

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УСЛУГ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В ЛОГИЧЕСКОМ БАЗИСЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

\*Институт систем управления НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

---

**Анотація.** Розглянуто підхід до оцінки якості послуг телекомунікаційних мереж зв'язку, заснований на застосуванні системи нечіткого логічного висновку, реалізованої в логічному базисі feedforward нейронної мережі. Пропонована в рамках даного підходу базова нечітка модель оцінки в необхідній мірі враховує рекомендації Міжнародного Союзу Електрозв'язку в частині, що стосується функціонування мереж пакетної комутації на основі IP-протоколу.

**Ключові слова:** IP-телефонія, якість зв'язку, параметр продуктивності мережі зв'язку, нечітка множина, нечітке відношення.

**Аннотация.** Рассмотрен подход к оценке качества услуг телекоммуникационных сетей связи, основанный на применении системы нечёткого логического вывода, реализованной в логическом базисе feedforward нейронной сети. Предлагаемая в рамках данного подхода базовая нечёткая 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, нечёткое множество, нечёткое отношение.

**Abstract.** It is offered an approach to the estimation of the telecommunication service qualities based on application of the fuzzy inferences realized into the logic basis of feedforward of neural network. 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.

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

### 1. Введение

На современном этапе развития телекоммуникационных сетей связи наиболее остро стоит задача повышения качества услуг связи, которая постоянно обновляется 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 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 сетевого управления. Поэтому создание гибкой и автономной системы оценки качества телекоммуникационных услуг связи является весьма актуальной и востребованной задачей.

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 системы нечеткого вывода в сетевом управлении когнитивными системами связи позволяет относительно легко учитывать

множество параметров для принятия решения и не требует сложных математических расчётов [3]. Более того, элементы нечёткой логики в сочетании с нейронными сетями позволяют одинаково легко оперировать как метризуемыми, так и неметризуемыми данными.

## 2. Постановка задачи

Субъективные оценки пользователей качества 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 операторам связи необходимо оценить субъективную удовлетворенность клиентов. С учётом мультисервисности современных телекоммуникационных сетей связи необходимо решить эту задачу для всего спектра услуг связи в рамках создания единой системы оценки качества, обрабатывающей как объективные (структурированные), так и субъективные (слабоструктурированные) показатели качества.

## 3. Многокритериальная оценка качества услуг связи в условиях нечеткой среды

Для установления уровня услуг связи в ряде рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ) [1] для широко распространенных сетей пакетной коммутации на основе IP-протоколов (IPv4 и IPv6) предлагается контролировать конкретные объективные показатели качества, которые однозначно интерпретируются и адекватно отражают качество услуг связи. 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 приводятся численные значения параметров производительности сети, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. 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
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	$1 \times 10^{-3}$	U				
Вероятность ошибки (IPER – IP packet Error Ratio)	Верхняя граница вероятности ошибки в передаче IP-пакета	$1 \times 10^{-4}$					U

U – Неустановленный

Как пример услуги связи рассмотрим телефонную связь по протоколу IP (IP-телефонию), которая является приложением более общей технологии VoIP (Voice over IP) для передачи голоса. Согласно рекомендации Y.1541, IP-телефония может функционировать при наличии параметров производительности, соответствующих классам 0 и/или 1 [2]. 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 счёт внедрения дополнительных опций, чтобы продолжать расширять клиентскую базу. В остальных случаях качество связи будет слишком низким.

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  $C = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$  будем понимать совокупность признаков, по которым классифицируется качество услуг связи. Тогда, полагая технические характеристики сети (критерии оценки качества) нечёткими множествами [4, 5], оценку предоставляемых услуг IP-телефонии произведём с использованием достаточного набора нечётких имплицативных правил вида «Если ..., тогда ...» и на их основе установим соответствующую шкалу градации удовлетворенности потребителей услуг. 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 вышеперечисленным 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 существенный разброс 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 не удовлетворительное».

В приведённых высказываниях, формулирующих причинно-следственные связи, входными характеристиками являются:  $X_1$  – 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 – оценка качества услуги связи  $Y$ , определяемая консолидированным уровнем удовлетворенности потребителя. Тогда, определив соответствующие значения (термы) лингвистических переменных  $X_i (i = 1 \div 4)$  и  $Y$ , на базе приведённых высказываний построим следующие имплицативные правила:

- $e_1$ : «Если  $X_1$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$ =УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ»;
- $e_2$ : «Если  $X_1$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$ =БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ»;
- $e_3$ : «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 УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ»;
- $e_5$ : «Если  $X_1$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$ =НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$ =ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$ =УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ»;

$e_6$ : «Если  $X_3$ =ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$ =ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$ =НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ».

