

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В МОБИЛЬНОЙ РАДИОСЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К. А. Польщиков

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет*

Поступила в редакцию 13.01.2015 г.

**Аннотация.** В статье представлен подход к моделированию передачи информационных потоков по каналам мобильной радиосети специального назначения. Он учитывает особенности исследуемой сети и позволяет оценить эффективность доставки данных в условиях мобильности абонентов и деструктивных воздействий.

**Ключевые слова:** мобильная радиосеть специального назначения, модель, информационные потоки, пакеты данных.

**Annotation.** The paper presents an approach to modeling the transmission channels of information flows in a mobile ad-hoc network for special purposes. It takes into account the network and allows the study to evaluate the effectiveness of data delivery in a mobile subscriber and destructive influences.

**Keywords:** mobile ad-hoc network for special purposes, model, information flows, data packets.

### ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением развития телекоммуникационных технологий являются мобильные самоорганизующиеся сети (Mobile Ad-Hoc Networks, MANET) [1]. Благодаря обеспечению высокой живучести, быстрого развертывания и возможности доставки информации в условиях динамически изменяющейся топологии технология MANET может применяться для построения мобильной радиосети специального назначения (МРСН), функционирующей с целью обеспечения информационного обмена при выполнении специфических задач, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера или военными действиями [2].

Изменение топологии МРСН обусловлено не только мобильностью абонентов, но и случайными процессами уничтожения (отключения) узлов вследствие воздействия деструктивных факторов, а также добавления на определенные участки местности новых узлов. В таких условиях существенно снижа-

ется эффективность доставки информации абонентам сети [3, 4]. В связи с этим моделирование циркулирующих в МРСН информационных потоков представляется актуальной научно-технической задачей, результаты решения которой требуются для создания новых технологий, позволяющих повысить эффективность функционирования исследуемой сети.

Создание адекватных аналитических моделей в области мобильных самоорганизующихся сетей сопряжено со значительными трудностями, связанными с тем, что на процесс передачи данных в ad-hoc сетях оказывает влияние большое число различных факторов, которые носят случайный характер и слабо поддаются строгому математическому анализу [5]. Поэтому значительное число работ посвящено имитационному моделированию самоорганизующихся сетей, осуществленному на основе применения специализированных (ns-2, ns-3, opnet) и универсальных программных средств (GPSS, AnyLogic, MATLAB). Так в статье [6] представлен ряд аналитических и GPSS-моделей для оценки пропускной способности беспроводной ячеистой сети с мобильными узлами,

в работе [7] предложена созданная в среде MATLAB модель отправки данных узлами MANET, публикация [8] посвящена разработке имитационных моделей для выбора оптимальных параметров многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети.

Анализ научных публикаций показал, что в области ad-hoc сетей усилия исследователей направлены в основном на создание моделей маршрутизации [9–11], а вопросам моделирования передачи информационных потоков в рамках выбранных маршрутов уделяется мало внимания. Кроме того, существующие модели не учитывают специфику беспроводной передачи информации в условиях случайных деструктивных воздействий, поэтому не могут в полной мере обеспечить адекватную оценку эффективности доставки данных в МРСН.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Передаваемые в МРСН информационные потоки можно условно разделить на два основных вида: трафик реального времени (речь, видео) и потоки данных (управляющие сигналы, текстовые сообщения, топографические изображения, другая графическая и табличная информация). Каждый вид трафика характеризуется специфическими параметрами и различными требованиями к качеству передачи [12–14].

Пусть узлом-отправителем осуществляется передача потока данных, адресованного узлу-получателю. Этот поток данных в [2] именуется управляемым потоком (controlled flow, CF). Для передачи пакетов указанного потока (CF-пакетов) заранее выбран маршрут – последовательность каналов, ведущая от узла-отправителя к узлу-получателю. Будем считать, что в этот маршрут входят каналы с номерами от 1 до  $(N-1)$ . Для передачи подтверждений успешной доставки CF-пакетов, т. е. CF-квитанций, определен маршрут, являющийся последовательностью каналов, проходящих от узла-получателя к узлу-отправителю. Данный маршрут включает каналы с номерами от  $N$  до  $(N+M)$ . Совокупность двух указанных (в общем случае разных) маршру-

тов, используемых для передачи CF-пакетов и CF-квитанций, является CF-контуром [2] (рис. 1).

