УДК 621.391

Алексиков Юрий Григорьевич
ГКОУ ВПО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации»
Россия, Орёл[1]
Старший научный сотрудник
E-Mail: allexic@mail.ru

Аналитико-алгоритмическая модель сети обмена данными управления телекоммуникационной системы, учитывающая вариативность интенсивности поступления потока управляющей информации

Аннотация: Для обеспечения успешного функционирования современных телекоммуникационных систем создаются сети обмена данными управления. Однако современные технологии управления сетями связи неэффективно используют ресурс каналов связи управления. Предлагаемая в статье аналитико-алгоритмическая модель учитывает вариативность интенсивности поступления потока служебных сообщений от источников управляющей информации, многопутевую передачу управляющей информации и ограниченную надежность каналов сети обмена данными управления. Использование модифицированной формулы Энгсета позволяет обеспечить более рациональное распределение канального ресурса, необходимого для организации доставки протокольных блоков данных. Предложено ввести новую логическую функцию логическое сочетание, позволяющую осуществить удобное и конструктивное формальное представление сети обмена данными управления и ее элементов относительно показателей структурной надежности с учетом дублирования и/или резервирования маршрутов передачи управляющей информации. Разработанная модель может быть применена для решения расчетных и исследовательских задач анализа и синтеза сетей обмена данными управления телекоммуникационной системы, разработки алгоритмов выбора оптимальных скоростей передачи ее каналов.

Ключевые слова: Модель; управление; телекоммуникационная система; сеть обмена данными управления; каналы связи управления; управляющая информация; протокольный блок данных; надежность каналов; узел коммутации; качество обслуживания.

Идентификационный номер статьи в журнале 05TVN114

[1] 302040, Российская Федерация, г. Орёл, ул. Лескова, д. 36, кв. 113

Yuriy Aleksikov
The Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation
Russia, Orel
E-Mail: allexic@mail.ru

Analytical and algorithmic model of the management-data-exchange network of the telecommunication systems taking into account the variability of intensity of the incoming control information flow

Abstract: With respect to indicators of structural reliability based on duplication and / or redundancy tion routes for transmitting control information . The developed model can be used to solve computational and research tasks of analysis and synthesis of networks exchange of data management telecommunications system , the development of algorithms select the optimal transmission rates of its channels.

For support of successful functioning of the modern telecommunication systems networks of a management-data-exchange network are created. However the modern technologies of network management is ineffective use a resource of management data channels. The analytical and algorithmic model offered in article take into account the variability of intensity of the flow of the official messages from sources of controlling information, multipath transmission control data and limited reliability of channels of a management-data-exchange network. Use of the modified formula of Engset allows to provide more rational distribution of the channel resource necessary for the organization of transmission of protocol data units. The new logic function – a logical combination is entered. It provides convenient and constructive formal representation of the management-data-exchange network and its elements concerning indexes of structural reliability taking into account duplicating and/or reservation of routes of transmission of management data. The developed model can be applied to the solution of estimated and research tasks of the analysis and synthesis of management-data-exchange network, to creation of the algorithms of a choice of optimum transmission rates of its channels.

Keywords: Model; management; telecommunication system; management-data-exchange network; management communication channels; control information; protocol data unit; reliable of channels; switching node; quality of service.

Identification number of article 05TVN114

Для эффективного функционирования гетерогенных телекоммуникационных систем (ТКС) особое внимание уделяется вопросам непрерывного, оперативного и устойчивого управления ее элементами. Используемые в настоящее время технологии управления связью предписывают формирование и использование сети обмена данными управления (СОДУ), включающей выделенные или наложенные каналы связи управления (КСУ) и узлы коммутации (УК) управляющих сообщений [1, 2]. В таких СОДУ реализуется режим переноса служебных сообщений – протокольных блоков данных (ПБД) с коммутацией пакетов переменной длины (SS-7, DSS, SIP и пр.), подразумевается использование кратчайших маршрутов в исправном состоянии ТКС и лавинную маршрутизацию ПБД при повреждении кратчайших путей. С учетом постоянно увеличивающегося перечня услуг связи, а также возрастающей нагрузки от пользователей ТКС это обусловливает высокие дополнительные затраты на аренду каналов и трактов передачи для обмена ПБД. Кроме того, в условиях отказов каналов и трактов ТКС применяемые подходы обуславливали лавинообразный рост служебного трафика в линиях передачи, перегрузку СОДУ с потерей управления ТКС, что вызывает необходимость совершенствования научно-методического аппарата анализа и синтеза СОДУ в направлении минимизации непроизводительных затрат ресурсов пропускной способности линий передачи, в частности разработку аналитико-алгоритмической модели СОДУ, учитывающей как вариативность интенсивности поступления потока ПБД, так и ограниченную надежность КСУ.