Задавая лингвистическую переменную  $Y$  на дискретном множестве  $J=\{0; 0.1; 0.2; \dots; 1\}$ , для всех  $x \in J$  опишем её термы в виде следующих нечётких множеств [6]:  $S$ =УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_S(x) = x$ ;  $MS$ =БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{MS}(x) = \sqrt{x}$ ;

$P$ =БЕЗУПРЕЧНОЕ,  $\mu_P(x) = \begin{cases} 1, & x=1, \\ 0, & x < 1, \end{cases}$   $VS$ =ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{VS}(x) = x^2$ ;

$US$ =НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{US}(x) = 1 - x$ . А 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 нечёткие множества по опорному вектору  $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ , где  $u_i = (d_{i-1} + d_i) / 2$  ( $i = 1 \div 5$ ) – интервалы, интерпретирующие признаки классификации в воображаемой градации услуг связи<sup>1</sup>. При этом значения для  $\sigma_k$  подбираются исходя из степени важности признаков, по которым классифицируется качество услуг связи.

Очевидно, что простым преобразованием  $t = (x - d_0) / (d_5 - d_0)$ , где  $x \in [d_0, d_5]$ ,  $t \in [0, 1]$ , заявленный интервал  $[d_0, d_5]$  можно легко свести к единичному отрезку  $[0, 1]$ . Поэтому, оценивая качество услуг связи с точки зрения ее технических характеристик, градуированных в масштабе единичного интервала (рис. 1), где  $d_i = 0, 2i$  ( $i = 0 \div 5$ ), фаззифицируем термы из левых частей импликативных правил в следующем виде:

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

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

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета):  $B = \frac{0,9518}{u_1} + \frac{0,6412}{u_2} + \frac{0,2910}{u_3} + \frac{0,0889}{u_4} + \frac{0,0183}{u_5};$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (потеря IP-пакета):  $C = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (ошибка при передаче пакета):

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

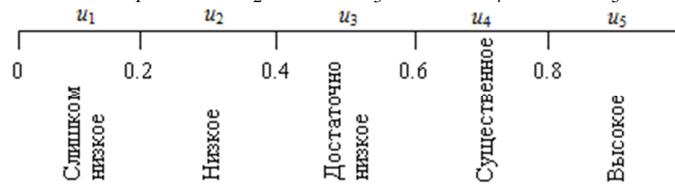


Рис. 1. Уровни значений параметров производительности сети в масштабе единичного отрезка

С учётом введенных формализмов нечёткие правила сформулируем как:

$e_1$ : «Если  $X_1=A$  и  $X_2=B$ , то  $Y=S$ »;  $e_2$ : «Если  $X_1=A$  и  $X_2=B$  и  $X_3=C$ , то  $Y=MS$ »;

$e_3$ : «Если  $X_1=A$  и  $X_2=B$  и  $X_3=C$  и  $X_4=D$ , то  $Y=P$ »;  $e_4$ : «Если  $X_2=B$  и  $X_3=C$  и  $X_4=D$ , то  $Y=VS$ »;

$e_5$ : «Если  $X_1=A$  и  $X_3=C$  и  $X_4=\neg D$ , то  $Y=S$ »;  $e_6$ : «Если  $X_3=\neg C$  и  $X_4=\neg D$ , то  $Y=US$ ».

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

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

$$\begin{aligned}
e_1: \mu_{M_1}(u) &= \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}, M_1 = \frac{0,9394}{u_1} + \frac{0,5698}{u_2} + \frac{0,2096}{u_3} + \frac{0,0468}{u_4} + \frac{0,0063}{u_5}; \\
e_2: \mu_{M_2}(u) &= \min\{\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u)\}, M_2 = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5}; \\
e_3: \mu_{M_3}(u) &= \min\{\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u), \mu_D(u)\}, M_3 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5}; \\
e_4: \mu_{M_4}(u) &= \min\{\mu_B(u), \mu_C(u), \mu_D(u)\}, M_4 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5}; \\
e_5: \mu_{M_5}(u) &= \min\{\mu_A(u), \mu_C(u), 1 - \mu_D(u)\}, M_5 = \frac{0,1052}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5}; \\
e_6: \mu_{M_6}(u) &= \min\{1 - \mu_C(u), 1 - \mu_D(u)\}, M_6 = \frac{0,0784}{u_1} + \frac{0,5203}{u_2} + \frac{0,8701}{u_3} + \frac{0,9817}{u_4} + \frac{0,9987}{u_5}.
\end{aligned}$$

В итоге правила можно записать в ещё более компактной форме:

$$\begin{aligned}
e_1: & \text{«Если } X=M_1, \text{ то } Y=S\text{»}; \quad e_2: \text{«Если } X=M_2, \text{ то } Y=MS\text{»}; \quad e_3: \text{«Если } X=M_3, \text{ то } Y=P\text{»}; \\
e_4: & \text{«Если } X=M_4, \text{ то } Y=VS\text{»}; \quad e_5: \text{«Если } X=M_5, \text{ то } Y=S\text{»}; \quad e_6: \text{«Если } X=M_6, \text{ то } Y=US\text{»}.
\end{aligned}$$

