

## АНАЛИЗ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СОТОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ВИРТУАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ<sup>1</sup>

**Аннотация.** Предложена новая схема доступа вызовов речи и данных в интегральной сотовой сети связи, базирующаяся на идее виртуального распределения каналов между разнотипными вызовами. Доступ новых вызовов данных в каналы ограничивается в зависимости от общего числа вызовов данных в соте. Разработан метод расчета показателей качества обслуживания.

**Ключевые слова:** сотовая сеть связи, виртуальное разделение каналов, стратегия доступа, качество обслуживания.

### ВВЕДЕНИЕ

В математической теории телетрафика особенно важны вопросы разработки различных стратегий доступа (Call Admission Control, SAC) и методов расчета их эффективности относительно выбранных критериев качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [1, 2]. Эти проблемы в последние годы достаточно подробно исследовались в многочисленных статьях (см., например, [3–5] и их список литературы), а также в монографиях [6–11].

Основной функцией любой SAC является предотвращение (или минимизация) конфликтных ситуаций, возникающих вследствие борьбы за занятие ресурсов сети, и удовлетворение заданных требований к показателям QoS разнотипных вызовов.

В интегральных сотовых сетях связи (ССС) (иногда они называются сетями следующих поколений — Next Generation Networks, NGN) различают вызовы реального (например, вызовы речи) и нереального времени (например, вызовы данных). В таких сетях без буферизации зачастую используются SAC, основанные либо на резервировании каналов для вызовов реального времени, либо на ограничении доступа вызовов нереального времени за счет введения верхнего предела на их количество в соте. В этих SAC все каналы соты в равной степени доступны для вызова любого типа.

Для уменьшения возможности возникновения конфликтных ситуаций эффективно используются стратегии доступа, основанные на схемах разделения всего пула каналов между разнотипными вызовами. Анализ доступной литературы показал, что модели интегральных СССР с такими стратегиями доступа недостаточно исследованы. При этом изолированное (жесткое) разделение каналов не всегда эффективно [12] и поэтому требуются другие схемы разделения. Неизолированные схемы разделения каналов в СССР с одним трафиком (сети второго поколения) предложены в [13] и [9, гл. 1, с. 18, 19]. Особенность этих схем состоит в том, что разделение каналов в них нежесткое, т.е. используется схема виртуального разделения каналов (Virtual Partitioning, VP).

В настоящей работе предложена новая многопараметрическая стратегия доступа для моделей интегральных СССР, основанная на схеме виртуального разделения каналов. Показано, что стационарное распределение вероятностей состояний двумерной цепи Маркова (ЦМ), которая является математической моделью изучаемой сети, имеет мультипликативный вид. Разработан точный алгоритм расчета показателей QoS разнотипных вызовов при использовании предложенной стратегии доступа.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики (Грант № EIF-RITN-MQM-2-2013-7(13)-29/01/1).

## ОПИСАНИЕ VP-СХЕМЫ РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ

В интегральной ССС обрабатываются четыре пуассоновских потока вызовов, т.е. кроме новых вызовов речи (*ov*-вызовы) и данных (*od*-вызовы), имеются еще хэндовер вызовы речи (*hv*-вызовы) и данных (*hd*-вызовы). Интенсивность  $x$ -вызовов обозначается  $\lambda_x, x \in \{hv, ov, hd, od\}$ .

Базовая станция изолированной соты интегральной ССС имеет  $N > 1$  радио-каналов. Весь пул каналов виртуально разделен на две группы: ровно  $N_v$  каналов из общего числа  $N$  каналов выделяются лишь для речевых вызовов ( $v$ -вызовы), а остальные  $N_{vd} = N - N_v$  каналов используются совместно вызовами речи и данных ( $d$ -вызовы). Иными словами, весь пул из  $N$  каналов делится на две зоны: индивидуальную из  $N_v$  каналов ( $v$ -зона лишь для  $v$ -вызовов) и общую из  $N_{vd}$  каналов ( $vd$ -зона для  $v$ - и  $d$ -вызовов). Виртуальность разделения заключается в следующем: по завершении обработки  $v$ -вызова освобожденный канал, находящийся в  $v$ -зоне, передается в  $vd$ -зону при наличии там  $v$ -вызова, а канал в  $vd$ -зоне, осуществляющий обработку  $v$ -вызова, закрепляется за  $v$ -зоной.

