

# СЕТИ СВЯЗИ

## С МАЛЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ

**А. Е. Кучерявый,**

заместитель директора Северо-Западного филиала ОАО «Гипросвязь», заведующий кафедрой «Сети связи» СПб ГУТ, д.т.н.; akouch@mail.ru

**А. И. Пармонов,**

доцент кафедры «Сети связи» СПб ГУТ, к.т.н.

**Я. М. Аль-Наггар,**

аспирант кафедры «Сети связи» СПб ГУТ



**Ключевые слова:** сеть с малыми задержками, игры реального времени, услуги электронного здоровья, нечеткая логика.

**Введение.** Исторически построение сетей связи общего пользования (ССОП) ориентировалось на обслуживание трафика передачи речи. Это было естественным для гомогенной телефонной сети общего пользования (ТфОП), а для гетерогенной пакетной сети связи следующего поколения (NGN) передача речи стала приложением, к которому предъявлялись более жесткие условия по задержкам [1]. Так продолжалось до появления приложений, требующих меньших задержек, чем передача речи поверх IP. Эти приложения оказали существенное влияние на характеристики NGN. Авторы выделили их в новый класс сетей и назвали сетями с малыми задержками.

**Эволюция требований по качеству обслуживания (QoS — Quality of Service) в сетях связи.** Планирование аналоговых сетей ТфОП осуществлялось, в основном, на базе моделей с потерями с использованием для расчета формулы Эрланга [2, 3]. При этом допустимые потери из конца в конец, например для городских сетей, составляли менее 5%, а потери на ступенях искания нормировались в пределах  $(2-5) \cdot 10^{-3}$  [4]. Системы с ожиданием также применялись на аналоговых

ТфОП, но весьма редко, разве что на ступени абонентского искания для нормирования длительности ожидания сигнала «Ответ станции» [5]. Создание цифровых ТфОП с точки зрения нормирования параметров QoS не внесло новых принципиальных идей, поскольку сеть все равно оставалась гомогенной [6].

Появление концепции сетей NGN [7, 8, 9] привело не только к пакетизации ССОП, но и к тому, что сеть стала гетерогенной со множеством приложений, потребовавших к тому же дифференциации классов и параметров QoS [1]. Кроме того, уже в последние годы в дополнение к имеющейся метрике QoS добавилась еще одна — качество восприятия (QoE — Quality of Experience), определяющее субъективную оценку пользователем, например, качество видео [10]. Поскольку основное внимание в статье уделяется новому классу сетей — сетям с малыми задержками, то подробнее остановимся на характеристиках QoS, регламентируемых в Рек. У.1541 МСЭ-Т.

В табл. 1 приведены требования к параметрам QoS для различных классов обслуживания, предусмотренных в NGN. Наиболее жесткие требования к параметрам прописаны для нулевого класса обслуживания, используемого для передачи речи в реальном времени при расстояниях, не превосходящих наибольшие диаго-

Таблица 1. Классы и параметры QoS (У.1541)

Параметр QoS	0	1	2	3	4	5
IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1с	нет
IPDV	50 мс	50 мс	нет	нет	нет	нет
IPLR	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	нет
IPER	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	нет

нали США (Сиэтл — Дайтона Бич) и Европы (Москва — Лиссабон), т.е. не превышающих 4000—4500 тыс. км, что связано с длительностью распространения сигнала по каналам связи.

В табл. 1 IPTD (IP Time Delay) представляет собой задержку передачи пакетов, IPDV (IP Delay Variance) — вариацию задержки (джиттер), IPLR (IP Loss Ratio) — долю потерянных пакетов, IPER (IP Error Rate) — долю пакетов, переданных с ошибками. Таким образом, сети NGN планируются и проектируются исходя из предположения, что задержка не должна превышать 100 мс, а джиттер — 50 мс.

Следует отметить, что с требуемым малым значением джиттера достаточно успешно справляются с помощью так называемых буферов деджиттеризации, созданных на базе одной из модификаций классического метода Token Bucket (ведро жетонов). Метод позволяет задавать любую функцию для времени обслуживания поступающих пакетов [11]. Что касается требований к долям потерь пакетов и пакетов, переданных с ошибками, то сегодня выполнение норм, приведенных в табл. 1, не представляет больших сложностей. Итак, 100 мс — наиболее критичный параметр QoS в Рек. МСЭ-Т и созданных на их основе сетей NGN.