Для преобразования этих правил воспользуемся импликацией Лукасевича [6]:  $\mu_H(u, j) = \min\{1, 1 - \mu_M(w) + \mu_Y(j)\}$ . Тогда, установив для каждой пары  $(u, j) \in U \times Y$  соответствующие нечёткие отношения  $R_i$  ( $i = 1 \div 6$ ), общее функциональное решение получим в виде пересечения  $R = \bigcap_{i=1}^6 R_i$ , отражающее причинно-следственную связь между параметрами производительности сети и качеством предоставляемых ею услуг:

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$u_1$	0.0606	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.9216
$u_2$	0.4302	0.5302	0.6302	0.6321	0.6321	0.6321	0.6321	0.6321	0.6321	0.5797	0.4797
$u_3$	0.7904	0.8904	0.9299	0.8299	0.7299	0.6299	0.5299	0.4299	0.3299	0.2299	0.1299
$u_4$	0.9532	0.9183	0.8183	0.7183	0.6183	0.5183	0.4183	0.3183	0.2183	0.1183	0.0183
$u_5$	0.9937	0.9013	0.8013	0.7013	0.6013	0.5013	0.4013	0.3013	0.2013	0.1013	0.0013

Далее, для определения уровня качества услуг связи применим правило композиционного вывода в нечёткой среде:  $E_k = G_k \circ R$ , где  $E_k$  – качество услуг связи  $k$ -го уровня,  $G_k$  – отображение  $k$ -го уровня параметров производительности в виде нечёткого подмножества. Тогда, выбирая композиционное правило в виде:  $\mu_{E_k}(j) = \max_u \{\min(\mu_{G_k}(u), \mu_R(u))\}$ ,

и, полагая, что  $\mu_{G_k}(u) = \begin{cases} 0, & u \neq u_k, \\ 1, & u = u_k, \end{cases}$  в итоге имеем:  $\mu_{E_k}(j) = \mu_R(u_k, j)$ , то есть  $E_k$  есть  $k$ -я

строка матрицы  $R$ .

Теперь для классификации качества услуг применим процедуру дефаззификации нечётких выходов применённой модели. Итак, для оценочного понятия производительности сети  $u_1$  нечёткой интерпретацией соответствующего ему уровня качества услуг связи будет нечёткое множество:

$$E_1 = \frac{0,0606}{0} + \frac{0,1052}{0,1} + \frac{0,1052}{0,2} + \frac{0,1052}{0,3} + \frac{0,1052}{0,4} + \frac{0,1052}{0,5} + \frac{0,1052}{0,6} + \frac{0,1052}{0,7} + \frac{0,1052}{0,8} + \frac{0,1052}{0,9} + \frac{0,9216}{1,0}.$$

Установим уровневые множества  $E_{1\alpha}$  и вычислим соответствующие им мощности

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

- 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  $0,1052 < \alpha < 0,9216$ :  $\Delta\alpha = 0,8164$ ,  $E_{1\alpha} = \{1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 1$ .

Тогда точечную оценку нечёткого выхода  $E_1$  определим по формуле

$$F(E_k) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(E_{k\alpha}) d\alpha, \text{ где } \alpha_{\max} - \text{максимальное значение на } E_k \text{ (} k = 1 \div 5 \text{) [6],}$$

следующим образом:

$$F(E_1) = \frac{1}{0,9987} \int_0^{0,9987} M(E_{1\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,0606 + 0,55 \cdot 0,0446 + 1 \cdot 0,8164) = 0,9454.$$

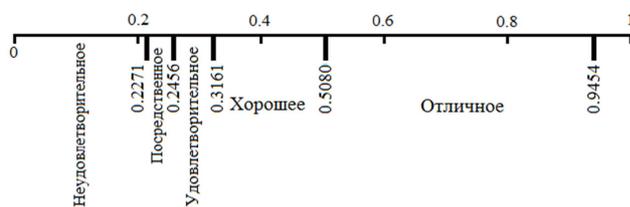


Рис. 2. Шкала градации качества услуг связи

Аналогичными действиями устанавливаем точечные оценки и для остальных выходов: при уровне производительности сети  $u_2 - F(E_2) = 0,5080$ ; при уровне  $u_3 - F(E_3) = 0,3161$ ; при уровне  $u_4 - F(E_4) = 0,2456$ ; при уровне  $u_5 - F(E_5) = 0,2271$ . Тогда, в принятых допущениях итоговая шкала для оценки качества IP-телефонии может выглядеть

так, как это показано на рис. 2.

По существу, значение 0,2271, являющееся наименьшим дефаззифицированным выходом нечёткой 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 дефаззифицированный выход 0,2456 является верхней границей посредственной оценки; 0,3161 является верхней границей удовлетворительной оценки; 0,5080 является верхней границей хорошей оценки; 0,9454 является верхней границей отличной оценки.

