

УДК 004.738

## НАХОЖДЕНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ПРОТОКОЛА ТИПА X.25 С КУМУЛЯТИВНОЙ КВИТАНЦИЕЙ В АСИММЕТРИЧНОМ РАДИОТРАКТЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ТРЕБУЕМОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ ДОСТАВКИ МНОГОПАКЕТНОГО СООБЩЕНИЯ

**Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Лягин М.А.**

*Военная академия РВСН имени Петра Великого, филиал, Серпухов, e-mail: varvsn-serp@mil.ru*

Рассматривается асимметричный радиотракт передачи данных типа «точка – точка», включающий прямое и обратное направления, которые однородны по вероятности битовой ошибки. При этом в данном тракте реализован протокол доставки многопакетных сообщений типа X.25 с кумулятивной квитанцией. Многопакетное сообщение на передающей стороне разделяется на совокупность пакетов, а на приемной стороне данная совокупность пакетов объединяется в общее сообщение, выдаваемое получателю. Квитирование совокупности принятых пакетов осуществляется по обратному каналу кумулятивной квитанцией. На основе поглощающих конечных марковских цепей строится математическая модель процесса доставки многопакетного сообщения произвольного размера по данному радиотракту передачи данных, учитывающая все системные параметры прямого и обратного каналов. На этой основе находятся вероятностно-временные характеристики процесса доставки, характеризующие свойство своевременности. При этом искомый процесс описывается ситуационными двудольными графами, которые учитывают количество передаваемых кадров, количество повторов каждого кадра, применение способа «скользящего окна» и при этом содержат два поглощающих состояния: состояние доведения и состояние недоведения. Показывается, что такой тип графа позволяет получать вероятности поглощающих состояний в аналитическом виде, что, в свою очередь, позволяет применять известные методы оптимизации параметров процесса доставки при ограничениях заказчика на вероятностно-временные характеристики при минимальных скоростных затратах прямого и обратного каналов рассматриваемого радиотракта. В ходе исследований показано, что разработанный научно-методический аппарат адекватно описывает процесс доставки многопакетных сообщений в рассматриваемой системе передачи данных, работающей по протоколу типа X.25 с кумулятивной квитанцией, и позволяет найти границы применимости данного протокола.

**Ключевые слова:** протокол X.25, информационный обмен, система передачи данных, решающая обратная связь, многопакетное сообщение, кумулятивная квитанция, границы применимости

## FINDING OF BORDERS OF APPLICABILITY OF THE REPORT OF TYPE X.25 WITH THE CUMULATIVE RECEIPT IN THE DISSYMETRIC RADIO PATH OF DATA TRANSMISSION AT DEMANDED RELIABILITY AND EFFICIENCY OF DELIVERY OF THE MULTIPACKAGE MESSAGE

**Tsimbal V.A., Toiskin V.E., Lyagin M.A.**

*Military Academy of Strategic Missile Forces of Peter the Great, branch, Serpukhov, e-mail: varvsn-serp@mil.ru*

The asymmetric radio path of data transmission of type «the point-point», including direct and return directions which are homogeneous for probability of a bit error is considered. Thus, in the given path the report of delivery of multipackage messages of type X.25 with the cumulative receipt is realised. The multipackage message on the transferring party is divided into set of packages, and on the reception party the given set of packages unites in the general message which is given out to the addressee. Kvitirovanie sets of the accepted packages it is carried out on the return channel by the cumulative receipt. On the basis of absorbing final markov's chains the mathematical model of process of delivery of the multipackage message of any size on the given radio path of the data transmission, considering all system parametres of direct and return channels is under construction. On this basis there are likelihood-time characteristics of process the deliveries characterising property of timeliness. Thus required process is described situational two part by columns who consider quantity of transferred shots, quantity of repetitions of each shot, application of a way of «a sliding window» and thus contain two absorbing conditions: a condition of finishing and a condition unfinished. It is shown that such type of the count allows to receive probabilities of absorbing conditions in an analytical kind that, in turn, allows to apply known methods of optimisation of parametres of process of delivery at restrictions of the customer on likelihood-time characteristics at the minimum high-speed expenses of direct and return channels of a considered radio path. During researches it is shown that the developed scientifically-methodical device adequately describes process of delivery of multipackage messages in considered system of the data transmission working under the report of type X.25 with the cumulative receipt and also allows to find borders of applicability of the given report.