Функции распределения времени занятия каналов разнотипными вызовами являются экспоненциальными, среднее время занятия канала для одного речевого вызова (нового или хэндовер) равно  $1/\mu_v$ , а соответствующий показатель для вызовов данных (новых или хэндовер) равен  $1/\mu_d$ . Идентичность средних времен занятия каналов новых и хэндовер вызовов обоих типов объясняется отсутствием памяти экспоненциального распределения.

Доступ  $v$ -вызовов осуществляется следующим образом. Если в момент поступления *ov*-вызова имеется хотя бы один свободный канал в  $v$ -зоне, то он занимает любой свободный канал этой зоны; в противном случае этот вызов теряется (получает отказ). Если в момент поступления *hv*-вызова имеется хотя бы один свободный канал в  $v$ -зоне, то он занимает любой свободный канал этой зоны. Иначе свободный канал ищется в  $vd$ -зоне, при этом имеется ограничение на максимальное число  $v$ -вызовов в этой зоне, т.е. максимальное число *hv*-вызовов в  $vd$ -зоне равно  $R_{hv}, 1 \leq R_{hv} \leq N_{vd}$ . Если в момент поступления  $v$ -вызова все каналы  $v$ -зоны заняты и максимальное число  $v$ -вызовов в  $vd$ -зоне равно  $R_{hv}$ , то он теряется. Отметим, что функция распределения времени занятия канала *hv*-вызовом в  $vd$ -зоне также является экспоненциальной с тем же средним  $1/\mu_v$ .

Доступ  $d$ -вызовов осуществляется следующим образом. Если в момент поступления *hd*-вызова имеется хотя бы один свободный канал в  $vd$ -зоне, то этот вызов принимается для обработки; иначе он теряется. Если поступивший вызов относится к классу *od*-вызовов, то он получает доступ к каналу лишь тогда, когда общее количество  $d$ -вызовов в этой зоне меньше величины  $R_{od}, 1 \leq R_{od} \leq N_{vd} - 1$ ; в противном случае *od*-вызов теряется.

Основными показателями QoS разнотипных вызовов при использовании данной стратегии доступа являются вероятности их потери. Вероятность потери  $x$ -вызовов обозначается как  $P_x, x \in \{hv, ov, hd, od\}$ . Проблема состоит в нахождении этих параметров.

## МЕТОД РАСЧЕТА МОДЕЛИ

Поскольку времена обработки разнотипных вызовов различны, состояние системы в произвольный момент времени определяется двумерным вектором  $\mathbf{n} = (n_d, n_v)$ , где  $n_d$  и  $n_v$  указывают соответственно суммарное число  $d$ -вызовов и  $v$ -вызовов в каналах. Фазовое пространство состояний (ФПС) соответствующей двумерной ЦМ задается как

$$S = \{\mathbf{n} : n_d = 0, 1, \dots, N_{vd}; n_v = 0, 1, \dots, N_v + R_{hv}; n_d + n_v \leq N\}. \quad (1)$$

С учетом предложенной стратегии доступа разнотипных вызовов получаем, что неотрицательные элементы инфинитезимальной матрицы ( $Q$ -матрицы) данной ЦМ  $q(\mathbf{n}, \mathbf{n}')$ ,  $\mathbf{n}, \mathbf{n}' \in S$ , определяются из следующих соотношений:

$$q(\mathbf{n}, \mathbf{n}') = \begin{cases} \lambda_d, & \text{если } n_d < N_{od}, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_1, \\ \lambda_{hd}, & \text{если } n_d \geq N_{od}, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_1, \\ \lambda_v, & \text{если } n_v < N_v, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_2, \\ \lambda_{hv}, & \text{если } N_v \leq n_v < N_v + R_{hv}, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_2, \\ n_d \mu_d, & \text{если } \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_1, \\ n_v \mu_v, & \text{если } \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_2, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\lambda_d := \lambda_{od} + \lambda_{hd}$ ,  $\mathbf{e}_1 = (1, 0)$ ,  $\mathbf{e}_2 = (0, 1)$ .