#### 4. Симуляция оценки качества связи в нотации пакета MATLAB (на примере VoIP)

Основная цель симулятора, как известно, состоит в проведении имитации, демонстрации построения (включая процесс обучения) и функционирования исследуемой системы. В нашем случае симулятор имитирует нечеткую логическую систему оценки качества (НЛСОК) телекоммуникационных услуг (ТУ) в логическом базисе feedforward пятислойной нейронной сети. НЛСОК, обладая способностью к обучению через обучающие примеры, призвана функционировать в автономном режиме. Основной целью является демонстрация способности НЛСОК оценивать работу сети связи (например, IP-телефонии) на базе существующей статистики субъективных данных об удовлетворённости клиентов уровнем предоставляемых им ТУ. Как и в предыдущем случае, в качестве критериев оценки выберем описанные в табл. 1 параметры производительности сети IP-телефонии, с помощью которых контролируются объективные показатели качества услуг связи. В предыдущем разделе установлены причинно-следственные связи, показывающие, как эти параметры трансформируются в субъективные суждения потребителей, в их субъективные критерии оценки: наличие (или отсутствие) прерываний связи; недостаточно (или достаточно) хорошая слышимость; приемлемая (или неприемлемая) разборчивость речи» и т.д.,

и, тем самым, классифицированы качества предоставляемых услуг связи по степеням удовлетворённости пользователей сети.

Предлагаемая нами симуляция преследует две цели. Первая – это показать, что предлагаемая НЛСОК может имитировать нечеткую логическую систему (НЛС) оценки только на основе использования множества исторических входных-выходных данных, полученных на основе изучения степеней удовлетворенности пользователей IP-телефонии. Вторая цель состоит в том, чтобы показать преимущество предлагаемой НЛСОК над традиционными НЛС оценки с точки зрения присущей ей способности к обучению (то есть возможности оптимизации входных-выходных функций принадлежности и имплекативных правил).

Из табл. 1 видно, что для обеспечения самого высокого класса обслуживания (0) необходимо обеспечить низкую задержку в передаче IP-пакета, низкий джиттер и низкие вероятности потерь и ошибок. Для обеспечения обслуживания по классу 1 допустимый диапазон задержки может быть увеличен до средних значений. В контексте этих рассуждений сформируем базовый набор переменных и правил для построения системы нечёткого вывода. Для удобства все переменные упорядочим в виде табл. 2.

Таблица 2. Переменные системы нечёткого вывода в рамках НЛСОК

Входные лингвистические переменные	$x_1$	Имя переменной	Задержка в передаче
		Терм-множество	Низкая, средняя, высокая
		Диапазон значений	[0, 450]
	$x_2$	Имя переменной	Джиттер
		Терм-множество	Низкий, высокий
		Диапазон значений	[0, 90]
	$x_3$	Имя переменной	Вероятность потери
		Терм-множество	Низкая, высокая
		Диапазон значений	[0, 0.0015]
	$x_4$	Имя переменной	Вероятность ошибки
		Терм-множество	Низкая, высокая
		Диапазон значений	[0, 0,00015]
Выходная переменная	$y$	Имя переменной	Качество услуг IP-телефонии
		Терм-множество	Низкое, среднее, высокое
		Диапазон значений	[0, 1]

Итак, причинно-следственную связь между входными и выходными характеристиками модели построим в виде следующих правил [2]:

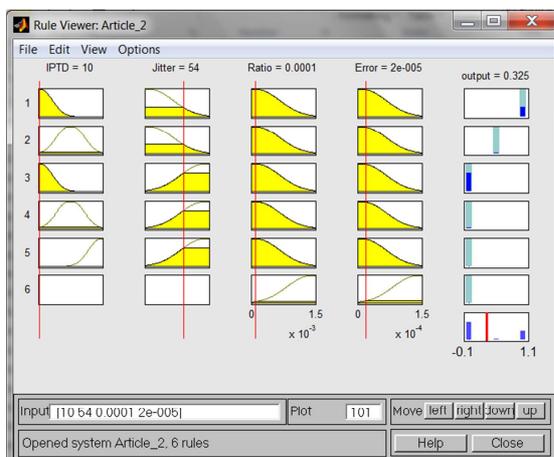


Рис. 3. Реализация правил с помощью FIS-редактора пакета MATLAB

$d_1$ : «Если задержка в передаче IP-пакета низкая и джиттер низкий и вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета низкие, тогда качество IP-телефонии высокое»;

$d_2$ : «Если задержка в передаче IP-пакета средняя и джиттер низкий и вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета низкие, тогда качество IP-телефонии среднее»;

$d_3$ : «Если задержка в передаче IP-пакета низкая и джиттер высокий и вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета низкие, тогда качество IP-телефонии низкое»;

- $d_4$ : «Если задержка в передаче IP-пакета СРЕДНЯЯ и джиттер ВЫСОКИЙ и вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета НИЗКИЕ, тогда качество IP-телефонии НИЗКОЕ»;
- $d_5$ : «Если задержка в передаче IP-пакета ВЫСОКАЯ и джиттер ВЫСОКИЙ и вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета НИЗКИЕ, тогда качество IP-телефонии НИЗКОЕ»;
- $d_6$ : «Если вероятности потери и ошибки при передаче IP-пакета ВЫСОКИЕ, тогда качество IP-телефонии НИЗКОЕ».