**Keywords:** report X.25, an information exchange, data transmission system, solving feedback, the multipackage message, the cumulative receipt, applicability borders

В данном исследовании рассматривается радиотракт передачи данных направления «борт – земля», предназначенный для доставки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) дискретного сообщения значи-

тельной ёмкости в центр управления полетами (ЦУП), причем доставка должна быть реализована с высокой своевременностью, оцениваемой вероятностно-временными характеристиками (ВВХ). Отметим, что

под ВВХ понимается вероятность доставки фиксированного объема информации за время, не превышающее заданное [1–4].

Рассматриваемый радиотракт является двусторонним, содержащим прямой и обратный канал передачи данных (КПД), при этом по прямому КПД передаются пакеты (кадры), а по обратному – кумулятивные квитанции на совокупности успешно принятых пакетов (кадров). Длина кадра  $L_k$  гораздо больше длины квитанции  $L_{kv}$ , поэтому

Найти:

$$\{V_{\text{ПИ(пр)}}^*, V_{\text{ПИ(обр)}}^*\} = \underset{\{V_{\text{ПИ(пр)}}, V_{\text{ПИ(обр)}}\}}{\operatorname{argmin}} \left( V_{\text{ПИ(пр)}} + V_{\text{ПИ(обр)}} \right) \quad (1)$$

при ограничениях на ВВХ доведения МПС общей емкостью  $I$  бит,  $P_{\text{дов}}(t \leq T_{\text{дов}}^{\text{доп}}) \geq P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$

где  $P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$  – требуемая вероятность доведения МПС;  $T_{\text{дов}}^{\text{доп}}$  – допустимое время доведения МПС;  $P_{\text{дов}}(t \leq T_{\text{дов}}^{\text{доп}})$  – вероятность доведения МПС за время, не превышающее  $T_{\text{дов}}^{\text{доп}}$ .

Использование кумулятивной квитанции предусматривает использование «скользящего окна», под которым понимается количество кадров (пакетов), которое можно передать без квитирования в зависимости от помеховой обстановки. Согласно ГОСТ Р. 34.950-92 в протоколе X.25 предусматриваются различные факультативные услуги, позволяющие на пакетном уровне синтезировать систему передачи данных (СПД), по ВВХ удовлетворяющую требованиям заказчика. Перед сеансом связи между абонентами происходит согласование параметров управления потоком, которыми являются размер пакета и размер окна («скользящего окна»). Использование данной факультативной услуги доступно на определенный период времени для виртуальных соединений (если она абонируется). По умолчанию стандартным значением размера окна в рассматриваемом протоколе является  $u = 2$  кадрам. Также существует возможность установки нестандартных значений окна при использовании соответствующей факультативной услуги. Значения, отличные от рекомендуемых размеров окна, могут быть согласованы для каждого виртуального соединения. В нашем случае таковыми виртуальными соединениями являются прямой и обратный КПД. В данном исследовании длина «скользящего окна» равна  $u_{sk} = 5$ . Количество повторов каждого передаваемого кадра –  $g = 1$  и  $g = 3$ .

Теоретической основой для исследования процесса доставки многопакетного сообщения (МПС) по протоколу X.25 с кумулятивной квитанцией фиксированной величины приняты поглощающие конечные

прямой КПД должен быть высокоскоростным, а обратный КПД – низкоскоростным. Таким образом, рассматриваемый радиотракт является асимметричным трактом передачи данных (АТПД) [4, 5].

Ставится и решается задача нахождения минимально достаточных скоростей в прямом и обратном АТПД, обеспечивающих заданные ВВХ доставки объема информации  $I$ , представленного в виде МПС. Формальная постановка задачи имеет вид

марковские цепи (ПКМЦ) [5–7]. При этом для описания искомого процесса используются ситуационные двудольные графы, содержащие совокупность переходных состояний и два поглощающих состояния, одно из которых является состоянием недоставки сообщения (неуспеха), а второе – состоянием доведения сообщения (успеха) [8]. Для удобства пользования таким подходом в исследовании приняты следующие обозначения для анализируемой СПД: « $u_{sk}$ -u-g», где  $u_{sk}$  – размер «скользящего окна»;  $u$  – количество кадров, на которое делится исходный массив информации;  $g$  – допустимое количество повторов каждого передаваемого кадра.