**Новые виды трафика и ужесточение требований к задержкам.** В табл. 2 представлены требования 3GPP [12] к задержкам и потерям для разных видов трафика, передаваемых с различными приоритетами в системах современной мобильной связи при внедрении пакетной мультимедий-

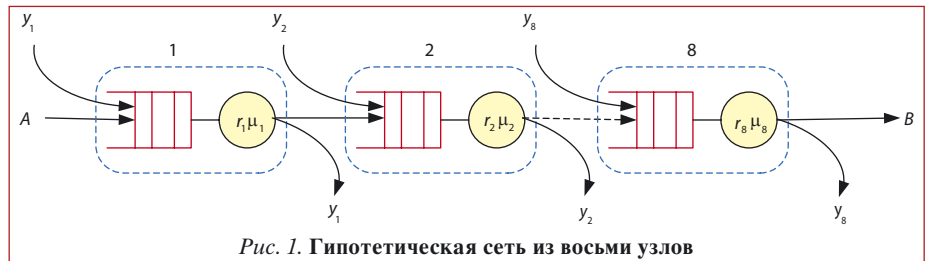


Рис. 1. Гипотетическая сеть из восьми узлов

ной подсистемы IMS (IP Multimedia Subsystem) [13]. Наиболее приоритетным является трафик управления соединениями — трафик сигнализации, далее следует трафик передачи речи и третьим приоритетом обладает трафик игр в реальном времени.

Представленная таблица рассчитана на использование в мобильных сетях связи систем длительной эволюции LTE (Long Term Evolution) [14, 15], в которых уже приняты меры по обеспечению длительности задержки, необходимой приложениям игр в реальном времени, т.е. 50 мс [16]. Это значение в два раза меньше, чем для передачи речи поверх IP, что требует существенного увеличения скорости доступа пользователя в сеть.

В соответствии с [16] эволюция задержек в системах, стандартизованных 3GPP, происходила следующим образом. В системе 3G, реализованной по стандартам 3GPP (1999 г.), задержка составляла 68 мс. Внедрение технологии высокоскоростного пакетного доступа HSPA (High Speed Packet Access) позволило снизить задержку в системах 3G до 51 мс, а при дальнейшей модификации этой технологии (до HSPA+) задержка стала менее 30 мс. Принципиальные изменения задержки в системах сотовой подвиж-

ной связи произошли при внедрении LTE. При обслуживании трафика по расписанию удалось добиться задержки в 20 мс, а при резервировании с предварительным распределением ресурсов — менее 15 мс. Однако изменение требований к задержкам для современных сетей связи только появлением услуги игр реального времени не исчерпываются.

В последнее время существенно возросло внимание к так называемым системам электронного здоровья (e-health) [17]. Система e-health представляет собой глобальный подход к информатизации медицины и медицинских услуг, предусматривающий использование современных сетей связи достаточно высокого уровня развития для предоставления услуг e-health. В настоящее время в качестве таких сетей рассматриваются сети M2M (Machine-to-Machine) [18].

В рамках работ МСЭ-Т по классам и параметрам QoS для сетей M2M при предоставлении услуг e-health [19] определены как новые классы обслуживания, так и их параметры (табл. 3). Среди параметров QoS для услуг e-health появляются требования к задержкам на уровне 10 мс. Следует отметить одну недоработку в табл. 3: в современных условиях очень сложно (практически и невозможно) обеспечить задержку в 10 мс даже в мегабитных сетях (будет доказано ниже).

**Гигабитные сети доступа.** Внедрение таких новых услуг, как игры в реальном времени и e-health, требует существенно меньших задержек, чем при передаче речи поверх IP. Рассмотрим, какие новые требования могут быть предъявлены к сетям связи с малыми задержками и как эти требования поддерживаются технологически в настоящее время.

