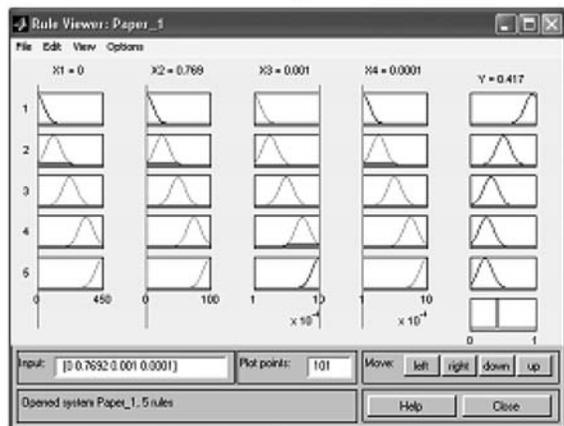
Как известно, нечеткая логика предоставляет возможность моделирования неопределенности естественного языка и позволяет вовлечь в вычислительный процесс неметризуемые субъективные категории, которыми, в частности, пользуются потребители при оценке предоставляемых им услуг [5, с. 25]. Применение нечеткой логики позволяет легко учитывать множество разнородных параметров для принятия решения и не требует сложных математических вычислений.

В данной работе посредством ограниченного набора непротиворечивых импликативных правил была получена относительно обоснованная шкала для градации консолидированных оценок пользователей IP-телефонии. Предлагаемая на этой основе система оценки качества IP-телефонии не отличается параметрической и структурной оптимизацией. Возможные неточности могут быть устранены за счет внедрения элемента самообучения системы на основе накопленных статистических данных. Тем не менее даже в таком "сыром" виде предлагаемая система может быть диверсифицирована на любые другие услуги связи и, тем самым, стать основой для создания модульной интеллектуальной системы оценки качества телекоммуникационных сетей связи (рис. 7).

Таким образом, нечеткая система оценки качества услуг телекоммуникационной сети связи способна автономно контролировать работу сети свя-



а)



б)

Рис. 6. Качества услуг IP-телефонии при двух экстремальных значениях параметров сети



Рис. 7. Интеллектуальная система оценки качества телекоммуникационных сетей связи

зи через субъективную консолидированную удовлетворенность клиентов уровнем предоставляемых им услуг. Данная система достаточно простая с точки зрения проектирования и легко может быть адаптирована под различные условия.

1. **Соколов Д.** Нечеткая система оценки качества // Технологии и средства связи. 2009. № 4. С. 26—28.
2. **International Telecommunication Union Recommendation.** URL: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asptype=series&lang=e&parent=T-REC> (дата обращения: 01.07.2014).
3. **Заде Л. А.** Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. М.: Знание, 1974. С. 5—49.
4. **Заде Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
5. **Заде Л. А.** Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных/интеллектуальных систем // Новости искусственного интеллекта. 2001. № 2—3. // Пер. с англ. И. З. Батыршина. URL: [http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol\\_mjagkikh\\_vychislenij.htm](http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol_mjagkikh_vychislenij.htm) (дата обращения: 03.07.2014).
6. **Рзаев Р. Р.** Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений. М.: Verlag: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 130 с.

**R. R. Rzayev**, Dr. Sc. (Tech.), Professor, [raminrza@yahoo.com](mailto:raminrza@yahoo.com),  
**A. I. Goyushov**, Post-Graduate Student, [geyushev@hotmail.com](mailto:geyushev@hotmail.com),  
**A. Ш. Алмасов**, Post-Graduate Student, [askalmasov@gmail.com](mailto:askalmasov@gmail.com),

Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan, AZ 1141

## Estimation of the Telecommunication Services Quality on the Base of the Fuzzy Modeling Method

*At the present stage of development of telecommunication and wireless communications technologies improving the quality of telecommunication services is most nagging problem. Telecom services is constantly being improved by increasing the speed of data transmission, greater mobility of users, expanding the range of services, improving the utilization of radio frequency spectrum and the degree of network equipment intellectuality and subscriber gadgets. At the same time, improving the telecommunication links occurs at the junction of contradiction between the evergrowing consumer demand for subscription services and the limited number of frequencies that is completely objective. In turn, this causes a significant expansion of the range of services provided by the Capcom, increasing consumer demands for services quality and, as a result, improvement of existing control technologies. The main goal is the creation of the intelligent system of quality assessment and control of telecommunication services on the base of fuzzy inference system.*

*An approach to generation of modular intellectual system of the estimation of the telecommunication services qualities based on application of the fuzzy logical conclusion method is offered. The basic fuzzy estimation model offered within this approach in a necessary measure considers recommendations of the International Telecommunication Union in the part concerning functioning of networks of package switching on the base of the IP-protocol.*

*Developed system of quality assessment and control of telecommunication services is able to control the consolidated level of subjective satisfaction of users of telecommunications services through the correction of the network parameters and, thus, ensure effective decision making to increase the customer base. In the future, this system is able to operate in off-line mode, as during its development and adaptation it is not necessary to use heuristic knowledge and involve an expensive expert knowledge.*

**Keyword:** IP-telephony, quality of communication, performance parameter of the communication network, fuzzy set, fuzzy implication, fuzzy relation

### References

1. **Sokolov D.** Nечetkaja sistema ocenki kachestva // Tehnologii i sredstva svyazi. 2009. N. 4. P. 26—28.
2. **International Telecommunication Union Recommendation.** URL: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asptype=series&lang=e&parent=T-REC> (date of appeal to: 01.07.2014).
3. **Zade L. A.** Osnovy novogo podhoda k analizu slozhnyh sistem i prosovov prinyatiya resheniy. *Matematika segodnya*. M.: Znanie, 1974. P. 5—49.
4. **Zade L. A.** Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh resheniy. M.: Mir, 1976. 165 p.
5. **Zade L. A.** Rol myagkikh vychisleniy i nechyotkoy logiki v ponimanii, konstruirovanii i razvitii informatsionnyh. *Intellektualnyh sistem. Novosti Iskusstvennogo Intellekta*. 2001. N. 2—3. Trans From eng. by I. Z. Batyrrshina. URL: [http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol\\_mjagkikh\\_vychislenij.htm](http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol_mjagkikh_vychislenij.htm) (date of appeal to: 03.07.2014).
6. **Rzaev R. R.** Intellektualniy analiz dannyh v sistemah podderzhki prinyatiya resheniy. Verlag: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 130 p.