

## Распределение дополнительных ресурсов в телекоммуникационной системе высокотехнологичной компании на базе концепции «W+W»

### Allocation of additional resources in the telecommunication of a high-tech company's system based on the "W+W" concept

**Ермаков / Ermakov A.**

Алексей Валентович

(ermakov-it@yandex.ru)

кандидат экономических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный

университет имени М. К. Аммосова»,

заведующий базовой кафедрой систем связи

специального назначения в ЛОНИИР.

г. Якутск

**Ключевые слова:** телекоммуникационная система – telecommunication system; высокотехнологичная компания – high-tech company; дополнительные ресурсы – additional resource; система массового обслуживания – queuing system; качество обслуживания – quality of service.

Телекоммуникационная система высокотехнологичной компании может использовать дополнительные ресурсы, создаваемые за счет беспроводного оборудования. Важное свойство таких ресурсов заключается в возможности их динамического распределения по тем фрагментам телекоммуникационной сети, в которых возникают отказы или перегрузки. В статье предложен метод решения возникающей задачи, когда отказы или перегрузки возникают в двух фрагментах телекоммуникационной сети.

The telecommunications system of a high-tech company can make use of the additional resources created by wireless equipment. An important property of such resources is that they can be dynamically allocated to those fragments of the telecommunication network in which failures or congestion occur. This paper proposes a method for solving the arising problem when failures or overloads occur in two fragments of the telecommunication network.

#### Введение

В телекоммуникационной системе высокотехнологичной компании (ТСВК) предусматривается создание дополнительных транспортных ресурсов [1]. Это решение осуществляется в основном за счет реализации концепции «W+W» (wireline and wireless), которая основана на совместном использовании проводных и беспроводных средств электросвязи [2, 3].

Использование концепции «W+W» позволяет динамически распределять беспроводные ресурсы для

повышения пропускной способности транспортных средств между теми фрагментами ТСВК, в которых наблюдаются отказы или перегрузки, порождающие снижение показателей качества обслуживания пользователей – сотрудников компании и соисполнителей проводимых работ. Сложные задачи по выбору метода распределения дополнительных (резервных) ресурсов возникают в тех случаях, когда перегрузка появляется в двух или более фрагментах ТСВК.

В статье предлагается метод распределения беспроводных ресурсов с учетом особенностей функционирования ТСВК для двух ее фрагментов. Предполагается, что ядром ТСВК служит мультисервисная пакетная сеть электросвязи. В такой сети качество обслуживания в значительной мере определяется процессами по обмену IP-пакетами [4]. Распределение беспроводных ресурсов должно быть направлено на поддержание максимально возможного уровня качественных характеристик с учетом специфики перегрузки или отказов фрагментов ТСВК и доступных технических средств.

#### Классификация проблем, обусловленных перегрузкой в ТСВК

С точки зрения вопросов, рассматриваемых в статье, уместно выделить три вида проблем, порождаемых перегрузкой в ТСВК:

I. Необходимость решения возникающих задач для одного фрагмента ТСВК, границы которого определяются территорией, обычно обслуживаемой единственным узлом коммутации (УК);

II. Необходимость решения возникающих задач для двух фрагментов ТСВК, границы которых определяются территориями, обслуживаемыми двумя УК;

III. Необходимость решения возникающих задач для  $N$  фрагментов ТСВК ( $N > 2$ ), границы которых определяются территориями, обслуживаемыми соответствующими УК.

Пример построения ТСВК на пяти площадках с величинами площадей  $S_j$  показан на рис. 1. Для рассматриваемой модели максимальное значение  $N$  равно пяти. Предполагается, что в границах каждой площадки размещен один УК. Все пять УК соединены кольцом, образованным кабелем с оптическими волокнами.