Целью моделирования является формализация зависимости качества обслуживания ПБД от нагрузочных свойств источников управляющей информации (ИУИ) и топологических характеристик СОДУ. При этом особое внимание уделено следующим аспектам: вне зависимости от сетевой технологии, применяемой в ТКС, в КСУ используются протоколы передачи с коммутацией пакетов, характеризуемые определенными (специфическими) закономерностями *изменения интенсивности* поступления ПБД от времени; обеспечение надежности доставки ПБД предполагается не за счет избыточных затрат пропускной способности на кратчайших маршрутах СОДУ, а посредством обоснованного использования множества путей при ограничениях на параметры своевременности доставки ПБД.

Структурно аналитико-алгоритмическая модель СОДУ представлена моделями потока ПБД, поступающего на сетевые элементы (СЭ) СОДУ, для одиночного источника управляющей информации, для группы источников различного уровня агрегации управляющей информации; модели СОДУ, как сети, обслуживающей поток ПБД в многопутевом режиме, а также модели обслуживания приоритетных потоков ПБД в СОДУ с ненадежными сетевыми элементами.

1. Модели потока ПБД, поступающего на вход каналов СОДУ

Для описания потоков ПБД, поступающих от одиночного ИУИ в СОДУ, применяются показатели: $M_{\text{СИН}} = \left[M_{\text{ИН}_1}, M_{\text{ИН}_2}, \ldots M_{\text{ИН}_n}\right]$ – вектор-строка, описывающий характеристики совокупности информационных направлений (ИН) передачи ПБД, элементами которого являются векторы, описывающие ИН

$$M_{\text{ИН}i} = \left[\, n, m, r_{n,m}, \left\{C_{n,m}^{\text{инф}(1)}, \ldots, C_{n,m}^{\text{инф}(R)}\right\}, L_{n,m}, \left\{T_{n,m}^{\text{жизни}(1)}, \ldots, T_{n,m}^{\text{жизни}(R)}\right\}, \left\{\gamma_{n,m}^{(1)}, \ldots, \gamma_{n,m}^{(R)}\right\},\right.$$

где n и m – номера соответственно УК-источника и УК-приемника управляющей информации; $r_{n,m}$ – число альтернативных маршрутов передачи ПБД для i-го ИН, $C_{n,m}^{\text{инф}(k)}$ – средняя или эффективная скорость передачи ПБД k-го приоритета; где R – число приоритетов ПБД; $L_{n,m}$ – средний размер ПБД для ИН от n-го к m-му УК (бит); $T_{n,m}^{\text{жизни}(k)}$ – среднее

допустимое время жизни ПБД k-го приоритета (с); $\gamma_{n,m}^{(k)}$ – интенсивность ПБД *k*-го приоритета (1/с); $\nu_{n,m}^{(k)} = \left(T_{n,m}^{\text{жизни}(k)}\right)^{-1}$ – интенсивность старения ПБД *k*-го приоритета (1/с).

Поскольку СОДУ есть совокупность УК и КСУ, то $M_{\text{смеж}}$ – матрица смежности, элементами которой являются вектор-строки, описывающие характеристики соответствующих сетевых элементов СОДУ, стоящих на пересечении *n*-й строки и *m*-го столбца в матрице смежности

$$M_{n,m}^{\text{элем}} = \left[s_{n,m}, C_s, k_s^{\text{г}}, T_s^{\text{вост}}, \left\{\lambda_s^{(1)}, \ldots, \lambda_s^{(R)}\right\}, L_s, \left\{\nu_s^{(1)}, \ldots, \nu_s^{(R)}\right\}, \chi_s, d_s\right],$$

где $s_{n,m}$ – порядковый номер СЭ; C_s – скорость передачи ПБД в КСУ с номером *s* (бит/с) или же интенсивность обслуживания ПБД для УК с номером *s* (1/с); $k_s^{\text{г}}$ – коэффициент готовности для СЭ; $T_s^{\text{вост}}$ – среднее время восстановления для СЭ (с); $\lambda_s^{(k)}$ – сумма интенсивностей ПБД k-го приоритета, проходящих через СЭ с номером *s* (1/с); λ_s – сумма интенсивностей ПБД (относительно всех приоритетов) (1/с); λ – сумма интенсивностей потоков ПБД (относительно всех приоритетов) во всех КСУ; L_s – средний размер ПБД, поступающих в СЭ с номером *s* (бит); $\nu_s^{(k)}$ – интенсивность старения ПБД *k*-го приоритета (бит); χ_s – интенсивность обслуживания ПБД (1/с).