Нетрудно убедиться в том, что данная конечномерная цепь является неприводимой, и потому в ней существует стационарный режим. Пусть  $p(\mathbf{n})$  означает стационарную вероятность состояния  $\mathbf{n} \in S$ .

Искомые показатели QoS соты определяются как соответствующие маргинальные распределения данной двумерной цепи. Так,  $ov$ -вызовы теряются, если в момент их поступления все каналы  $v$ -зоны заняты, т.е.

$$P_{ov} = \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) \delta(n_v, N_v), \quad (3)$$

где  $\delta(i, j)$  — символы Кронекера.

Поскольку  $hv$ -вызовы теряются либо если в момент их поступления в каналах уже имеются  $R_{hv}$  вызовов данного типа независимо от общего количества занятых каналов соты, либо если в этот момент все его каналы заняты, имеем

$$P_{hv} = \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) (\delta(n_v, R_{hv}) (1 - \delta(n_d + n_v, N_{vd})) + (1 - \delta(n_v, R_{hv})) \delta(n_d + n_v, N_{vd})). \quad (4)$$

Рассуждая аналогично, находим, что вероятности потери  $od$ -вызовов и  $hd$ -вызовов определяются так:

$$P_{od} = \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) I(n_d \geq R_{od}), \quad (5)$$

$$P_{hd} = \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) \delta(n_d + n_v, N_{vd}), \quad (6)$$

где  $I(A)$  — индикаторная функция события  $A$ .

Для нахождения показателей качества обслуживания (4)–(6) потребуется вычисление вероятностей состояний, которые удовлетворяют соответствующей системе уравнений глобального равновесия (СУГР). С учетом соотношений (3) можно показать, что данная СУГР имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (\lambda_d I(n_d < R_{od}) + \lambda_{hd} I(R_{od} \leq n_d < N_{vd}) + \lambda_{ov} I(n_v < N_v) + \\ & + \lambda_{hv} I(n_v < R_{hv}) + n_d \mu_d + n_v \mu_v) p(\mathbf{n}) = \lambda_d p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_1) I(0 < n_d \leq R_{od}) + \\ & + \lambda_{hd} p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_1) I(R_{od} < n_d \leq N_{vd}) + \lambda_{ov} p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_2) I(0 < n_v \leq N_v) + \\ & + \lambda_{hv} p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_2) I(n_v > 0) + (n_d + 1) \mu_d p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_1) I(n_d < N_{vd}) + \\ & + \mu_v p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_2) I(n_v < R_{hv}). \end{aligned} \quad (7)$$

К этой СУГР добавляется условие нормировки

$$\sum_{n \in S} p(n) = 1. \quad (8)$$

Отметим, что размерность системы уравнений (7), (8) определяется размерностью ФПС (1), следовательно, как для всех моделей большой размерности, ее решение связано с известными трудностями. Однако эту проблему можно обойти, используя справедливость следующего утверждения.

**Утверждение.** Стационарное распределение вероятностей состояний данной модели при использовании VP-схемы разделения каналов имеет следующий вид:

- для случая  $R_{od} \leq N_{vd} - R_{hv}$

$$p(i, j) = \begin{cases} \frac{\nu_d^i \cdot \nu_v^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } 0 \leq i \leq R_{od}, \\ & 0 \leq j \leq N_v, \\ \left(\frac{\nu_d}{\nu_{hd}}\right)^{R_{od}} \cdot \frac{\nu_{hd}^i \cdot \nu_v^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } R_{od} + 1 \leq i \leq N_{vd}, \\ & 0 \leq j \leq N_v, \\ \left(\frac{\nu_v}{\nu_{hv}}\right)^{N_v} \cdot \frac{\nu_d^i \cdot \nu_{hv}^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } 0 \leq i \leq R_{od}, \\ & N_v + 1 \leq j \leq N_v + R_{hv}, \\ \left(\frac{\nu_d}{\nu_{hd}}\right)^{R_{od}} \cdot \left(\frac{\nu_v}{\nu_{hv}}\right)^{N_v} \cdot \frac{\nu_{hd}^i \cdot \nu_{hv}^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } R_{od} + 1 \leq i \leq N_{vd} - 1, \\ & N_v + 1 \leq j \leq \min(N_v + R_{hv}, N - i); \end{cases} \quad (9)$$

- для случая  $R_{od} > N_{vd} - R_{hv}$

$$p(i, j) = \begin{cases} \frac{\nu_d^i \cdot \nu_v^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } 0 \leq i \leq R_{od}, \\ & 0 \leq j \leq N_v, \\ \left(\frac{\nu_d}{\nu_{hd}}\right)^{R_{od}} \cdot \frac{\nu_{hd}^i \cdot \nu_v^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } R_{od} + 1 \leq i \leq N_{vd}, \\ & 0 \leq j \leq N_v, \\ \left(\frac{\nu_v}{\nu_{hv}}\right)^{N_v} \cdot \frac{\nu_d^i \cdot \nu_{hv}^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } 0 \leq i \leq R_{od}, \\ & N_v + 1 \leq j \leq \min(N_v + R_{hv}, N - i), \\ \left(\frac{\nu_d}{\nu_{hd}}\right)^{R_{od}} \cdot \left(\frac{\nu_v}{\nu_{hv}}\right)^{N_v} \cdot \frac{\nu_{hd}^i \cdot \nu_{hv}^j}{i! \cdot j!} \cdot p(0,0), & \text{если } R_{od} + 1 \leq i \leq N_{vd} - 1, \\ & N_v + 1 \leq j \leq N - i, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\nu_v = \lambda_v / \mu_v$ ,  $\nu_{hv} = \lambda_{hv} / \mu_v$ ,  $\nu_d = \lambda_d / \mu_d$ ,  $\nu_{hd} = \lambda_{hd} / \mu_d$ ,  $p(0, 0)$  находится из условия нормировки, т.е.  $\sum_{n \in S} p(n) = 1$ .

Для доказательства справедливости этого факта составим систему уравнений локального равновесия (СУЛР) относительно соотношения (2) и покажем, что (9) и (10) являются решением СУЛР и, следовательно, СУГР.

В общем случае СУЛР имеет вид

$$q(n, n')p(n) = q(n', n)p(n'), \quad n, n' \in S. \quad (11)$$

Используя выражение (2), записываем СУЛР (11) в явном виде. Рассмотрим случай  $R_{od} \leq N_{vd} \leq R_{hv}$ . Тогда с учетом (2) из (11) получаем, что, например,

для любых двух возможных состояний типа  $\mathbf{n}, \mathbf{n} + \mathbf{e}_1 \in \mathcal{S}$  в случаях  $R_{od} + 1 \leq n_d \leq N_{vd} - 1$  и  $0 \leq n_v \leq N_v$  СУЛР записывается так

$$\lambda_d p(n_d, n_v) = (n_d + 1) \mu_d p(n_d + 1, n_v). \quad (12)$$

Теперь можно убедиться, что (9) является решением СУЛР (12). Действительно, из выражения (9) получим (см. вторую строку в формуле (9))

$$p(n_d + 1, n_v) = \left( \frac{\nu_d}{\nu_{hd}} \right)^{R_{od}} \frac{\nu_{hd}^{n_d+1}}{(n_d + 1)!} \cdot \frac{\nu_v^{n_v}}{n_v!} \cdot p(0, 0). \quad (13)$$

Тогда из выражений (9) и (13) имеем

$$\frac{p(n_d + 1, n_v)}{p(n_d, n_v)} = \frac{\nu_d}{n_d + 1} = \frac{\lambda_d}{(n_d + 1) \mu_d},$$

т.е. (9) является решением СУЛР (11).