Для решения задачи (1) рассмотрим СПД типа 5-5-1, в которой используется «скользящее окно» длиной в пять кадров, доставка которых квитирована кумулятивной квитанцией. При этом обозначим БПЛА как ЗПД-отправитель, а ЦУП как ЗПД-получатель.

Ситуационный двудольный граф, отображающий процесс доставки пятипакетного МПС с кумулятивной квитанцией, представлен на рис. 1. Семантика состояний этого графа, такова:  $S_1$  – ЗПД-отправитель выдало пять кадров, которые на ЗПД-получателе не приняты;  $S_2$  – ЗПД-получатель принял переданные пять кадров и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_3$  – ЗПД-получатель приняло четыре из пяти переданных кадров и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_4$  – ЗПД-получатель приняло три из пяти переданных кадров и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_5$  – ЗПД-получатель приняло два из пяти переданных кадров и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_6$  – ЗПД-получатель приняло один из пяти переданных кадров и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_7$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени

передачи пяти очередных кадров и переход к покадровой передаче;  $S_8$  – ЗПД-отправитель выдало очередной кадр из пяти оставшихся, которые на ЗПД-получателе не приняты;  $S_9$  – ЗПД-получатель приняло очередной кадр и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_{10}$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени передачи очередного кадра;  $S_{11}$  – ЗПД-отправитель выдало кадр из четырех оставшихся, которые на ЗПД-получателе не приняты;  $S_{12}$  – ЗПД-получатель приняло очередной кадр и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_{13}$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени передачи очередного кадра;  $S_{14}$  – ЗПД-отправитель выдало очередной кадр из трех оставшихся, которые на ЗПД-получателе не приняты;  $S_{15}$  – ЗПД-получатель приняло очередной кадр и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_{16}$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени передачи очередного кадра;  $S_{17}$  – ЗПД-отправитель выдало очередной кадр из двух оставшихся, которые на ЗПД-получателе не приняты;  $S_{18}$  – ЗПД-получатель приняло очередной кадр и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_{19}$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени передачи очередного кадра;  $S_{20}$  – ЗПД-отправитель выдало последний оставшийся кадр, который на ЗПД-получателе не принят;  $S_{21}$  – ЗПД-получатель приняло очередной кадр и выдало в ответ кумулятивную квитанцию;  $S_{22}$  – фиктивное состояние, обозначающее завершение времени передачи очередного кадра;  $S_{23}$  – ЗПД-отправитель квитанцию не получило, канал, по которому была передача, бракуется;  $S_{24}$  – ЗПД-отправитель квитанцию получило, передача кадров завершена.

В рассматриваемом графе состояния  $S_7, S_{10}, S_{13}, S_{16}, S_{19}, S_{22}$  являются фиктивными, и вероятности перехода в последующие из них состояния определяются так:  $p_{78} = p_{1023} = p_{1323} = p_{1623} = p_{1923} = p_{2223} = 1$ . При этом в рассматриваемом графе недоведению кадра соответствует состояние  $S_{23}$ , а доведению кадра – состояние  $S_{24}$ .

Вероятность доставки одного кадра за один повтор, а также вероятность доведения квитанции о правильности доставки переданных кадров рассчитываются по следующим формулам [8, 9]:

$$p_k = (1 - p_0)^{L_k}, \quad (2)$$

$$p_{kb} = (1 - p_0)^{L_{kb}}, \quad (3)$$

где  $L_k$  – длина кадра,  $L_{kb}$  – длина кумулятивной квитанции. Отметим, что помехоустойчивое кодирование здесь не учитывается, что не влияет на общность подхода.

Переходные вероятности МПВ находят так. Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$  возможен тогда, когда пять кадров, переданные ЗПД-отправителем, получены на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{12} = C_5^5 p_k^5 (1 - p_k)^0$ .

Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_3$  возможен тогда, когда четыре из пяти кадров, переданных ЗПД-отправителем, получены на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{13} = C_5^4 p_k^4 (1 - p_k)^1$ . Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_4$  возможен тогда, когда три из пяти кадров, переданных ЗПД-отправителем, получены на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{14} = C_5^3 p_k^3 (1 - p_k)^2$ . Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_5$  возможен тогда, когда два из пяти кадров, переданных ЗПД-отправителем, получены на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{15} = C_5^2 p_k^2 (1 - p_k)^3$ . Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_6$  возможен тогда, когда один из пяти кадров, переданных ЗПД-отправителем, получен на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{16} = C_5^1 p_k^1 (1 - p_k)^4$ . Переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_7$  возможен тогда, когда ни один из пяти кадров, переданных ЗПД-отправителем, не получен на приемной стороне. Вероятность такого события равна:  $p_{17} = C_5^0 p_k^0 (1 - p_k)^5$ .

Вероятности успеха  $p_k$  и неуспеха  $q_k$  доставки очередного пакета без использования «скользящего окна», а также доведения  $p_{kb}$  (недоведения  $q_{kb}$ ) кумулятивных квитанций находятся по формулам (2) и (3):

$$p_{89} = p_{1112} = p_{1415} = p_{1718} = p_{2021} = p_k,$$

$$p_{810} = p_{1113} = p_{1416} = p_{1719} = p_{2022} = q_k,$$

$$p_{911} = p_{1214} = p_{1517} = p_{1820} = p_{2124} = p_{kb},$$

$$p_{923} = p_{1213} = p_{1523} = p_{1823} = p_{2123} = q_{kb}.$$

Таким образом, можно рассчитать все компоненты МПВ. Время, которое затрачивается на передачу одного кадра и одной квитанции, находится по формулам

$$t_k = L_k / V_{\text{пн}}, \quad (4)$$

$$t_{kb} = L_{kb} / V_{\text{пн}}. \quad (5)$$

Времена шагов переходов по графу данной ПКМЦ с учетом формул (4) и (5) находятся так:

$$\begin{aligned} t_{12} = t_{13} = t_{14} = t_{15} = t_{16} = t_{17} = 5t, \\ t_{89} = t_{810} = t_{1112} = t_{1113} = t_{1415} = \\ = t_{1416} = t_{1718} = t_{1719} = t_{2021} = t_{2022} = t_k, \\ t_{1111} = t_{1212} = t_k + t_{kb}. \end{aligned}$$