Все ИУИ целесообразно разделить на две группы: с постоянной и с изменяющейся скоростью передачи. В свою очередь ИУИ с изменяющейся скоростью также можно разделить на две группы: источники непрерывного типа источники стартстопного типа. Поскольку моделью ИУИ с изменяющейся скоростью непрерывного типа можно описать все другие источники, далее рассматриваются имеющиеся для них решения.

Так как КСУ имеет конечное значение скорости передачи *C* бит/с, поэтому в моменты, когда мгновенная скорость источника $b(t)$ превосходит значение *C*, качество обслуживания ПБД снижается, что для СОДУ не допустимо. Далее, в соответствии с принятой в предметной области терминологией, различаются мгновенная, максимальная (пиковая), минимальная, средняя и эффективная $b_{\text{эф}}(t, t+\tau)$ или $b_{\text{эф}}(\tau)$ скорости передачи источника управляющей информации.

Исследования ТКС с коммутацией пакетов показывают, что значения пиковой $\max[b(\tau)]$ и средней $M[b(\tau)]$ скоростей передачи не в полной мере отражают статистические свойства информационного потока на выходе ИУИ и дают два предельных решения задачи выбора канального ресурса. Использование пиковой скорости $\max[b(\tau)]$ обеспечивает нулевую вероятность переполнения буферов УК, однако при этом коэффициент полезного действия КСУ будет достаточно малым. Использование средней скорости $M[b(\tau)]$, напротив, ведет практически к полному занятию ресурса, однако с этим растут потери и сетевая задержка ПБД в УК. Интуитивно понятно, что потребность в канальном ресурсе должна рассчитываться с использованием значения, лежащего между средней и пиковой скоростями передачи информации. Так, в теории телетрафика мультисервисных сетей соответствующая характеристика называется эффективной скоростью передачи источника информации [3] для оценки которого можно использовать следующее эмпирическое соотношение

$$b_{эф}(\tau)=\begin{cases}\xi\cdot M[b(\tau)]\cdot\left(1+3\cdot\Psi\cdot\left(1-\dfrac{M[b(\tau)]}{\max[b(\tau)]}\right)\right), & \text{если } 3\cdot\psi\le\min\left\{3,\dfrac{\max[b(\tau)]}{M[b(\tau)]}\right\}\\ \xi\cdot M[b(\tau)]\cdot\left(1+3\cdot\psi^2\cdot\left(1-\dfrac{M[b(\tau)]}{\max[b(\tau)]}\right)\right), & \text{если } 3<3\cdot\psi^2\le\dfrac{\max[b(\tau)]}{M[b(\tau)]}\\ \max[b(\tau)] & \text{в остальных случаях.}\end{cases} \quad (1),$$

где величины ψ, ξ определяются из выражений, где $P^{пот.ПДБперегр}$ – вероятность потерь ПДБ вследствие перегрузок

$$\psi=-\frac{2\cdot\max[b(\tau)]}{C}\cdot\log_{10}\left(P^{пот.ПБДперегр}\right),$$

$$\xi=1-\frac{1}{50}\cdot\log_{10}\left(P^{пот.ПБДперегр}\right).$$

Исследования показали, что в зависимости от типа приложения соотношение между эффективной и средней скоростями меняется в довольно широких пределах, отражая способность соответствующих информационных потоков к мультиплексированию. Чем больше это соотношение, тем хуже способность к мультиплексированию.

Для того, что бы рассчитать параметры трафика, поступающего с выхода узла доступа ТКС в КСУ от нескольких ИУИ, далее рассматривается механизм статистического мультиплексирования. При работе алгоритма статистического мультиплексирования достигается выигрыш в канальном ресурсе, который можно определить как

$$\Delta b_{\Sigma}(\tau=t)=\max\left[b_{\Sigma}(\tau=\infty)\right]-b_{эф\Sigma}(\tau=t). \quad (2)$$

Пусть имеются n отдельных источников и стационарные случайные процессы на их выходах имеют одинаковые средние значения $M[b_i(t)]$ и дисперсии $D[b_i(t)]$ мгновенной скорости передачи. Тогда коэффициент вариации результирующего процесса, отражающий степень сглаживания результирующего суммарного процесса при увеличении количества мультиплексируемых парциальных процессов, определяется как

$$kv[b_{\Sigma}(t)]=\frac{\sqrt{D[b_{\Sigma}(t)]}}{M[b_{\Sigma}(t)]}=\frac{\sqrt{D[b_i(t)]}}{M[b_i(t)]\cdot\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Значение эффективной скорости передачи суперпозиции независимых информационных потоков совпадает с суммой значений эффективных скоростей передачи индивидуальных потоков. Следовательно, можно утверждать, что если в системе открыто n сеансов связи эффективная скорость агрегированного потока может быть найдена как $n\cdot b_{эф}(\tau)$.