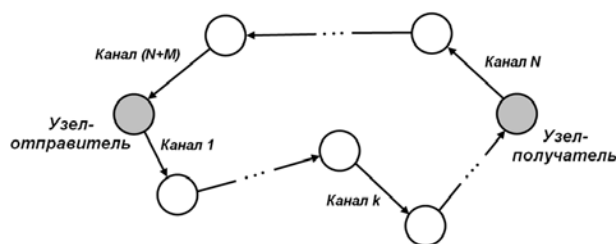


Рис. 1. Узлы и каналы CF-контура

Кроме передачи управляемого потока, каналы CF-контура могут быть использованы для передачи других (конкурирующих) потоков реального времени и потоков данных. Потоки данных и реального времени, которые передавались бы по тем или иным каналам CF-контура, если бы сеть имела фиксированную топологию, назовем основными потоками. Каждый основной поток реального времени имеет порядковый номер  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ), а каждый основной поток данных имеет порядковый номер  $g$  ( $g = 1, 2, \dots, G$ ). Задана величина  $\bar{r}_{base}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов основных потоков реального времени для передачи по каналу CF-контура, а также известна величина  $\bar{d}_{base}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов основных потоков данных для передачи по каналу CF-контура.

Кроме того, заданы матрицы  $[a_{kl}^{real}]$  и  $[a_{kg}^{data}]$ , предписывающие передачу основных потоков реального времени и данных по каналам CF-контура. Элементы этих матриц могут принимать следующие значения:  $a_{kl}^{real} = 1$ , если канал номер  $k$  требуется для передачи основного потока реального времени номер  $l$ ;  $a_{kl}^{real} = 0$ , если канал номер  $k$  не требуется для передачи основного потока реального времени номер  $l$ ;  $a_{kg}^{data} = 1$ , если канал номер  $k$  требуется для передачи основного потока реального времени номер  $g$ ;  $a_{kg}^{data} = 0$ , если канал номер  $k$  не требуется для передачи основного потока реального времени номер  $g$ . Из-за динамичной топологии (вызванной, в частности, деструктивными воздействиями) тот или иной основной поток

в МРСН может не передаваться по каналам CF-контура, даже если соответствующие элементы матриц  $[a_{kl}^{real}]$  и  $[a_{kl}^{data}]$  равны 1. Известны следующие величины:  $P_{base}^{real}$  – вероятность передачи основного потока реального времени по каналам CF-контура в условиях динамичной топологии,  $P_{base}^{data}$  – вероятность передачи основного потока данных по каналам CF-контура в условиях динамичной топологии.

Вследствие динамичности топологии МРСН по каналам CF-контура, кроме основных потоков, могут передаваться дополнительные потоки данных и реального времени. На рис. 2 показан пример, иллюстрирующий передачу дополнительного потока  $\omega_3$  по каналу  $k_1$ . На указанном рисунке узлы сети обозначены в виде окружностей, каждый узел пронумерован. Информационные потоки имеют обозначения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . Маршрут передачи потока  $\omega_1$  обозначен жирной линией, потока  $\omega_2$  – тонкой линией, а потока  $\omega_3$  – пунктиром. Анализируемые каналы обозначены  $k_1$  и  $k_2$ . Чтобы удобнее было фиксировать изменение топологии, местность, на которой расположены узлы, условно разбита на квадраты. Радиус зоны радиопокрытия любого узла ограничен длиной диагонали квадрата. На рис. 2 рассматривается ситуация, когда по каналу  $k_1$  передавался основной поток  $\omega_2$ . В это же время из-за воздействия деструктивных факторов узел 10 был уничтожен (или отключен). Если бы данное событие не произошло, то поток  $\omega_3$  пере-

давался бы по каналу  $k_2$ , который менее загружен, чем канал  $k_1$  (рис.2, а). Но в результате того, что указанное событие произошло, по каналу  $k_1$  осуществлялась передача дополнительного потока  $\omega_3$  (рис. 2, б).