Реализовав эти правила в нотации MATLAB с помощью FIS-редактора типа Сугэно [7] (рис. 3), в результате сформируем выборку обучающих пар (табл. 3).

Таблица 3. Набор входных-выходных данных для обучения НЛСОК

Задержка в передаче IP-пакета ( $x_1$ )	Джиттер ( $x_2$ )	Входы		Выход
		Вероятность потери IP-пакета ( $x_3$ )	Вероятность ошибки в передаче IP-пакета ( $x_4$ )	Качество IP-телефонии
406	39	0,0015	0,00006	0,00209
100	59	0,0002	0,00004	0,19900
10	54	0,0001	0,00002	0,32500
90	51	0,0015	0,00002	0,09020
207	18	0,0012	0,00013	0,00516
439	33	0,0007	0,00002	0,04000
141	69	0,0010	0,00011	0,00564
372	49	0,0006	0,00005	0,06500
135	83	0,0004	0,00001	0,03350
129	74	0,0001	0,00001	0,06630
36	21	0,0000	0,00005	0,82000
22	77	0,0003	0,00010	0,05640
178	25	0,0005	0,00002	0,45000
360	73	0,0002	0,00012	0,01150
103	44	0,0010	0,00014	0,00626
50	21	0,0008	0,00011	0,12400
416	5	0,0014	0,00011	0,00043
100	84	0,0010	0,00001	0,03260
17	55	0,0003	0,00011	0,19400
46	60	0,0003	0,00005	0,21800
409	73	0,0009	0,00005	0,00356
368	17	0,0001	0,00004	0,34600
26	74	0,0009	0,00013	0,00406
65	6	0,0012	0,00011	0,02310
102	41	0,0005	0,00004	0,42900
87	68	0,0003	0,00007	0,11200
312	37	0,0011	0,00006	0,06900
4	53	0,0001	0,00004	0,34200
290	48	0,0004	0,00011	0,09680
281	3	0,0012	0,00007	0,06270
102	42	0,0012	0,00008	0,04000
163	50	0,0000	0,00008	0,22900
314	22	0,0002	0,00001	0,39800
180	3	0,0002	0,00006	0,51700
227	67	0,0003	0,00002	0,07690
368	34	0,0001	0,00013	0,08990
143	13	0,0009	0,00006	0,31000
391	44	0,0010	0,00006	0,02040
64	53	0,0007	0,00010	0,09490
93	30	0,0002	0,00000	0,62400
281	25	0,0004	0,00003	0,39100
113	38	0,0008	0,00011	0,06480
361	71	0,0012	0,00001	0,01520
363	26	0,0015	0,00000	0,09280
147	39	0,0004	0,00002	0,38000
53	3	0,0001	0,00013	0,57300
29	79	0,0014	0,00004	0,01460
411	84	0,0010	0,00013	0,00006

178	64	0,0001	0,00008	0,09920
105	16	0,0009	0,00000	0,66700

Загрузив сформированное обучающее множество в редактор ANFIS типа Сугэно, внешний вид которого с загруженными обучающими данными изображен на рис. 4, была произведена генерация структуры системы нечёткого вывода FIS типа Сугэно, которая является моделью гибридной сети в пакете MATLAB. Для этого через диалоговое окно активированы гауссовские функции принадлежности для описания выбранных термов входных переменных и выходной переменной (табл. 2). После генерации структуры гибридной сети визуализирована структура НЛСОК в нотации пятислойной нейронной сети (рис. 4).