Далее проверяется данное утверждение при оценке эффективной скорости передачи ПБД для соединений вида "точка-многоточка" (в рамках архитектуры системы управления ТКС "по возмущению" с агрегацией информации состояния СЭ типа *MIB*) на выходе узла доступа (рис. 1).

Пусть к узлу доступа подключено R ИУИ с интенсивностью нагрузки от каждого источника равной a. Так как это управляющая информация, трафик от каждого источника допускается в СОДУ без ограничения.

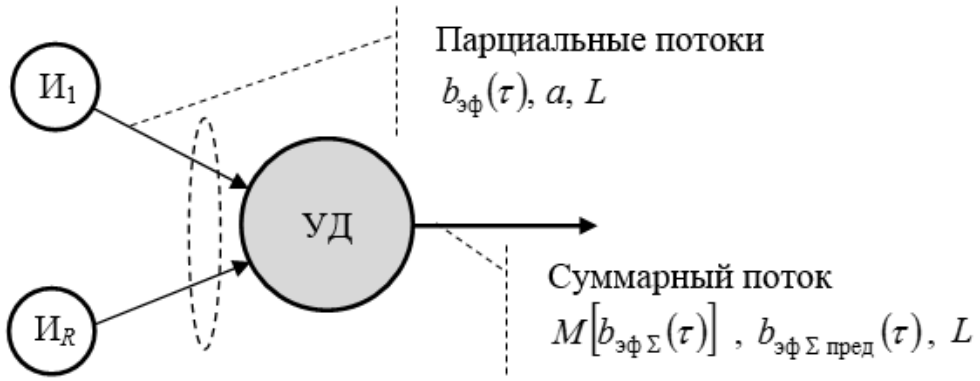

Рис. 1. *Суммарный поток на выходе узла доступа для соединения "точка-многоточка"*

Вероятность того, что в произвольный момент времени будет открыто ровно n сеансов можно найти, воспользовавшись биномиальным распределением

$$P_n = C_R^n \cdot a^n \cdot (1-a)^{R-n}, \tag{4}$$

где $C_R^n = \dfrac{R!}{n!\cdot(R-n)!}$ – это число сочетаний.

Тогда среднее число одновременных сеансов можно рассчитать как

$$M[n] = \sum_{n=0}^{R}\left[C_R^n \cdot a^n \cdot (1-a)^{R-n} \cdot n\right] = R \cdot a, \tag{5}$$

а среднее значение эффективной скорости агрегированного потока данных соответственно

$$M\left[b_{эф\,\Sigma}(\tau)\right] = b_{эф}(\tau) \cdot R \cdot a. \tag{6}$$

Задавшись значением вероятности потери соединения $P^{пот.\ соед}$ можно найти предельную эффективную скорость по следующей формуле

$$b_{эф\,\Sigma\,пред}(\tau) = b_{эф}(\tau) \cdot n_{пред}, \tag{7}$$

где $n_{пред}$ – это предельное значение одновременных сеансов связи организуемых через узел коммутации, определяемое как

$$n_{пред} = \inf\left\{ n \;\middle|\; \sum_{j=0}^{n}\left[C_R^j \cdot a^j \cdot (1-a)^{R-j}\right] \geq 1 - P^{пот.\ соед} \right\},\ n = 0, 1, \ldots, R \tag{8}$$

где $\inf\{\ldots\}$ – точная нижняя граница.

Ниже рассмотрен вариант расчета эффективной скорости для соединений "точка-точка" на выходе узла доступа (рис. 2). Пусть к первому узлу доступа подключено R_1 источников, а ко второму R_2 источников информации.