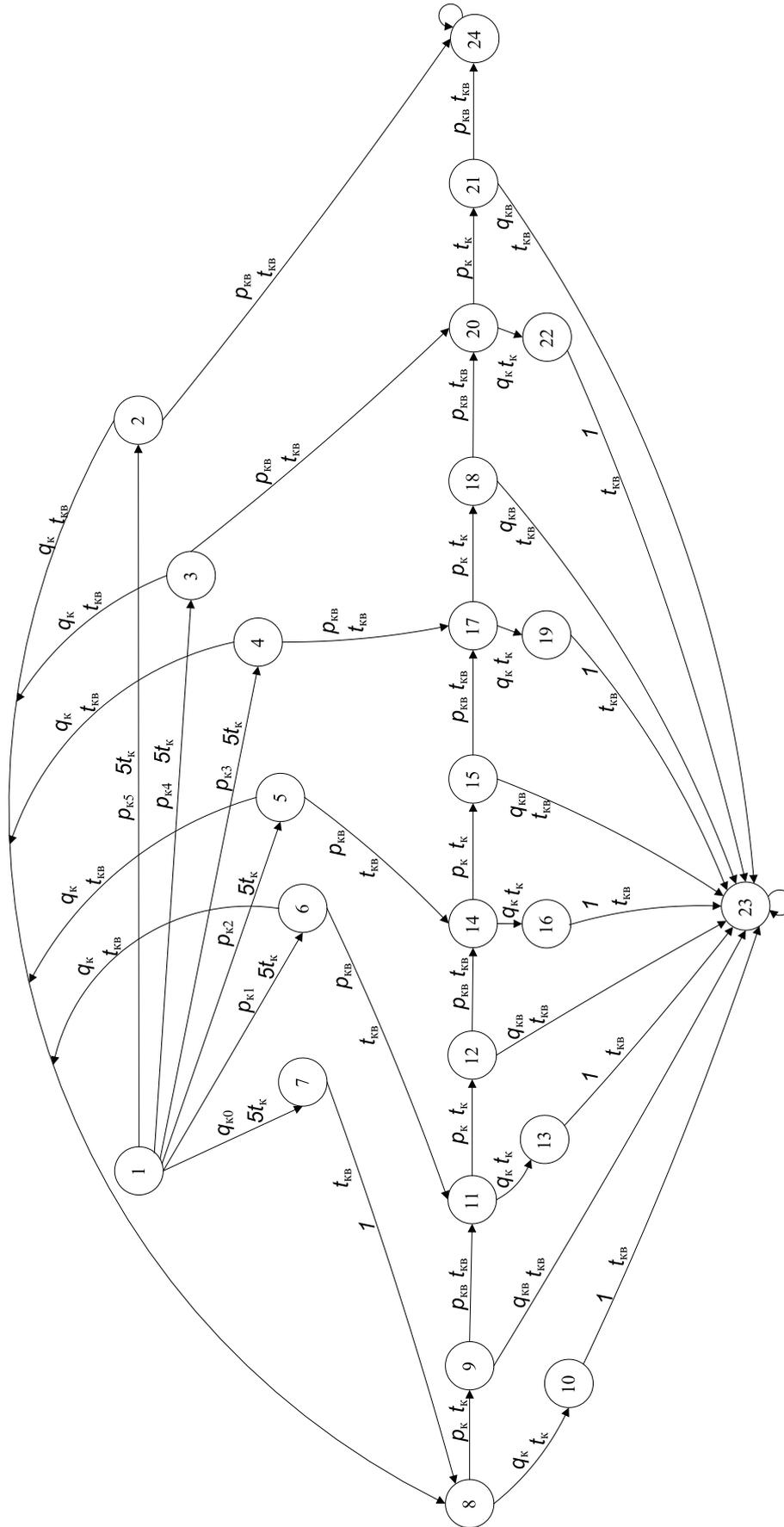


Рис. 1. Ситуационный двудольный граф типа 5-5-1, отображающий процесс доставки пятипакетного МПС с кэшированием по кумулятивной кештанции

Значения времен переходов, равных  $t_{кв}$ , будут следующими:  $t_{28}, t_{38}, t_{48}, t_{58}, t_{68}, t_{78}, t_{224}, t_{320}, t_{417}, t_{514}, t_{611}, t_{28}, t_{911}, t_{923}, t_{1214}, t_{1223}, t_{1517}, t_{1523}, t_{1820}, t_{1823}, t_{2124}, t_{2123}, t_{1023}, t_{1323}, t_{1623}, t_{1923}, t_{2223}$ .

ВВХ доставки пятипакетного МПС определяются в ходе решения уравнения Колмогорова – Чепмена (УКЧ) [1]:

$$P_{(24)}^{(i)} = P_{(24)}^{(0)} P_{[24,24]}^i = P_{(24)}^{(i-1)} P_{[24,24]} \quad (6)$$

где

$$P_{(24)}^{(0)} = \langle P_1^{(0)}, P_2^{(0)}, \dots, P_{23}^{(0)}, P_{24}^{(0)} \rangle,$$

$$P_{(24)}^{(i-1)} = \langle P_1^{(i-1)}, P_2^{(i-1)}, \dots, P_{23}^{(i-1)}, P_{24}^{(i-1)} \rangle,$$

$P_{(24)}^{(i)} = \langle P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_{23}^{(i)}, P_{24}^{(i)} \rangle$  – векторы вероятностей состояний процесса на нулевом шаге,  $(i-1)$ -м и  $i$ -м шагах соответственно;  $P_{[24, 24]}$  – матрица переходных вероятностей (МПВ).

Подчеркнем, что в векторе вероятностей состояний вероятность  $P_{23}$  есть вероятность неуспеха, а вероятность  $P_{24}$  есть вероятность успеха.

Для численных расчетов ВВХ примем следующие исходные данные: длина кадра изменяется в пределах  $L_k = 64 \dots 1000$  бит, длина квитанции фиксирована на сеансе связи и равна  $L_{кв} = 24$  бита, количество кадров в передаваемом МПС равно 5, требуемые ВВХ доставки равны:  $P_{дов}^{треб} = 0,995$ ,  $T_{дов} = 20$  с, вероятности битовой ошибки в прямом и обратном КПД варьируются в пределах  $10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ .

Оптимизационная задача (1) решается методом неопределенных множителей Ла-

гранжа [8–10]. Искомые скорости в прямом и обратном каналах как результат ее решения имеют вид

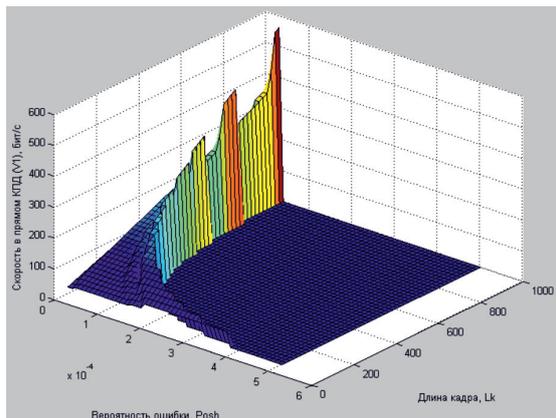
$$V_1 = \frac{C_1}{T_{дов}^{доп}} + \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{T_{дов}^{доп}}, \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{C_2}{T_{дов}^{доп}} + \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{T_{дов}^{доп}}, \quad (8)$$

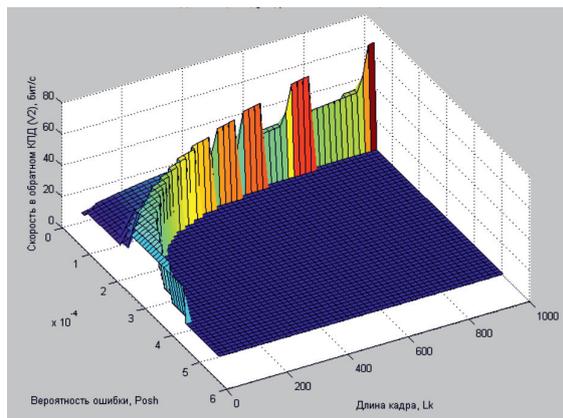
где  $C_1 = u_{sk} \cdot L_k + (K_1 - 1) \cdot L_k$  – объем информации в совокупности кадров, передаваемой по прямому КПД,  $C_2 = K_2 \cdot L_{кв}$  – объем информации в совокупности квитанций, передаваемой по обратному КПД рассматриваемого АТПД. При этом  $K_1$  есть число передач пакета, а  $K_2$  есть число передач квитанции в ходе доставки МПС с заданными ВВХ. Данные величины находятся по приведенной модели доставки МПС.

Необходимо отметить, что выражение для  $C_1$  учитывает особенность использования кумулятивной квитанции, а именно длину первого шага процесса, которое по времени равно передаче числа кадров, равных длине «скользящего окна».

Описанный подход позволяет решить задачу (1) и для случая передачи МПС с большим, чем 5, числом пакетов. Пусть при этом общее МПС будет разбито, например, на  $m$  сегментов по 5 пакетов. Требование по вероятности доведения к одному пятипакетному МПС будет определяться из выражения  $P_{дов}^{(5)} = \sqrt[m]{P_{дов}^{(МПС)}}$ . А требования по времени доведения к одному пятипакетному МПС будут определяться из выражения:  $T^{(5)} = T / m$ .



а)



б)

Рис. 2. Трехмерный график зависимости скорости передачи информации по прямому (а) и обратному (б) КПД от вероятности битовой ошибки и длины кадра (пакета) в СПД типа 5-5-1