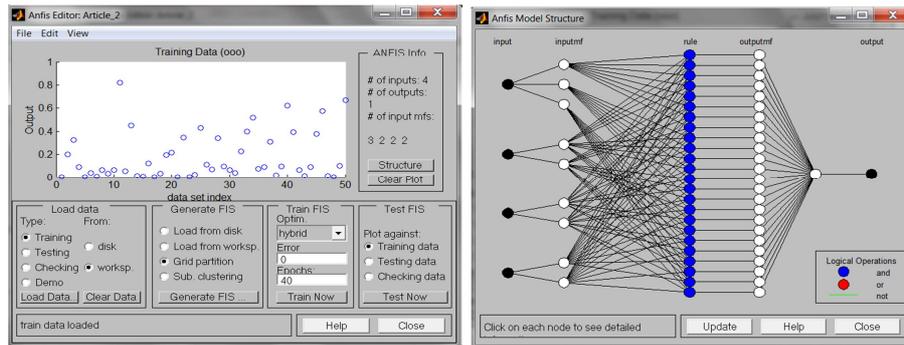


Рис. 4. Графический интерфейс редактора ANFIS после загрузки данных

Для рассматриваемого примера система нечёткого вывода в нейросетевом логическом базисе содержит 4 входные переменные с тремя термами у первой переменной и двумя у остальных, 24 импликативных правила, одну выходную переменную с 24-мя термами. В качестве супервизорного метода обучения был выбран гибридный метод, представляющий собой комбинацию метода наименьших квадратов и метода убывания обратного градиента. Дальнейшая настройка параметров построенной и обученной НЛСОК осуществлена с помощью стандартных графических средств пакета Fuzzy Logic Toolbox. Так, на рис. 5 представлены оптимизированные функции принадлежности, описывающие термы входных лингвистических переменных.

На рис. 6 представлены графический интерфейс просмотра правил сгенерированной системы нечёткого вывода и фрагмент оптимального набора базовых правил.

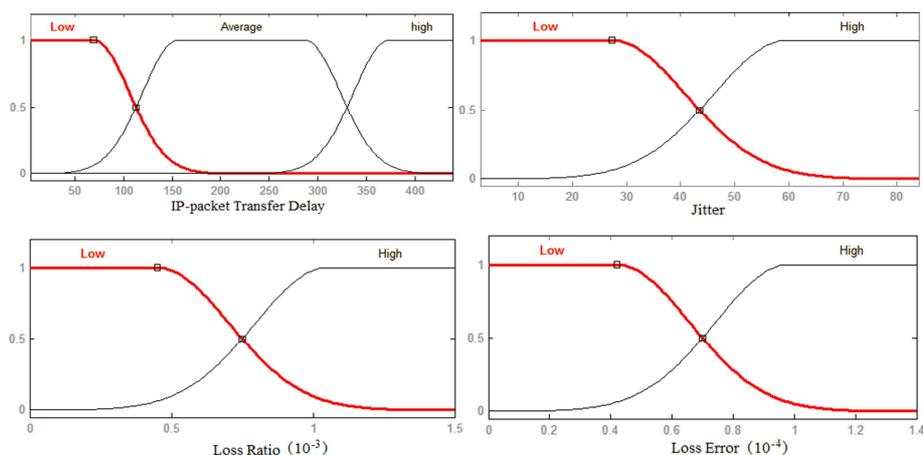


Рис. 5. Оптимизированные входные функции принадлежности

В табл. 4 перечислены «обученные» нечёткие импликативные правила в несколько упрощённом виде. Например, правило 1, выделенное на рис. 7, интерпретируется как «ЕСЛИ  $x_1$  является НИЗКОЕ (то есть терм 1) и  $x_2$  является НИЗКИМ (то есть терм 1) и  $x_3$

является НИЗКАЯ (то есть терм 1) и  $x_4$  является НИЗКАЯ (то есть терм 1), ТОГДА  $y$  является ОЧЕНЬ ВЫСОКОЕ (то есть терм 5)».

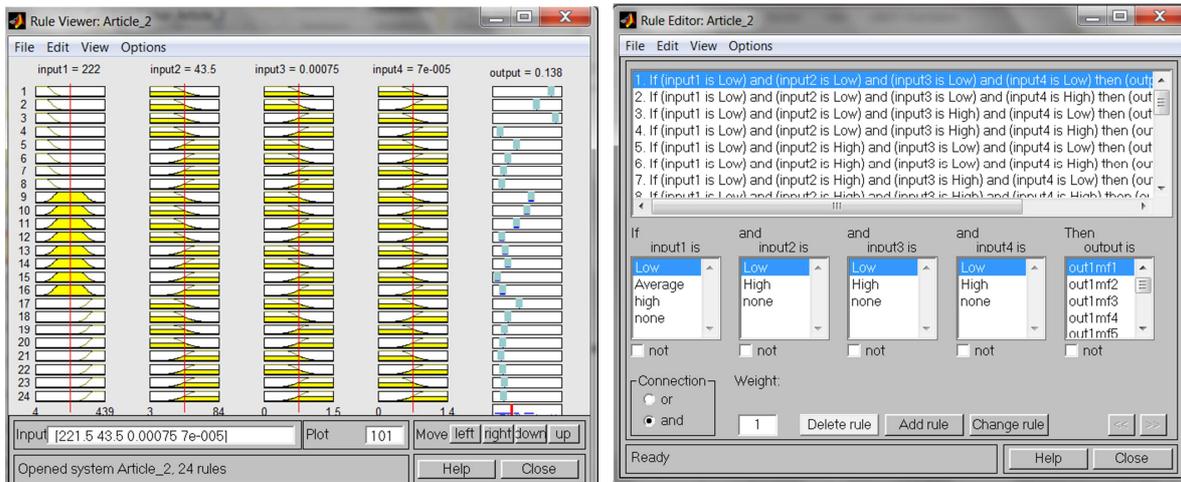


Рис. 6. Графический интерфейс просмотра правил сгенерированной НЛС и фрагмент оптимального набора базовых правил