Реализация концепции «W+W» осуществляется за счет использования ресурсов базовых станций (БС), которые может выделять тракты обмена пакетами для любого УК, входящего в состав ТСВК. В качестве БС (на рис. 1 показана только одна из них) может быть задействовано оборудование Операторов сотовой связи. Существенно то, что оборудование БС должно быть связано с двумя (или более) резервными УК. Они обозначены как  $УК_{p1}$  и  $УК_{p2}$ . Для рассматриваемой модели анализируется ситуация, при которой ресурсы  $УК_{p1}$  и  $УК_{p2}$  используются для территорий с площадями  $S_1$  и  $S_2$ . Логическая связь основных и резервных УК показана пунктирными линиями.

Выбранная ситуация соответствует проблеме II. Для проблемы I возникающие задачи решаются просто: все доступные беспроводные ресурсы применяются для того УК, в котором возникла перегрузка. Вероятность возникновения проблемы III обычно очень мала. Тем не менее для нее также необходимо найти пути решения возникающих задач, но в данной статье они не рассматриваются. Далее анализируется ситуация, которая характерна для проблемы II.

### Математическая модель исследуемого объекта

Предположим, что  $УК_1$  и  $УК_2$  обрабатывают только тот объем трафика, который позволяет обеспечить

нормированные качественные показатели. Избыточный (дополнительный) трафик необходимо распределить между  $УК_{p1}$  и  $УК_{p2}$ . Математическая модель, уместная для исследования такого процесса, приведена на рис. 2 в виде двух систем массового обслуживания (СМО), перед которыми размещается модуль фильтрации (МФ).

Этот элемент модели осуществляет распределение потока пакетов (в терминах теории телетрафика – заявок) между  $УК_{p1}$  и  $УК_{p2}$ . Они, в свою очередь, рассматриваются как две СМО. Трафик на входе МФ лучше всего характеризуется функцией  $A(t)$ . Она является функцией распределения (ФР) длительности интервалов между моментами поступления заявок в СМО [5]. Задача, решаемая в МФ, похожа на проблему выбора «справедливого алгоритма» [6], но имеет свою специфику. По этой причине ниже вместо термина «справедливый» используется прилагательное «рациональный».

На выходе МФ формируются два потока заявок, характеризуемых ФР, которые обозначены как  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$ . Далее заявки попадают в буферные накопители размерами  $r_1$  и  $r_2$  соответственно. При переполнении буферных накопителей заявки теряются. Вероятности таких событий определяются величинами  $\pi_1$  и  $\pi_2$ . Из буферных накопителей заявки попадают на обслуживающие устройства с величинами производительности  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Функции  $B_1(t)$  и  $B_2(t)$  представляют собой ФР длительности обслуживания заявок. Успешно обслуженные заявки формируют выходящие потоки. Их характеристики определяются ФР  $D_1(t)$  и  $D_2(t)$ .

В нормативном документе [4] показатели качества обслуживания для IP-пакетов заданы несколькими параметрами. Основной интерес представляет собой