Аналогично уравнение локального баланса для состояний типа  $\mathbf{n}, \mathbf{n} + \mathbf{e}_2 \in \mathcal{S}$  в случаях  $R_{od} + 1 \leq n_d \leq N_{vd} - 1$  и  $0 \leq n_v \leq N_v$  имеет вид

$$\lambda_v p(n_d, n_v) = (n_v + 1) \mu_v p(n_d, n_v + 1).$$

Теперь также на основе (9) можно показать, что оно является решением (13). Рассуждая аналогично, легко видеть, что для всех возможных состояний из ФПС (1) формулы (9) и (10) определяют решения соответствующих СУЛР, следовательно, (9) и (10) являются решением СУГР (7), (8).

Отметим, что нахождение явного вида мультипликативного решения (9) основано на теореме Колмогорова [14] об обратимости двумерных цепей Маркова. Действительно, применяя эту теорему, можно показать, что в данной цепи существует нулевая циркуляция между ее состояниями типа  $\mathbf{n}, \mathbf{n} + \mathbf{e}_1, \mathbf{n} + \mathbf{e}_2$ , т.е. удовлетворяется условие локального баланса. Тогда, выбрав путь  $(0, 0), (1, 0), \dots, (i, 0), (i, 1), \dots, (i, j)$  между состояниями  $(0, 0)$  и  $(i, j)$ , убедимся, что мультипликативное решение (9) и (10) верно.

Таким образом, после определения вероятностей состояний из соотношений (9) вычисляются искомые показатели QoS (3)–(6).

#### ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанные алгоритмы позволяют изучать поведение показателей QoS относительно изменения структурных и нагрузочных параметров модели соты при использовании предложенной схемы разделения каналов. Однако в настоящей статье приведен лишь анализ показателей QoS изучаемой модели соты относительно изменения параметров предложенной схемы разделения каналов, при этом нагрузочные параметры модели считаются фиксированными. Далее предполагается, что число каналов в каждой зоне фиксировано, а варьируются параметры  $R_{hw}$  и  $R_{od}$ .

Исходные данные модели выбирались так [3]:  $N = 30$ ,  $\lambda_{ov} + \lambda_{hw} = 0.15$  вызов/с,  $\lambda_{od} + \lambda_{hd} = 0.3$  вызов/с,  $\mu_v^{-1} = 2$  с,  $\mu_d^{-1} = 120$  с. Предполагается, что  $N_v = 12$ ,  $N_{vd} = 18$  и 30 % всего трафика речевых вызовов составляют хэндовер вызовы речи, а 80 % трафика данных — новые данные.

На рис. 1 показана зависимость показателей QoS от изменения параметра  $R_{hw}$  при  $R_{od} = 9$ . Функция  $P_{B_{ov}}$  является почти постоянной, т.е. при малых значениях параметра  $R_{hw}$  она растет с очень малой скоростью, а уже при  $R_{hw} \geq 7$  она практически не изменяется (см. рис. 1, а). Вместе с тем функция  $P_{hw}$  убывает с достаточно большой скоростью при малых значениях параметра  $R_{hw}$ , а уже при  $R_{hw} \geq 5$  она также практически не изменяется. Эти свойства указанных функций были ожидаемыми, так как с увеличением значений параметра  $R_{hw}$  увеличиваются лишь шансы хэндовер вызовов речи на принятие их на обработку. Отметим, что функция  $P_{hw}$  почти кусочно-линейная и имеет достаточно большую скорость убывания, особенно при малых значениях параметра  $R_{hw}$  (см. рис. 1, а).