Таблица 4. Обученные по гибриднему алгоритму логические правила

Обученные нечёткие импликативные правила											
Правило	Причина				Следствие	Правило	Причина				Следствие
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$			$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
1	1	1	1	1	5 (ОЧЕНЬ ВЫСОКОЕ)	13	2	2	1	1	2 (НИЗКОЕ)
2	1	1	1	2	4 (ВЫСОКОЕ)	14	2	2	1	2	2 (НИЗКОЕ)
3	1	1	2	1	5 (ОЧЕНЬ ВЫСОКОЕ)	15	2	2	2	1	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)
4	1	1	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)	16	2	2	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)
5	1	2	1	1	3 (ПРИЕМЛЕМОЕ)	17	3	1	1	1	3 (ПРИЕМЛЕМОЕ)
6	1	2	1	2	2 (НИЗКОЕ)	18	3	1	1	2	2 (НИЗКОЕ)
7	1	2	2	1	2 (НИЗКОЕ)	19	3	1	2	1	2 (НИЗКОЕ)
8	1	2	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)	20	3	1	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)
9	2	1	1	1	4 (ВЫСОКОЕ)	21	3	2	1	1	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)
10	2	1	1	2	4 (ВЫСОКОЕ)	22	3	2	1	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)
11	2	1	2	1	3 (ПРИЕМЛЕМОЕ)	23	3	2	2	1	2 (НИЗКОЕ)
12	2	1	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)	24	3	2	2	2	1 (ОЧЕНЬ НИЗКОЕ)

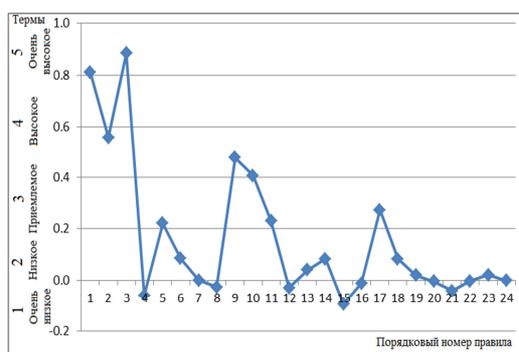


Рис. 7. Агрегированные параметры выходов адаптированной FIS типа Сугэно

На рис. 7 представлено распределение параметров выходов адаптированной FIS, собственно, на основе которого и были установлены 5 кластеров – термов для выходной переменной  $y$ .

Таким образом, в процессе симуляции удалось получить адекватную причинно-следственную связь между объективными параметрами производительности сети связи, с одной стороны, и субъективными консолидированными оценками пользователей, с другой (рис. 8).