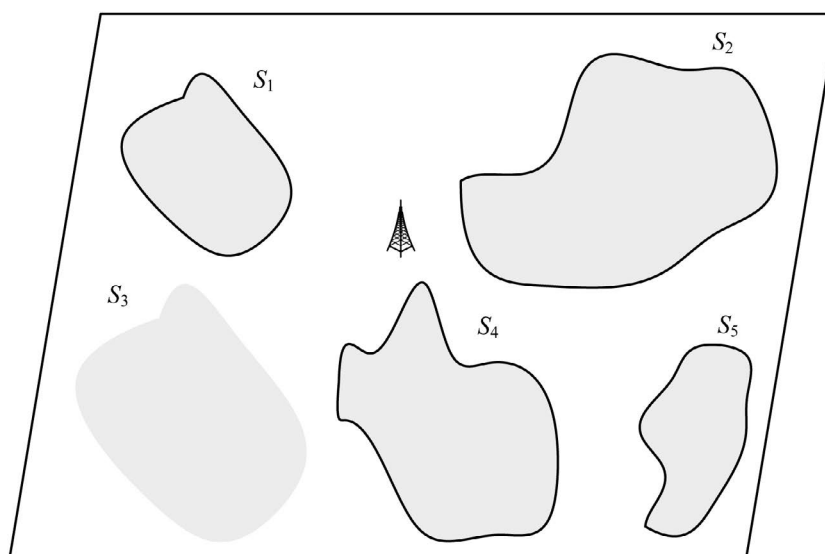


Рис. 1. Пример реализации концепции «W+W» для ТСВК

среднее значение времени задержки IP-пакетов –  $T$ ,  $p$ -квантиль этой величины –  $t_p$  и вероятность их потери –  $\pi$ . Тогда условие рациональности может быть сформулировано в виде таких равенств, в которых используются нижние индексы для указания номера СМО:

$$T_1 \approx T_2, \quad t_{p1} \approx t_{p2}, \quad \pi_1 \approx \pi_2. \quad (1)$$

Если  $r_1=r_2$ ,  $\mu_1=\mu_2$  и  $B_1(t)=B_2(t)$ , то условие рациональности для МФ может быть сформулировано в виде следующего утверждения: необходимо попеременно отправлять поступающие заявки в две разные СМО. Тогда можно полагать, что  $A_1(t)=A_2(t)$ . На практике равенства  $r_1=r_2$ ,  $\mu_1=\mu_2$  и  $B_1(t)=B_2(t)$  соблюдаются редко. По этой причине следует найти условие рациональности для общего случая, полагая, что  $r_1 \neq r_2$  и  $\mu_1 \neq \mu_2$ . При этом различие между величинами  $r_1$  и  $r_2$ , как правило, не будет заметным. Значения  $\mu_1$  и  $\mu_2$  могут отличаться друг от друга, но обычно не столь существенно (не на порядок). Совпадение вида функций  $B_1(t)$  и  $B_2(t)$  можно считать обоснованным допущением, так как обработка IP-пакетов осуществляется за постоянное время [7].

### Исследование упрощенной модели

Исследование математической модели уместно начать с простейшей ситуации. Пусть распределения  $A(t)$ ,  $B_1(t)$  и  $B_2(t)$  подчиняются экспоненциальному закону. Предположим также, что емкость буферной памяти можно считать сколь угодно большой, то есть  $\pi_i=0$ . Доля заявок, направляемых в первую СМО, равна  $q$ . Это означает, что с вероятностью  $(1-q)$  заявки попадают на обслуживание во вторую СМО. При этом потоки  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$  остаются пуассоновскими [5] с величинами интенсивности  $q\lambda$  и  $(1-q)\lambda$  соответственно. Интенсивность обслуживания заявок

в первой СМО обозначена через  $\mu$ . Для второй СМО эта величина задана произведением  $\eta\mu$ ; без потери общности будем полагать, что  $\eta \leq 1$ . Условие равенства для средних значений времени задержки заявок в обеих СМО определяется следующим соотношением [5]:

$$\frac{1}{\mu - q\lambda} = \frac{1}{\eta\mu - (1-q)\lambda}. \quad (2)$$

Из этого равенства несложно найти такую величину  $q$ , которая служит критерием рациональности для равенства величин  $T_i$ :

$$q = \frac{(1-\eta)\mu + \lambda}{2\lambda}. \quad (3)$$

При равенстве величин интенсивности обслуживания, когда  $\eta=1$ , значение искомой вероятности равно 0,5. Данное условие имеет понятный физический смысл: каждая СМО обслуживает 50% всех заявок.

Равенство квантилей времени задержки заявок в обеих СМО определяется следующим образом [5]:

$$\frac{-\ln(1-p)}{\mu - q\lambda} = \frac{-\ln(1-p)}{\eta\mu - (1-q)\lambda}. \quad (4)$$

Из этого соотношения следует, что величина  $q$  также определяется по формуле (3). Иными словами, оба критерия рациональности для простейшей модели равноценны.