Возможность передачи дополнительных потоков по каналам CF-контура в условиях фиксированной топологии была бы исключена. Каждый дополнительный поток реального времени имеет порядковый номер  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ), каждому дополнительному потоку данных присвоен порядковый номер  $h$  ( $h = 1, 2, \dots, H$ ). Задана величина  $\bar{r}_{add}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов дополнительных потоков реального времени для передачи по каналу CF-контура, а также известна величина  $\bar{d}_{add}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов дополнительных потоков данных для передачи по каналу CF-контура. Заданы матрицы  $[b_{kj}^{real}]$  и  $[b_{kh}^{data}]$ , предписывающие поступление дополнительных потоков реального времени и данных для передачи по каналу CF-контура. Элементы этих матриц могут принимать следующие значения:  $b_{kj}^{real} = 1$ , если канал номер  $k$  востребован для передачи дополнительного потока реального времени номер  $j$ ;  $b_{kj}^{real} = 0$ , если канал номер  $k$  не востребован для передачи дополнительного потока реального времени номер  $j$ ;  $b_{kh}^{data} = 1$ , если канал номер  $k$  востребован для передачи дополнительного потока данных для передачи по каналу CF-контура;  $b_{kh}^{data} = 0$ , если канал номер  $k$  не востребован для пере-

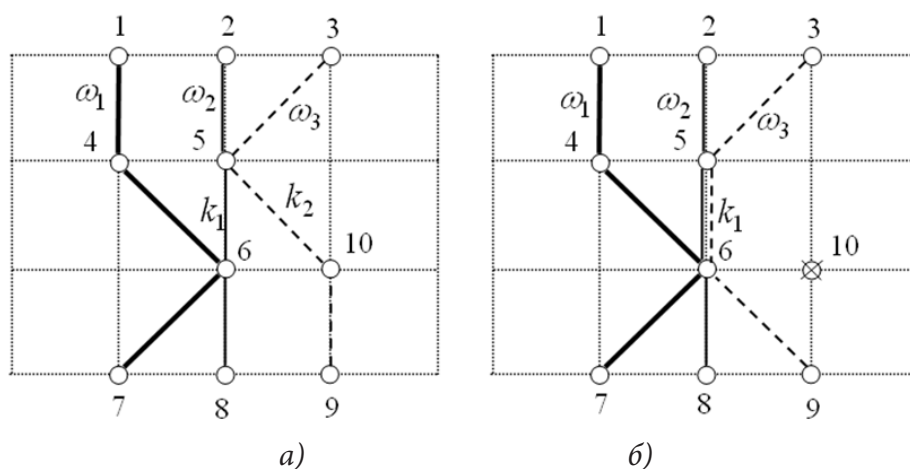


Рис. 2. Пример передачи по каналу  $k_1$  дополнительного потока  $\omega_3$  по причине уничтожения узла 10: а) узел 10 функционирует в сети; б) узел 10 уничтожен

дачи дополнительного потока реального времени номер  $h$ .

По причине возможных перемещений, уничтожений, добавлений, включений и выключений узлов передача тех или иных основных и дополнительных потоков по каналу CF-контура может быть преждевременно прекращена. Известны следующие величины:  $\bar{r}^{p.cont}$  – среднее время между началом и преждевременным прекращением поступления пакетов потока реального времени для передачи по каналу CF-контура;  $\bar{d}^{p.cont}$  – среднее время между началом и преждевременным прекращением поступления пакетов потока данных для передачи по каналу CF-контура.