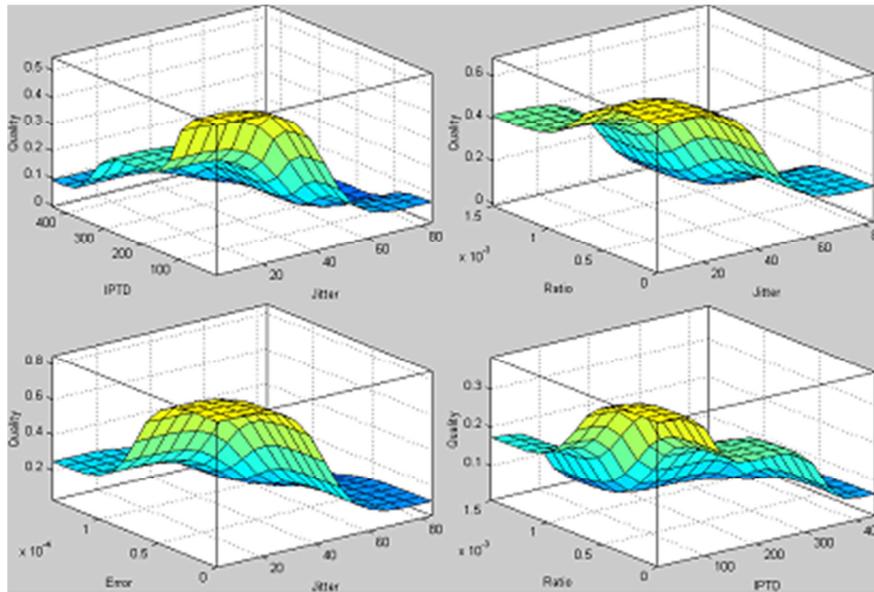


Рис. 8. Зависимость оценок качества сети связи от объективных показателей

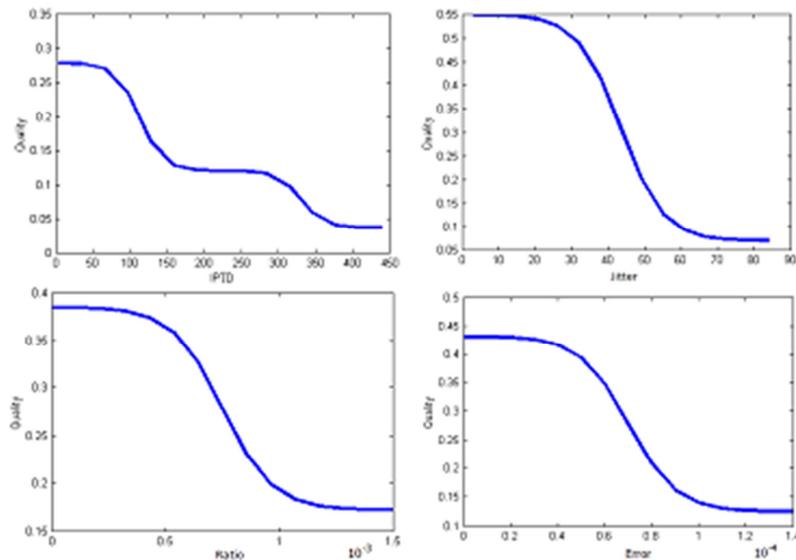


Рис. 9. Зависимости качества сети от ее параметров производительности

Общее качество IP-телефонии не превышает величину 0,55 при максимальной 1, относительно умеренно уменьшается с ростом задержек IP-пакетов и резко падает при превышении доли потерянных пакетов  $10^{-3}$  и превышении доли ошибок при передаче IP-пакетов  $10^{-4}$ . Задержка при передаче IP-пакетов более чем в 400 мс ведет к деградации качества даже при уровне джиттера 50 мс, что соответствует практическим наблюдениям для услуг IP-телефонии. На рис. 9 представлены кривые, которые, демонстрируя зависимости качества сети IP-телефонии от каждого из параметров, подтверждают приведенный выше вывод об изменениях в общем качестве сети IP-телефонии.

#### 4. Заключение

В статье посредством ограниченного набора непротиворечивых имплицитивных правил была получена относительно обоснованная шкала для градации консолидированных оценок пользователей IP-телефонии, на базе которой, собственно, и предлагается оценивать качества IP-телефонии.

Разработана нечёткая логическая система оценки качества телекоммуникационных услуг в нейросетевом логическом базисе, которая, благодаря своим способностям к структурному и параметрическому обучению, способна в будущем контролировать работу сети связи через субъективную консолидированную удовлетворенность клиентов уровнем предоставляемых им телекоммуникационных услуг. Структура предлагаемой системы формируется на основе доступных обучающих примеров посредством технологии нейронного обучения применительно к адаптации нечётких логических (импликативных) правил и к нахождению оптимальных входных и выходных функций принадлежности.

Предлагаемая система оценки качества телекоммуникационных услуг способна контролировать и при необходимости корректировать параметры сети связи с тем, чтобы обеспечивать оперативное принятие решений для увеличения клиентской базы. В перспективе данная система способна функционировать и в автономном режиме, так как при ее разработке и адаптации нет необходимости привлекать эвристические знания и дорогостоящие экспертные услуги. Предлагаемый подход к созданию системы оценки качества услуг связи позволяет достаточно быстро и относительно легко диверсифицировать полученные результаты и на другие виды услуг связи. Для этого необходимо собрать достаточную статистику консолидированных оценок пользователей по различным сценариям функционирования выбранной сети связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Telecommunication Union Recommendation (Электронный ресурс). – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asptype=series&lang=e&parent=T-REC>.
2. Соколов Д. Нечеткая система оценки качества / Д. Соколов // Технологии и средства связи. – 2009. – № 4. – С. 26 – 28.
3. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л.А. Заде // Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С. 5 – 49.
4. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Заде Л.А. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
5. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечёткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных/интеллектуальных систем [Электронный ресурс] / Л.А. Заде; пер. с англ. И.З. Батыршина // Новости искусственного интеллекта. – 2001. – № 2–3. – Режим доступа: [http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol\\_mjagkikh\\_vychislenij.htm](http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol_mjagkikh_vychislenij.htm).
6. Рзаев Р.Р. Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений / Рзаев Р.Р. – М.: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. – 130 с.
7. Industrial Applications of Fuzzy Control / Sugeno M. (ed.). – North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1985. – P. 231 – 239.

*Стаття надійшла до редакції 12.04.2016*