На рис. 1 изображена гипотетическая сеть, состоящая из восьми узлов, что соответствует Рек. Y.1541, причем

Таблица 2. Требования к задержкам и потерям (3GPP, TS 23.203)

Приоритет	Задержки, мс	Потери	Приложения
1	100	$10^{-6}$	Сигнализация IMS
2	100	$10^{-2}$	VoIP
3	50	$10^{-3}$	Игры в реальном времени
4	150	$10^{-3}$	Видеозвонки
5	300	$10^{-6}$	Потоковые услуги
6	300	$10^{-6}$	Web
7	100	$10^{-3}$	Интерактивные игры
8	300	$10^{-6}$	E-mail
9	300	$10^{-6}$	Загрузка файлов

Таблица 3. Требования МСЭ-Т по классам и параметрам QoS для услуг системы e-health

Услуга e-health	Скорость доступа	Задержки	Потери
Физиологический мониторинг в реальном времени	10—100 кбит/с	< 300 мс	$10^{-6}$
Аудио и видео системы, в том числе для оперативного вмешательства	10 кбит/с — 1 Мбит/с	10 мс—250 мс	$10^{-4}$
Доступ к базе данных пациента (например, с мобильного устройства)	1—10 Мбит/с	< 1 с	Услуга толерантна к потерям

узлы со второго по седьмой соединены линиями связи с пропускной способностью 10 Гбит/с, а первый со вторым и седьмой с восьмым — с 4 Мбит/с (сети доступа).

В качестве модели узла используем систему массового обслуживания (СМО) с ожиданием и постоянным временем обслуживания. На узлы подается фоновый трафик, определяющий использование (загрузку) соответствующего узла (рис. 1). Этот трафик обслуживается соответствующим узлом и выводится из системы (завершается). Наряду с фоновым трафиком на вход первого узла поступает испытательный трафик, который после обслуживания передается на вход последующего узла. Интенсивность испытательного трафика много меньше интенсивности фонового. Параметры функционирования оцениваются для испытательного трафика.

В качестве фонового трафика были выбраны два типа потоков: простейший и самоподобный с коэффициентом Хёрста  $H = 0,8$ . В результате эксперимента получены зависимости среднего значения задержки от нагрузки в Эрлантах. При моделировании загрузки всех узлов принимались равными.

На рис. 2 приведены результаты моделирования для сети доступа со скоростью 4 Мбит/с. Видно, что при достаточно больших нагрузках значения задержек измеряются в десятках миллисекунд как для простейшего, так и самоподобного потоков. Последнее свидетельствует о том, что сети доступа с такими параметрами вряд ли могут обеспечить требования по QoS для услуг не только e-health, но и игр реального времени.

На рис. 3 представлены результаты моделирования для участка гипотетической сети со скоростью 10 Гбит/с. В этом случае задержки измеряются в долях миллисекунд, что говорит

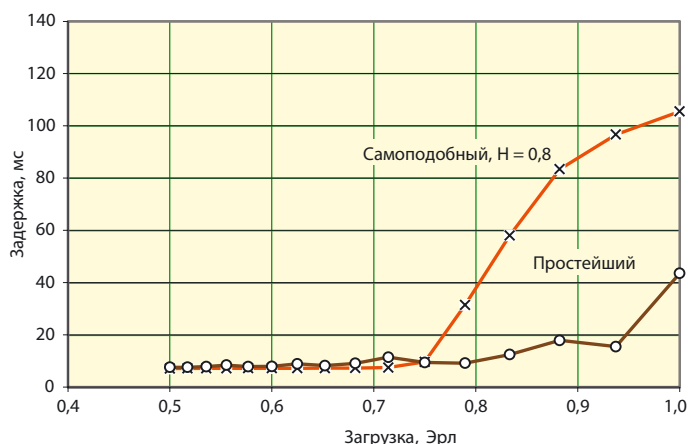


Рис. 2. Результаты моделирования для участка гипотетической сети со скоростью 4 Мбит/с

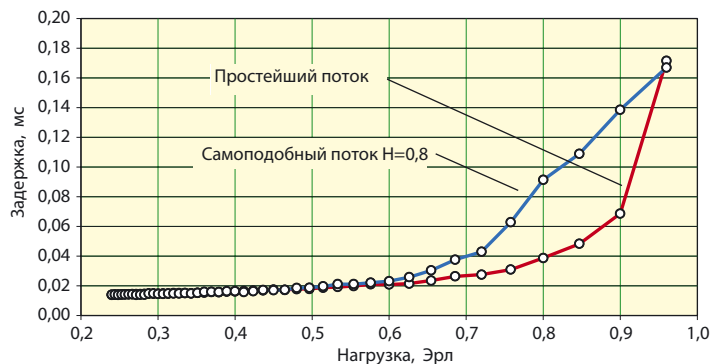


Рис. 3. Результаты моделирования для участка гипотетической сети со скоростью 10 Гбит/с

о готовности такой сети к предоставлению услуг e-health, тем более услуг игр реального времени.