Бизнес-процессы, характерные для ТСВК, таковы, что вероятность потери IP-пакетов не столь важна для качественной поддержки услуг. Тем не менее необходимо убедиться, что гипотеза о том, что емкость буферной памяти может полагаться неограниченной, требует проверки. С этой целью уместно сравнить два

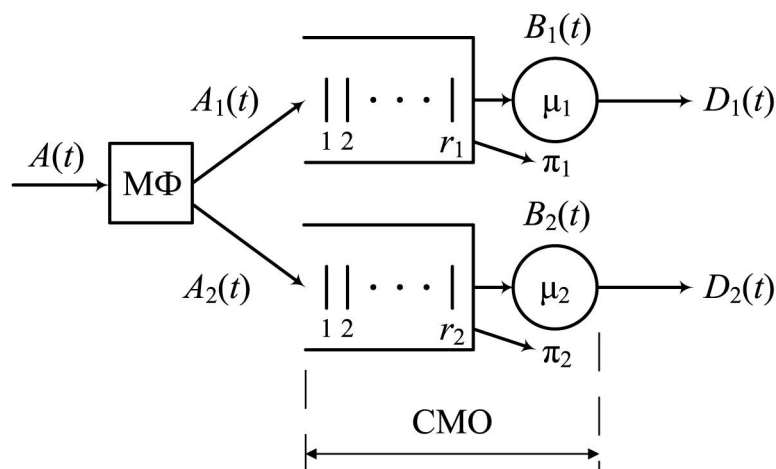


Рис. 2. Модель распределения потока заявок между двумя СМО

значения вероятности. Первое значение  $\pi_r$  соответствует вероятности потери заявок в СМО с размером буферной памяти, равной  $r$ . Обозначим через  $\rho$  нагрузку СМО, равную отношению  $\lambda$  к  $\mu$  [5]. Тогда величина  $\pi_r$  вычисляется по такой формуле [8]:

$$\pi_r = \frac{(1-\rho)\rho^{r+1}}{1-\rho^{r+2}}. \quad (5)$$

Для СМО с возможностью формирования бесконечной очереди величину  $\pi_r$  следует сравнивать с вероятностью состояния  $p_{r+1}$  [5], для которой в системе находится количество заявок, равное  $r+1$ :

$$p_{r+1} = (1-\rho)\rho^{r+1}. \quad (6)$$

Относительная ошибка  $\delta$ , возникающая вследствие замены значения  $\pi_r$  величиной  $p_{r+1}$ , находится из соотношений (5) и (6):

$$\delta = \rho^{r+2}. \quad (7)$$

Ресурсы, используемые в ТСВК, проектируются на величину нагрузки не выше 0,7 [9, 10]. Для такого значения  $\rho$  объем буферной памяти необходимо выбирать для допустимой вероятности потери заявок не более 0,001 [4]. Формула (5) позволяет оценить величину  $r$  пятнадцатью местами для ожидания начала обслуживания. Это означает, что в реальных пакетных сетях, примером которых служит ТСВК,  $\delta \leq 0,23\%$ .

Следовательно, гипотезу об отсутствии ограничения на размеры буферной памяти можно считать вполне приемлемой. Данное утверждение было проверено при помощи имитационного моделирования для ряда более сложных моделей с произвольными законами распределения  $A(t)$ .

### Исследование модели, адекватной обработке IP-пакетов в ТСВК

Возможность использования условия (3) или при необходимости его скорректированной версии необходимо проверить для тех моделей, которые точнее описывают процессы обработки IP-пакетов в ТСВК. В качестве функции  $A(t)$ , как показано в публикациях [11 – 13], уместно в числе прочих использовать бета-распределение [14]. Длительность обслуживания заявок (ими служат IP-пакеты) можно полагать постоянной величиной для обеих СМО [7], но различающихся значениями интенсивности –  $\mu$  и  $\eta\mu$  соответственно.