Кроме того, заданы следующие величины:  $\bar{r}^{cont}$  – средняя длительность поступления пакетов потока реального времени для передачи по каналу CF-контура;  $\bar{d}^{cont}$  – средняя длительность поступления пакетов потока данных для передачи по каналу CF-контура;  $\tau^{CF}(t)$  – текущий интервал времени между моментами формирования CF-пакетов для отправки по каналу 1;  $\xi_i(t)$  – текущий тайм-аут повторной передачи, установленный при отправке по каналу 1 CF-пакета номер  $i$ ;  $L_i$  – битовая длина CF-пакета номер  $i$ ;  $L^b$  – средняя битовая длина пакета данных (пакета реального времени);  $c_k$  – пропускная способность канала  $k$ ;  $p_k$  – вероятность битовой ошибки в канале  $k$ ;  $Q$  – максимальное количество пакетов, которые могут быть буферизованы для ожидания передачи по каналу сети;  $\lambda_l^{r.base}$  – интенсивность поступления пакетов основного потока реального времени номер  $l$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_j^{r.add}$  – интенсивность поступления пакетов дополнительного потока реального времени номер  $j$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_g^{d.base}$  – интенсивность поступления пакетов основного потока данных номер  $g$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_h^{d.add}$  – интенсивность поступления пакетов дополнительного потока данных номер  $h$  для передачи по каналу сети. Известно, что пакеты реального времени требуются передавать с минимальными задержками, поэтому эти пакеты по каналам CF-контура должны отправляться в первую очередь.

Используя представленные выше исходные данные, требуется разработать математическую модель передачи потоков информации по каналам CF-контура, на основе применения которой можно было бы определить значения следующих величин:  $W(t)$  – текущей длительности ожидания CF-квитанции узлом-отправителем;  $Z$  – количества избыточных повторных передач CF-пакетов;  $I_k^v(t)$  – количества CF-пакетов и других пакетов данных, поступивших для передачи по каналу  $k$  в течение последних  $v$  тактов;  $\rho_k^v(t)$  – количества CF-пакетов, претендовавших на передачу по каналу  $k$  и отброшенных в течение последних  $v$  тактов;  $\gamma_k(t)$  – текущей задержки CF-пакетов в очереди канала  $k$ ;  $q_k(t)$  – текущего количества CF-пакетов и других пакетов данных в очереди канала  $k$ ;  $E(t)$  – текущей пропускной способности CF-контура, доступной для передачи CF-потока;  $T^{CF}$  – длительности передачи CF-потока.

#### ДЕКОМПОЗИЦИЯ И ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Сложность сформулированной выше задачи обуславливает необходимость ее декомпозиции. Передача информационных потоков по каналам CF-контура включает следующие процессы: формирование CF-пакетов в узле-отправителе; формирование CF-квитанций в узле-получателе; поступление пакетов реального времени для передачи по каналам CF-контура; поступление пакетов данных для передачи по каналам CF-контура; поступление CF-пакетов (CF-квитанций) для передачи по каналам CF-контура; передачу пакетов реального времени, пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций) по каналам CF-контура; буферизацию пакетов реального времени, поступивших для передачи по каналам CF-контура; буферизацию пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций), поступивших для передачи по каналам CF-контура; отбрасывание пакетов реального времени, пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций), претендовавших на передачу по каналам CF-контура; прием CF-пакетов узлом-получателем и CF-квитанций узлом-отправителем. Поэ-

тому создание математической модели передачи информационных потоков по каналам CF-контура заключается в разработке частных моделей перечисленных выше процессов.

В основе этих моделей лежит представление текущих состояний соответствующих процессов с помощью идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей информационных потоков по каналам CF-контура. Идентификаторы пакетов могут принимать значения  $i$ ,  $\beta$  или 0. В качестве идентификаторов CF-пакетов используются числа  $i = 1, 2, \dots, I$  – порядковые номера этих пакетов в рамках моделируемого CF-потока. Идентификаторы CF-квитанций при этом совпадают с номерами соответствующих CF-пакетов. Идентификаторы других пакетов данных и реального времени принимаются равными числу  $0 < \beta < 1$ . Это дает возможность моделировать перемещения каждого CF-пакета и каждой CF-квитанции и отличать их от других пакетов, конкурирующих с ними за передачу по каналам CF-контура. Значение идентификатора, равное 0, указывает на то, что в текущем такте отсутствует пакет, связанный с моделируемым состоянием соответствующего процесса.