Проанализируем технологические достижения в области сетей доступа применительно к беспроводным сетям доступа. В рамках работ по 12 версии систем длительной эволюции предусмотрено достижение пиковых скоростей в 3 Гбит/с [20]. В новых стандартах рабочей группы IEEE 802.11, именуемых как IEEE 802.11ac и IEEE 802.11ad, предусматриваются скорости доступа в 3,6 и 7 Гбит/с, соответственно. Таким образом, технологически внедрение сетей с малыми задержками поддержано уже сегодня.

**Методы оценки QoS в сетях с малыми задержками.** Выше отмечено, что появлению сетей с малыми задержками во многом способствовало развитие медицинских сетей. При этом одной из важных особенностей эволюции сетей связи сегодня и на перспективу является так называемая конвергенция отраслей, когда ССОП начинает оказывать услуги для специализированных провайдеров из любых отраслей народного хозяйства: медицины, жилищно-коммунального комплекса, промышленности и т.д. Важнейшим элементом оценки QoS в сетях, предоставляющих услуги для провайдеров других отраслей,

стало разделение ответственности между сетью и провайдером за конечное качество предоставления услуги. Рассмотрим методы оценки QoS в таких сетях на примере оказания услуг e-health.

Принципиальное решение по оценке QoS в сетях при конвергенции отраслей — использование методов нечеткой логики, представляющих оценки QoS не в задержках или джиттере, а в хорошо понятных для специалистов любой отрасли оценках «хорошо», «плохо», «удовлетворительно» и их модификациях. Методы нечеткой логики в XXI веке находят применение в сетях связи для выбора головного узла в сенсорных сетях [21], оценке качества предоставления услуги IPTV [22], алгоритмах маршрутизации для мобильных Ad Hoc сетей [23].

Рассмотрим использование методов нечеткой логики для оценки QoS в сетях с малыми задержками (табл. 3) при предоставлении услуги «Аудио и видео системы, в том числе для оперативного вмешательства» (A&V). Подобные решения для предоставления услуги «Физиологический мониторинг в реальном времени» приведены в [24]. В качестве входных параметров для оценки качества предоставления сетью связи услуги A&V примем в соответствии с табл. 3 скорость передачи данных, задержку и долю потерь пакетов. На выходе контроллера нечеткой логики будем формировать комплексную оценку качества предоставления сетью связи услуги в процентах. В табл. 4 приводятся параметры системы нечеткого вывода. В качестве нечеткого логического контроллера будем использовать контроллер Мамдани.

На основе табл. 4 для нечетких множеств входных параметров, используя программное обеспечение MATLAB, можно найти функции принадлежности для параметров услуги A&V, а затем сформировать правила нечеткого вывода (табл. 5).



Таблица 4. Параметры системы нечеткого вывода

X <sub>1</sub>	Имя параметра	Скорость передачи
	Терм множества	{низкая, средняя, высокая}
	Пределы значений	[10, 1000] кбит/с
X <sub>2</sub>	Имя параметра	Задержки
	Терм множества	{маленькие, средние, большие}
	Пределы значений	[10, 250] мс
X <sub>3</sub>	Имя параметра	Потери пакетов
	Терм множества	{приемлемые, неприемлемые}
	Пределы значений	[10 <sup>-10</sup> , 10 <sup>-1</sup> ]
У	Имя параметра	Качество услуги медицинской системы аудио и видеоконференцсвязи
	Терм множества	{очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий}
	Пределы значений	[0, 100]%

Таблица 5. Правила нечеткого вывода

№ правила	Скорость передачи	Задержки	Потери пакетов	Качество услуги
1	Низкая	Маленькие	Приемлемые	Высокое
2	То же	Маленькие	Неприемлемые	Очень низкое
3	«	Средние	Приемлемые	Среднее
4	«	Средние	Неприемлемые	Очень низкое
5	«	Большие	Приемлемые	Низкое
6	«	Большие	Неприемлемые	Очень низкое
7	Средняя	Маленькие	Приемлемые	Очень высокое
8	То же	Маленькие	Неприемлемые	Низкое
9	«	Средние	Приемлемые	Среднее
10	«	Средние	Неприемлемые	Низкое
11	«	Большие	Приемлемые	Среднее
12	«	Большие	Неприемлемые	Очень низкое
13	Высокая	Маленькие	Приемлемые	Очень высокое
14	То же	Маленькие	Неприемлемые	Низкое
15	«	Средние	Приемлемые	Очень высокое
16	«	Средние	Неприемлемые	Низкое
17	«	Большие	Приемлемые	Высокое
18	«	Большие	Неприемлемые	Очень низкое