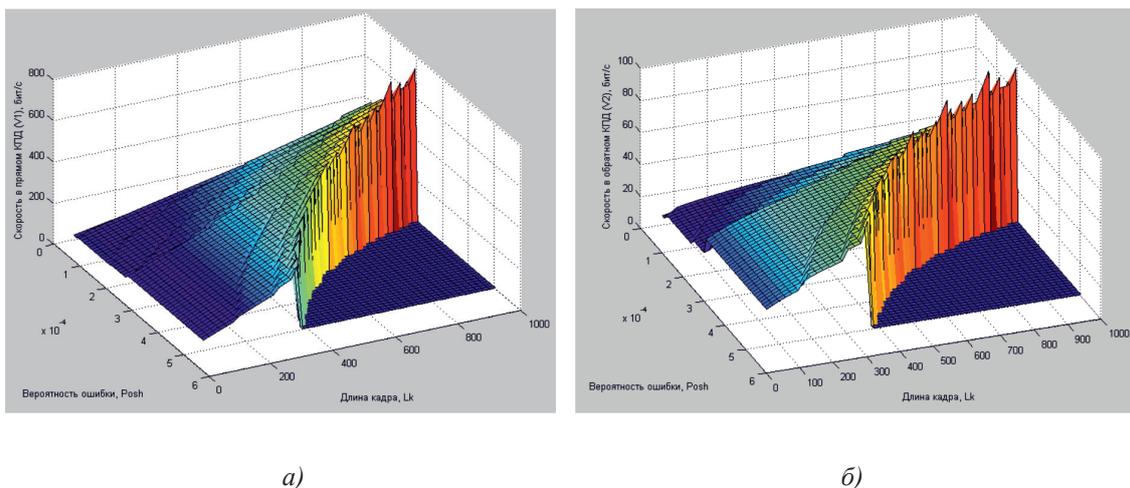


Рис. 3. Трехмерный график зависимости скорости передачи информации по прямому (а) и обратному (б) КПД от вероятности битовой ошибки и длины кадра (пакета) в СПД типа 5-5-3

Тогда величины  $C_1'$  и  $C_2'$  будут находиться так:  $C_1' = m \cdot C_1$ ,  $C_2' = m \cdot C_2$ . Именно относительно величин  $C_1'$  и  $C_2'$  и общего времени доведения  $T$  будет решаться задача (1).

По результатам данного исследования можно сделать такие выводы:

1. Математическая модель доставки МПС с кумулятивной квитанцией по протоколу X.25, разработанная на базе ПКМЦ в виде ситуационных двудольных графов, адекватно отображает физику исследуемого процесса, так как:

а) с течением времени вероятность доставки сообщения увеличивается;

б) с улучшением качества канала по вероятности битовой ошибки время доставки МПС уменьшается, а вероятность его доставки увеличивается.

2. Данная модель применима к описанию процесса доставки МПС сколь угодно большой емкости. При этом такое МПС следует декомпозировать на совокупность из  $m$  сегментов рассмотренной пакетной емкости.

3. Сформулирована и решена задача нахождения минимально достаточных скоростей в прямом и обратном КПД асимметричного радиотракта передачи данных. В основу оптимизации положен метод неопределенных множителей Лагранжа.

4. Разработанный научно-методический аппарат позволяет находить границы применимости протокола типа X.25 с кумулятивной квитанцией в асимметричном радиотракте передачи данных при требуемой достоверности и оперативности доставки многопакетного сообщения (рис. 2 и 3).

5. Описанный подход может быть внедрен в программное обеспечение контроллера формирователя кадра ЗПД-отправителя и ЗПД-получателя и должен использоваться на стадии эксплуатации АТПД для настройки сеансовых параметров перед началом информационного обмена.

#### Список литературы

1. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. – М.: Вузская книга, 2014. – 144 с.
2. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Шиманов С.Н. Математическая модель процесса информационного обмена по протоколу TSP на основе теории конечных марковских цепей [Текст] // Электросвязь. – 2015. – № 11. – С. 53–58.
3. Бусленко Н.П. Исследование сложных технических систем. – М.: Наука, 1982. – 250 с.
4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2012. – 944 с.
5. Цимбал В.А., Хоптар В.В., Сорокин О.И., Лягин М.А., Бережной А.А., Крючков Н.В. Правила автоматизированного синтеза конечной марковской цепи, описывающей доведение многопакетного сообщения в соединении «точка-точка» [Текст] // «Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. – 2016. – Вып. 4. – С. 91–98.
6. Кемени Дж. Дж., Снелл Дж. Ларк. Конечные цепи Маркова // Пер. с англ. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 2003. – 564 с.
8. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи – М.: Сов. Радио, 1973. – 232 с.
9. Баврин И.И., Матросов В.А. Общий курс высшей математики: учеб. для студентов физ.-мат. спец. пед. вузов. – М.: Просвещение, 1995. – 464 с.
10. Босс В. Лекции по математике. Т. 7: Оптимизация: учеб. пособие. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «Либроком», 2010. – 216 с.