Такого рода СМО можно исследовать при помощи имитационного моделирования. В частности, модель с бета-распределением для функции  $A(t)$  хорошо конструируется в среде AnyLogic [15]. Результаты имитационного моделирования показали, что условие (3) может использоваться для СМО с функцией  $A(t)$ ,

представимой при помощи бета-распределения. Различие в величинах  $T_i$  и  $t_{pi}$  для обеих СМО не превышает 10%, что вполне приемлемо для решения практических важных задач.

Моделью более общего вида могут служить СМО, в которых информация о распределениях  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$  представлена значениями двух параметров:

- интенсивность входящего потока ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ );
- коэффициент вариации ( $C_{A1}$  и  $C_{A2}$ ).

Изначально известны величины  $\lambda$  и  $C_A$ . Значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  оцениваются, как было показано выше, величинами  $q\lambda$  и  $(1-q)\lambda$  соответственно. Для вычисления коэффициентов вариации  $C_{A1}$  и  $C_{A2}$  можно использовать приближенные соотношения, предложенные в [16]:

$$C_{A1}^2 \approx 1 + q(C_A^2 - 1), \quad C_{A2}^2 \approx 1 + (1-q)(C_A^2 - 1). \quad (8)$$

Используя формулы, которые приведены в [12, 17], можно записать приближенные соотношения для средних величин длительности задержки заявок в обеих СМО –  $T_1$  и  $T_2$  соответственно:

$$T_1 \approx \frac{1}{\mu} + \frac{1+q(C_A^2-1)}{2q\lambda\left(1-\frac{q\lambda}{\mu}\right)}, \quad T_2 \approx \frac{1}{\eta\mu} + \frac{1+(1-q)(C_A^2-1)}{2(1-q)\lambda\left(1-\frac{(1-q)\lambda}{\eta\mu}\right)}. \quad (9)$$

Следует напомнить, что данные приближения дают искомые оценки для сравнительно высокой нагрузки. По этой причине корректность условия (3) приходится проверять только для нагрузки порядка 0,7 и более [12]. Из равенства  $T_1 = T_2$  несложно найти искомую вероятность  $q$ . Для моделей такого рода величина относительной  $\delta$  также находится на приемлемом уровне с точки зрения решения практических задач. Это означает, что влияние величин  $C_{A1}$  и  $C_{A2}$  на значение искомой вероятности  $q$  не является существенным.

### Направления дальнейших исследований

Оценку вероятности  $q$  целесообразно считать первым шагом в решении задачи по управлению ресурсами ТСВК, создаваемыми в соответствии с концепцией «W+W». Изменение характера трафика в ТСВК может осуществляться очень быстро за короткий отрезок времени [18]. По этой причине логично оперировать функцией  $q(t)$ . Это позволит учесть возможные изменения оцениваемой вероятности за счет применения междисциплинарного подхода к развитию ТСВК [19], что предусмотрено ее экономико-математической моделью [20].

Использование функции  $q(t)$  может осуществляться разными способами:

- за счет реализации алгоритма в программном обеспечении системы управления, входящей в состав каждой ТСВК;

- путем совместной работы систем управления несколькими ТСВК посредством СЦД – сети цифровых двойников [21];

- при помощи построения искусственной нейронной сети [22], контролирующей трафик в ТСВК.

На рис. 3 показан упрощенный пример реализации того алгоритма управления ресурсами ТСВК, который предполагает использование функциональных возможностей СЦД. Структура предлагаемого алгоритма весьма проста. Дополнительные комментарии необходимы только для «облачка», отображающего СЦД, и блока под названием «Контроль корректности принятых решений в ТСВК».