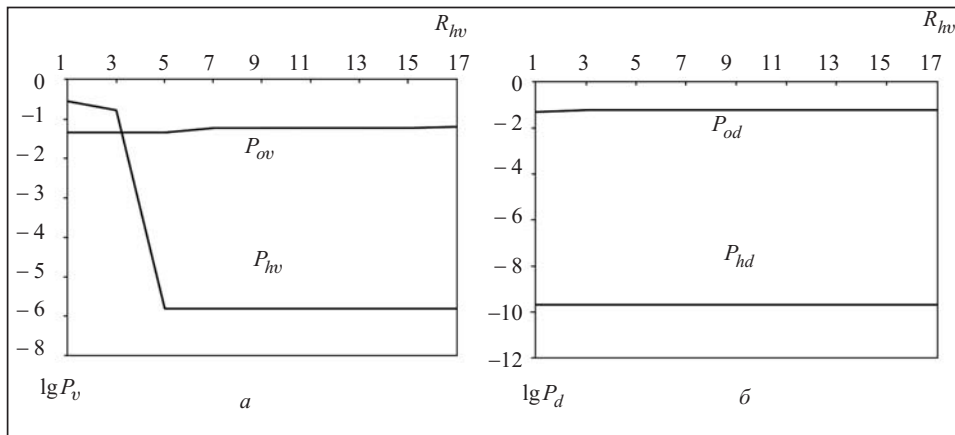


Рис. 1. Зависимость вероятности потери вызовов речи (а) и вызовов данных (б) от параметра  $R_{hv}$

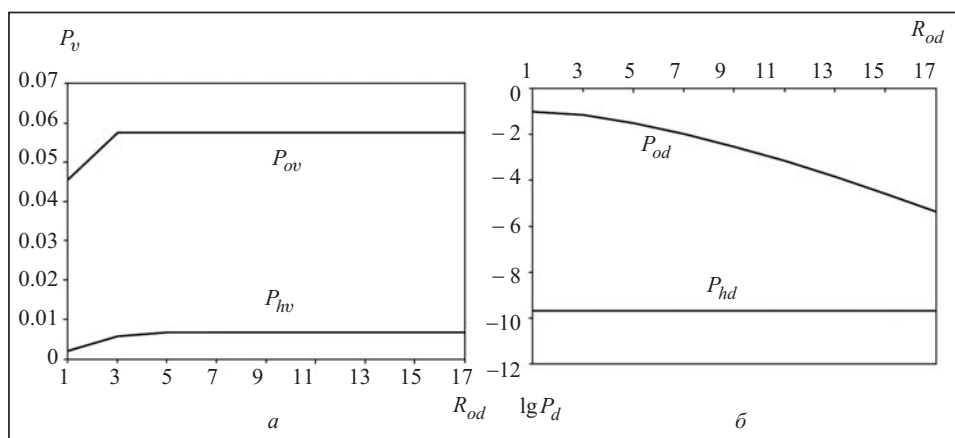


Рис. 2. Зависимость вероятности потери вызовов речи (а) и вызовов данных (б) от параметра  $R_{od}$

Оба показателя QoS для вызовов данных являются неубывающими функциями относительно изменения параметра  $R_{hv}$  (см. рис. 1, б). Однако скорости роста этих функций очень низкие, т.е. они почти постоянные, особенно при больших значениях указанного параметра. Эти факты объясняются следующим образом: для исследуемой модели интенсивность поступления вызовов речи существенно меньше интенсивности поступления вызовов данных и одновременно интенсивность обработки вызовов данных существенно больше интенсивности обработки вызовов речи.