Схемы идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей информационных потоков по каналам 1,  $k$  и  $N$ , изображены соответственно на рис. 3–5. В указанных схемах использованы следующие обозначения:  $F_1$  – номера CF-пакетов, сформированных в узле-отправителе для передачи по каналу 1;  $F_N$  – номера CF-квитанций, сформированных в узле-получателе для передачи по каналу  $N$ ;  $S_k^{CF}$  – номера CF-пакетов (CF-квитанций), поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $S_k^d$  – идентификаторы пакетов данных, поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $S_k^r$  – идентификаторы пакетов реального времени, поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $\theta_k$  – идентификаторы пакетов (квитанций), передаваемых по каналу  $k$ ;  $C_k^{rq}$  – идентификаторы пакетов реального времени, буферизованных в ячейках  $q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ ) для передачи по каналу  $k$ ;  $C_k^{dq}$  – идентификаторы пакетов данных, буферизованных в ячейках  $q$  для передачи по

каналу  $k$ ;  $D_k^{CF}$  – номера отброшенных CF-пакетов (CF-квитанций) из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $D_k^d$  – идентификаторы отброшенных пакетов данных из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $D_k^r$  – идентификаторы отброшенных пакетов реального времени, из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $S_{rec}^{CF}$  – номера CF-пакетов, принятых узлом-получателем;  $S_{send}^{CF}$  – номера CF-квитанций, принятых узлом-отправителем.

Стрелками на рис. 3–5 указаны непосредственные связи между значениями идентификаторов тех или иных пакетов (квитанций). Например, стрелки на рис. 5, исходящие из элемента  $S_N^d$ , указывают на то, что пакет данных, поступивший для передачи по каналу  $N$ , в следующем такте моделирования в зависимости от сложившейся ситуации может, во-первых, передаваться по этому каналу, во-вторых, занять свободную ячейку в буфере ожидания, и, в-третьих, может быть отброшен.