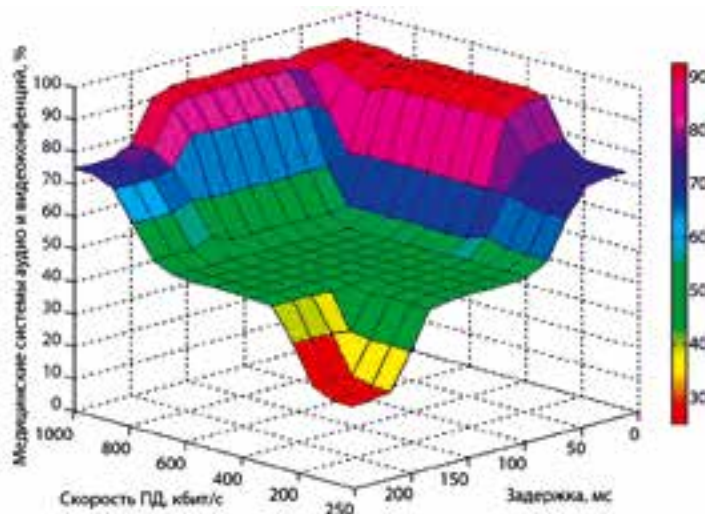


Рис. 4. Зависимость качества предоставления услуги А&В от задержек и скорости передачи

Совокупность правил, приведенных в табл. 5, представляет собой достаточно точный набор решений, инвариантных по отношению к специализации провайдеров. Проводя дефаззификацию выходных значений правил нечеткого вывода, можно получить и оценку QoS в процентах. В нашем случае дефаззификацию проводим по методу центра тяжести [24]. Затем можно построить поверхность нечеткого вывода, позволяющую сформировать трехмерную поверхность как зависимость качества услуги А&В от любых двух входных параметров. Для примера на рис. 4 приведена зависимость для задержек и скорости передачи.

Использование методов нечеткой логики для оценки QoS в сетях связи с малыми задержками позволяет операторам ССОП и специализированным провайдерам получить единый и понятный обем сторонам инструментарий. В условиях приближающейся конвергенции отраслей целесообразно разработать правила применения нечеткой логики для оценки QoS в таких сложных системах.

**Выводы.** 1. Сети NGN создавались с учетом требований по обеспечению гарантированного уровня QoS, наиболее сложным из которых является обеспечение задержки в 100 мс для услуги VoIP.

2. Предложен новый класс сетей — сети с малыми задержками. Их появление обусловлено предоставлением новых услуг игр в реальном времени, для которых критична задержка в 50 мс, и услуг e-health, одна из которых требует обеспечения задержки в 10 мс.

3. Результаты моделирования гипотетической сети, выполненной в соответствии с Рек. Y.1541, доказывают, что в сетях связи с малыми задержками сети доступа должны быть выполнены на гигабитных технологиях.

4. Внедрение сетей связи с малыми задержками, создаваемыми, как правило, для предоставления услуг специализированных провайдеров, например, медицинских, требует изменения подхода к оценке QoS. На примере услуги «Аудио и видео системы, в том числе для оперативного вмешательства» для этой цели предлагается использовать методы нечеткой логики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Recommendation Y.1541. Network Performance Objectives for IP-based Services.— 2006.
2. **Базилевич К.В., Говорков В.А.** Трафик и работа приборов соединения