Основная идея использования СЦД применительно к рассматриваемой задаче заключается в том, что создается информационная система, которая анализирует и обобщает опыт ряда ТСВК по распределению дополнительных ресурсов. Функции СЦД, безусловно, включают решение множества других задач. Более того, СЦД может использовать опыт других инфокоммуникационных систем, которые напрямую не относятся к классу ТСВК, но решаемые задачи похожи. По этой причине информация, полученная в каждой ТСВК, направляется в СЦД. Данная операция на рис. 3 изображена пунктирной линией.

Контроль корректности принятых решений в ТСВК подразумевает оценку эффективности управления дополнительными ресурсами. В этом блоке может быть использована искусственная нейронная сеть, если такой подход окажется уместным. Данный блок обменивается информацией с СЦД, что иллюстрируется штрихпунктирной линией.

Вторым направлением дальнейших исследований, о чем было упомянуто выше, служит разработка решений для  $N \geq 3$ . С практической точки зрения особый интерес представляет случай отказа всех

транспортных ресурсов ТСВК, основанных на проводных технических средствах. Для подобных ситуаций необходим поиск метода рационального распределения беспроводных ресурсов. На первый взгляд, решение заключается в пропорциональном назначении ресурсов между УК на основании имеющейся статистики. С другой стороны, отказ всех транспортных ресурсов ТСВК, основанных на проводных технических средствах, скорее всего, связан с экстраординарным событием. В подобных случаях может потребоваться введение иных правил распределения дополнительных ресурсов.

Третье направление дальнейших исследований обусловлено актуальностью анализа вероятностно-временных характеристик математических моделей ТСВК, для которых интенсивность потока заявок рассматривается как функция времени –  $\lambda(t)$ . Возникающим задачам присуща практическая ценность, так как стохастические характеристики, подобные тем, которые будут характерны для концепции «Сеть-2030» [23], еще не изучены.

## Заключение

В статье рассмотрен один из аспектов распределения дополнительных ресурсов в ТСВК на базе концепции «W+W». Он связан с выбором правила для эффективного обслуживания трафика беспроводными техническими средствами при перегрузках двух УК. Предложенное правило позволяет весьма просто найти способ распределения доступных дополнительных ресурсов между двумя фрагментами ТСВК.

Точность распределения дополнительных ресурсов вполне приемлема для решения практических задач. При необходимости она может быть повышена за счет применения СЦД и/или создания искусственной нейронной сети.

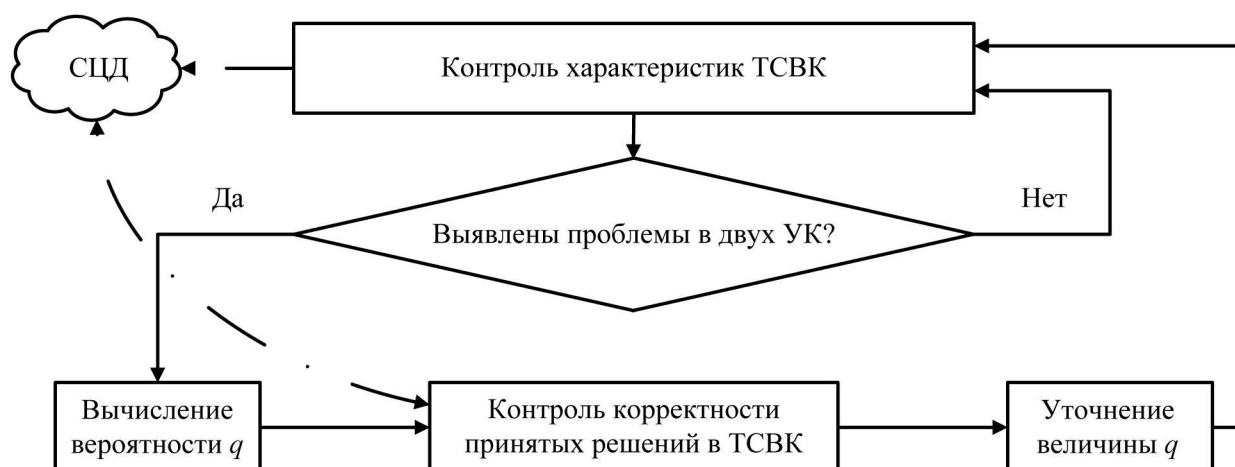


Рис. 3. Алгоритм управления ресурсами ТСВК

Проведение намеченных направлений дальнейших исследований позволит получить новые теоретические результаты. Вместе с тем они нацелены на решение актуальных практических задач по улучшению качества обслуживания трафика в ТСВК.