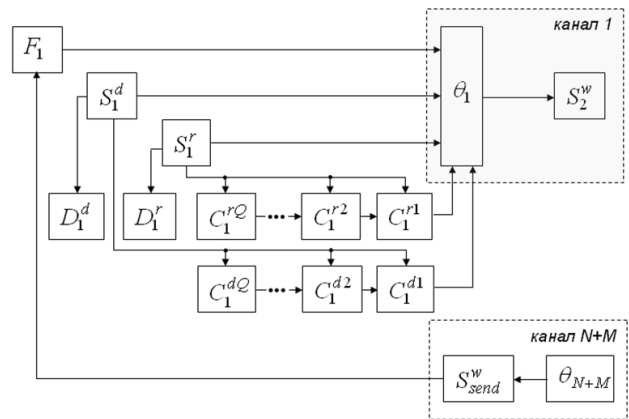


Рис. 3. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу 1

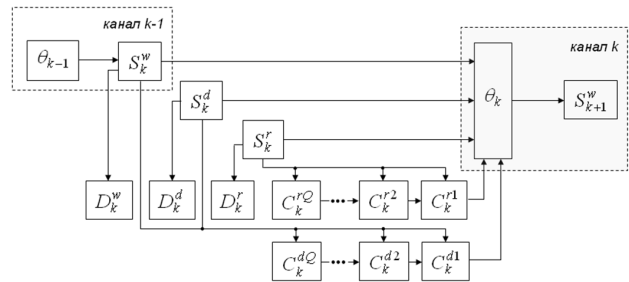


Рис. 4. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу  $k$

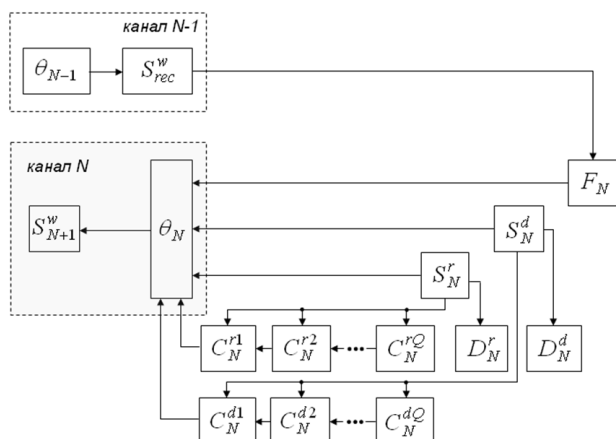


Рис. 5. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу  $N$

В результате математического моделирования получены аналитические соотношения, позволяющие при заданных исходных данных вычислить значения искомых величин  $W(t)$ ,  $Z$ ,  $I_k^v(t)$ ,  $\rho_k^v(t)$ ,  $\gamma_k(t)$ ,  $q_k(t)$ ,  $E(t)$  и  $T^{CF}$ . Разработанные аналитические модели положены в основу создания в программной среде MatLab & Simulink имитационной модели передачи информационных потоков в МРСН. Результаты проведенных имитационных экспериментов изложены в статье [2]. Они позволяют оценить эффективность передачи данных в различных условиях функционирования исследуемой сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлен новый подход к моделированию передачи информационных потоков по каналам МРСН. В его основе лежит представление текущих состояний моделируемых процессов с помощью идентификаторов пакетов и квитанций, связанных с передачей информационных потоков по каналам заданного контура. Применение подхода позволяет создавать математические модели, в которых учитывается влияние мобильности узлов и деструктивных внешних воздействий на характеристики сетевого трафика. Результаты моделирования могут быть использованы для оценки эффективности передачи данных в различных условиях функционирования МРСН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basagni S., Conti M., Giordano S., Stojmenovic I. Mobile Ad Hoc Networking. – IEEE Press, 2004. – 461 p.
2. Константинов И. С., Польщиков К. А., Лазарев С. А. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. – 2015. – № 13 (210). – Вып. 35(1). – С. 156–163.
3. Осипов Е. А. Проблема реализации надежной передачи данных в самоорганизующихся и сенсорных сетях // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 29–33.
4. Польщиков К. А. Проблемные вопросы доставки данных в мобильной радиосети специального назначения // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 26–29.
5. Метелев А. П., Чистяков А. В., Жолотов А. Н. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – № 3 (1). – С. 75–78.
6. Ляхов А. И., Пустогаров И. А., Шпилев С. А. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности // Информационные процессы. – 2008. – Том. 8 (3). – С. 173–192.
7. Иовлев Д. И., Бойченко И. В., Абрамов В. В. Повышение устойчивости передачи данных в сетях MANET // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 171–177.
8. Махорин А. О., Падалко С. Н., Терентьев М. Н. Симуляция многослужбовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии с учетом решения задачи выбора оптимальных параметров сети // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 228–232.
9. Бабков В., Мартиросова М. Протоколы маршрутизации в самоорганизующихся пакетных радиосетях // Мобильные телекоммуникации. – 2009. – № 10. – С. 32–37.
10. Нечаев Ю. Б., Епифанцев А. А., Ермолин Д. Ю. Моделирование и анализ протоколов маршрутизации беспроводных ad-hoc сетей // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 3. – С. 5–10.

11. Афанасьев А. Л., Гармонов А. В., Кац-неко Г. А. Многокритериальный выбор маршрута в телекоммуникационных сетях // Теория и техника радиосвязи. – 2013. – № 4. – С. 5–10.

12. *Polshchikov K. O.* Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network // Microwave and Telecommunication Technology, 23rd International Crimean Conference. – 2013. – P. 517–518.

13. Польщиков К. А. Оценка вероятностно-временных характеристик доставки данных в беспроводной самоорганизующейся сети // Научные ведомости БелГУ. – 2015. – № 7 (204). – Вып. 34 (1). – С. 183–187.

14. Польщиков К. А. Об управлении интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. – 2014. – № 21 (192). – Вып. 32(1). – С. 196–201.

**Польщиков Константин Александрович** – доцент кафедры информационных систем Белгородского государственного национального исследовательского университета, кандидат технических наук, доцент.  
Тел.: +79623042764.  
E-mail: polshchikov@bsu.edu.ru

**Polshchikov Konstantin A.** – associate professor of Information Systems Department of Belgorod State National Research University, candidate of technical science, associate professor.  
Tel.: +79623042764.  
E-mail: polshchikov@bsu.edu.ru