- автоматических телефонных станций.— М.: Связьтехиздат, 1933.
3. **Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д.** Теория телетрафика.— М.: Связь, 1979.
  4. **Жданов И.М., Кучерявый Е.И.** Построение городских телефонных сетей.— М.: Связь, 1972.
  5. **Куташов П.Д., Лившиц Б.С., Пошерстник А.Л., Ханин Г.Б.** Городские координатные АТС типа АТСК.— М.: Связь, 1970.
  6. **Голубев А.Н., Кучерявый А.Е., Миков А.С.** Системы коммутации в конце XX — начале XXI века / Сб. статей семинара РНТОРЭС «Проблемы разработки, внедрения и эксплуатации цифровых систем коммутации».— Пермь, 21—23 апреля 1997.
  7. Recommendation Y. 2012. Functional requirements and architecture of the NGN. ITU-T, Geneva.— April, 2010.
  8. Recommendation Y. 2021. IMS for Next Generation Network. — ITU, 2006.
  9. **Кучерявый А.Е., Цуприков А.Л.** Сети связи следующего поколения.— М.: ЦНИИС, 2006.
  10. Recommendation G.1011. Reference Guide to Quality of Experience Assessment Methodologies. ITU-T, Geneva.— May 2013.
  11. **Кучерявый Е.А.** Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет.— С.-Петербург: Наука и техника, 2004.
  12. 3GPP TS 23.203. V 10.6.0, Technical Specification.— March, 2012.
  13. **Яновский Г.Г.** IP Multimedia subsystem: принципы, стандарты и архитектура // Вестник связи.— 2006.— № 3.
  14. **Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Воробьев В.О. и др.** Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMAX.— С.-Петербург: Линк, 2012.
  15. **Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б.** Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура.— М.: ЭкоТрендз, 2010.
  16. **Koucheryavy Y.** Wireless Technologies for IoT: M2M, 3GPP, EE and Cooperative.— SPb.: SUT, October 2012.
  17. ITU Technology Watch Report. E-health Standards and Interoperability. Geneva.— April, 2012.
  18. **Andreev S., Galinina O., Koucheryavy Y.** Energy-efficient client relay scheme for machine-to-machine communication / Proceedings Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), Houston, Texas, USA.— 5—9 December 2011.
  19. **Carugi M., Li C., Ahn J.-Y., Chen H.** M2M enabled ecosystems: e-health / ITU-T, FG M2M, San Jose. 13—15 November, 2012.
  20. **Holma H., Toskala A.** LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.— John Wiley and Sons, 2009.
  21. **Singh K., Goutell S., Verma S., Pirohit N.** An Energy Efficient Approach for Clustering in WSN using Fuzzy Logic // International Journal of Computer Applications.— April, 2012.— Vol. 48, № 18.
  22. **Maraj A., Rugova S.** Analysis of Routing Metrics for Offering IPTV over WiMax using Fuzzy Logic // WSEAS Transaction on Communications.— July 2010.— Vol. 9, issue 7.
  23. **Саид М.А.С., Комашинский В.И.** Алгоритм маршрутизации в MANET с прогнозированием QoS на основе нечеткой логики / Материалы 63 науч.— техн. конф. СПб ГУТ— СПб ГУТ, 2010.
  24. **Naggar Y. Al, Koucheryavy A.** The QoS Estimation for Physiological Monitoring Service in the M2M Network. Internet of Things and its Enablers (INTHITEN) / Proceedings Conference, State University of Telecommunication.— St. Petersburg, Russia, 3—4 June 2013.

*Получено 25.09.13*

#### Уважаемые коллеги!



Сердечно поздравляю вас с юбилеем журнала «Электросвязь».

Рождение журнала пришлось на период становления Советского государства, когда в условиях международной изоляции и экономической разрухи обострилась потребность в научном сопровождении работ по ускоренному развитию связи в стране, что и предопределило направленность издания. С тех пор и до сегодняшних дней журнал «Электросвязь» является заметным проводником российской инженерно-технической и научной мысли в сфере телекоммуникаций. Он по праву признан отечественными специалистами и мировым сообществом связистов как эффективный источник перспективных решений для отрасли.

Многие публикации журнала легли в основу не только кандидатских и докторских диссертаций, но и, что более важно, практической деятельности предприятий связи и производителей телекоммуникационного оборудования.

Нельзя не отметить, что, несмотря на почтенный возраст, журнал идет в ногу со временем и творчески осмысливает самые передовые научно-технические идеи и достижения. Объединяя вокруг себя признанных корифеев отечественной науки и талантливых молодых ученых, коллектив редакции создает для всех поколений авторов неповторимую творческую атмосферу в сочетании с высоким уровнем научного редактирования. В условиях сегодняшней непростой ситуации с отраслевой наукой журнал сохраняет принципы научной добросовестности и компетентности, адекватно отвечая на вызовы времени.

Уверен, что журнал «Электросвязь» еще многие годы будет активно способствовать формированию в России информационного общества, созданию его научно-технической и технологической базы.

**Н. С. Мардер,**  
вице-президент ОАО «Ростелеком»,  
доктор технических наук