На рис. 2 показана зависимость показателей QoS от изменения параметра  $R_{od}$  при  $R_{hv} = 9$ . Здесь в отличие от зависимости для параметра  $R_{hv}$  функция  $P_{ov}$  увеличивается с достаточно большой скоростью при малых значениях параметра  $R_{od}$ , а потом уже при  $R_{hv} \geq 5$  она становится постоянной. Аналогичное поведение имеет функция  $P_{hv}$ , т.е. она также является неубывающей функцией, так как увеличение значений параметра  $R_{od}$  приводит к уменьшению шансов принятия вызовов речи для обработки в  $vd$ -зону (см. рис. 2, а). В данном случае функция  $P_{od}$  убывает с достаточно большой скоростью при больших значениях параметра  $R_{od}$ , в то время как функция  $P_{hd}$  имеет очень низкую скорость изменения (убывания), т.е. она является почти постоянной величиной (см. рис. 2, б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая схема разделения каналов в интегральных сотовых сетях связи, в которых осуществляется обработка речевых вызовов и вызовов данных. Согласно данной схеме разделения каналов весь пул каналов виртуально разделен между разнотипными вызовами, при этом хэндовер вызовы речи могут использовать каналы другой зоны, если число вызовов такого типа в этой зоне не превышает определенного порога. Вызовы данных получают доступ в каналы только в своей зоне каналов, при этом новые вызовы данных принимаются, если число таких вызовов в каналах меньше определенной величины. Решена задача расчета показателей QoS системы при заданных значениях числа каналов, нагрузок разнотипных вызовов и параметров введенной схемы разделения каналов. Результаты решения этих задач можно использовать для нахождения оптимальных (в известном смысле) значений параметров предложенной схемы в целях удовлетворения заданных уровней качества обслуживания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basharin G.P., Samouylov K.E., Yarkina N.V., Gudkova I.A. A new stage in mathematical teletraffic theory // Autom. Remote Control. — 2009. — **70**, N 12. — P. 1954–1964.
2. Schneps-Schneppe M., Iversen V.B. Call admission control in cellular networks // Mobile Networks (Ed. J.H. Ortiz). — Intech. — 2012. — P. 111–136.
3. Performance analysis of multi-service wireless network: An approach integrating CAC, scheduling, and buffer management / G.H.S. Carvalho, V.S. Martins, C.R.L. Frances, J.C.W.A. Costa, S.V. Carvalho // Comput. & Electr. Engin. — 2008. — **34**. — P. 346–356.
4. Oh Y., Kim C.S., Melikov A.Z., Fattakhova M.I. Numerical analysis of multiparameter strategy of access in multiservice cellular communication networks // Autom. Remote Control. — 2010. — **71**, N 12. — P. 2558–2572.
5. Melikov A.Z., Kim C.S., Ponomarenko L.A. Numerical investigation of a multi-threshold access strategy in multiservice cellular wireless networks // Cybernetics and System Analysis. — 2009. — **45**, N 5. — P. 680–691.
6. Башарин Г.П. Математическая теория телеграфика. — М.: РУДН, 2004. — 190 с.
7. Akimura H., Kawashima M. Teletraffic: Theory and applications. — 2nd Edition. — London: Springer-Verlag, 1999. — 225 p.
8. Daigle J.N. Queueing theory with applications to packet telecommunication. — Boston: Springer, 2005. — 316 p.
9. Ponomarenko L., Kim C.S., Melikov A. Performance analysis and optimization of multi-traffic on communication networks. — Heidelberg; Dordrecht; London; New York: Springer, 2010. — 208 p.
10. Stasiak M., Głabowski M., Wishniewski A., Zwierzykowski P. Modeling and dimensioning of mobile networks: From GSM to LTE. — New York: John Wiley, 2011. — 340 p.
11. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. Introduction to queueing systems with telecommunication applications. — New York; Heidelberg; Dordrecht; London: Springer, 2013. — 385 p.
12. Feng W., Kowada M. Performance analysis of wireless mobile networks with queueing priority and guard channels // Intern. Trans. in Oper. Research. — 2008. — **15**. — P. 481–508.
13. Melikov A.Z., Fattakhova M.I., Babayev A.T. Investigation of cellular communication networks with private channels for service of handover calls // Automatic Control and Comput. Sci. — 2005. — **39**, N 3. — P. 61–69.
14. Kelly F.P. Reversibility and stochastic networks. — New York: John Wiley & Sons, 1979. — 233 p.

*Поступила 26.03.2014*