## Литература

1. Ермаков, А. В. Принципы развития телекоммуникационной системы, предназначенной для высокотехнологичной компании / А.В. Ермаков, Н.А. Соколов // Информация и Космос. – 2020. – № 1. – С. 6–11.
2. Ермаков, А. В. Эволюция концепции W+W для развития телекоммуникационной системы при переходе к цифровой экономике / А.В. Ермаков, К.Ю. Коломенский, Н.А. Соколов // Электросвязь. – 2022. – № 2. – С. 42–46.
3. Соколов, Н. А. Задачи планирования сетей электросвязи / Н.А. Соколов. – СПб.: Техника связи, 2012. – 432 с.
4. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. – Recommendation Y.1541. – Geneva, 2011. – 66 p.
5. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Кучерявый, Е. А. Методология распределения ресурсов в гетерогенных сетях / Е.А. Кучерявый, К.Е. Самуйлов // Электросвязь. – 2008. – № 4. – С. 34–40.
7. Соколов, А. Н. Методы анализа задержек IP-пакетов в сети следующего поколения : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.12.13) / Соколов Андрей Николаевич; СПбГУТ. – СПб., 2011. – 20 с.
8. Вентцель, Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
9. Семенов, Ю. В. Проектирование сетей связи следующего поколения / Ю.В. Семенов. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 240 с.
10. Соколов, Н. А. Задачи планирования сетей электросвязи / Н.А. Соколов. – СПб.: Техника связи, 2012. – 432 с.
11. 3GPP Technical Report 37.868. – 2011. – Release 11. – Sophia Antipolis. – 28 p.
12. Леваков, А. К. Сеть связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях. Анализ моделей телетрафика / А.К. Леваков. – М.: ИРИАС, 2019. – 124 с.
13. Study of the Packets Arrival Process to a Multiservice Node / D. Shingissov [et al.] // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, No. 4. – P. 752.
14. Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
15. Боев, В. Д. Компьютерное моделирование в среде AnyLogic / В.Д. Боев. – М.: Юрайт, 2022. – 298 с.
16. Allen, O. A. Queuing models of computer systems / O.A. Allen // Computer. – 1980. – Vol. 13, No. 4. – P. 13–24.
17. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
18. Оценка роста интенсивности входящего трафика / В.Ю. Гойхман [и др.] // Электросвязь. – 2018. – № 3. – С. 75–77.
19. Ermakov, A. Using an Interdisciplinary Approach to Manage Traffic in Modern Telecommunication Systems / A. Ermakov, A. Levakov, N. Sokolov // Proceedings of IFOST-2019 (International Forum on Strategic Technology), Tomsk, October 14–17, 2019. – P. 326–330.
20. Ermakov, A. Economic-Mathematical Model of Telecommunication System, Which is Being Developed for a High-Tech Company / A. Ermakov, N. Sokolov // International science and technology conference "Earth science", Russky Island, 4–6 March, 2019. – P. 032094.
21. The Concept of Building a Network of Digital Twins to Increase the Efficiency of Complex Telecommunication Systems / Sh.Zh. Seilov [et al.] // Complexity (Special Issue). – 2021. – Vol. 2021. – P. 9480235.
22. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 384 с.
23. Росляков, А. В. "СЕТЬ-2030": взгляд МСЭ-Т на будущее сетей фиксированной связи / А.В. Росляков // Первая миля. – 2021. – № 4. – С. 50–59.