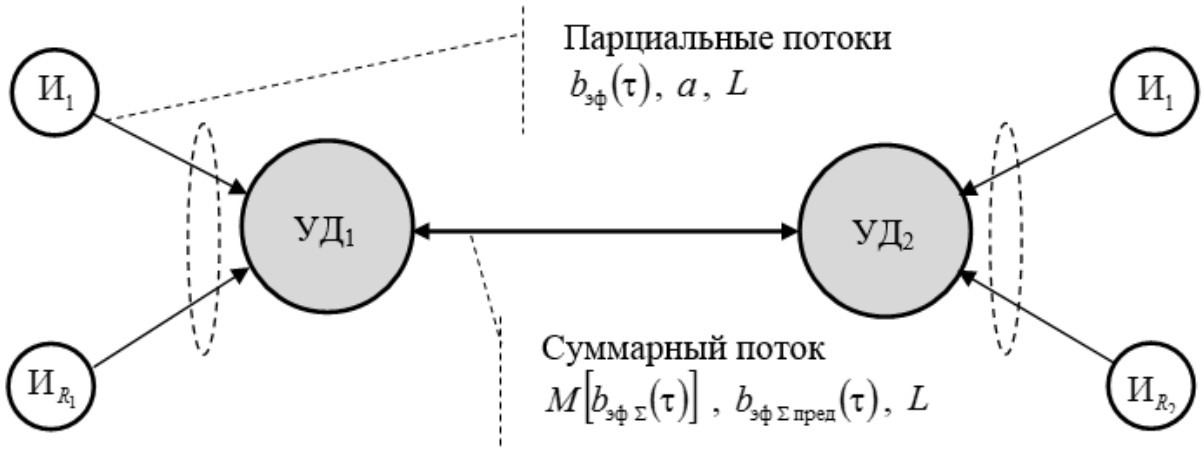

Рис. 2. *Суммарный поток на выходе узла доступа для соединений "точка-точка"*

Очевидно, что максимальное число соединений для сети связи представленной на рисунке 2, определяется по формуле

$$n_{\max} = \min\{R_1, R_2\}. \tag{9}$$

Вероятность того, что в произвольный момент времени будет открыто ровно *i* сеансов связи можно найти, используя свойство статистического равновесия марковского процесса, описывающего процедуру открытия и закрытия сеансов служебной связи. В отличие от классических подходов, в такой постановке учитывается, что в сеансах служебной связи участвует два корреспондента, и ни один из них не сможет открыть новый сеанс, не закончив текущий. Тогда вероятность нахождения системы в *i*-м состоянии можно найти как

$$P_i = \frac{C^{i}_{\left\lceil \frac{R_1+R_2}{2} \right\rceil} \cdot a^i \cdot (1-a)^{-i} \cdot 2^i}{\sum\limits_{j=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}} \left(C^{j}_{\left\lceil \frac{R_1+R_2}{2} \right\rceil} \cdot a^j \cdot (1-a)^{-j} \cdot 2^j \right)}, \tag{10}$$

где a – интенсивность потенциальной нагрузки от одного источника, $\lceil \ldots \rceil$ – функция округления до ближайшего целого в большую сторону. Физический смысл полученного ***модифицированного распределения Энгсета*** состоит в том, что оно отражает вероятность того, что в произвольный момент времени в СОДУ будет открыто ровно *i* сеансов служебной связи.

С учетом (10) среднее число сеансов служебной связи можно рассчитать как

$$M[n] = \frac{\sum\limits_{i=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}} \left(C^{i}_{\left\lceil \frac{R_1+R_2}{2} \right\rceil} \cdot a^i \cdot (1-a)^{-i} \cdot 2^i \cdot i \right)}{\sum\limits_{j=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}} \left(C^{j}_{\left\lceil \frac{R_1+R_2}{2} \right\rceil} \cdot a^j \cdot (1-a)^{-j} \cdot 2^j \right)}, \tag{11}$$

а среднее значение эффективной скорости агрегированного потока данных соответственно

$$M\left[b_{\text{эф}\,\Sigma}(\tau)\right] = b_{\text{эф}}(\tau)\cdot\frac{\sum\limits_{i=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}}\left(C^{i}_{\left\lceil\frac{R_1+R_2}{2}\right\rceil}\cdot a^{i}\cdot(1-a)^{-i}\cdot 2^{i}\cdot i\right)}{\sum\limits_{j=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}}\left(C^{j}_{\left\lceil\frac{R_1+R_2}{2}\right\rceil}\cdot a^{j}\cdot(1-a)^{-j}\cdot 2^{j}\right)}. \qquad (12)$$

Данные выводы, полученные аналитически, позволяют уточнить известные закономерности, наблюдаемые в сетях с коммутацией пакетов.

Так, задавшись значением вероятности потери соединения сеанса служебной связи $P^{\text{пот. соед}}$ можно найти предельную эффективную скорость по формуле (7), где $n_{\text{пред}}$ – это предельное значение одновременных сеансов служебной связи организуемых через канал связи на выходе узла доступа, определяемое как

$$n_{\text{пред}} = \inf\left\{ n \;\middle|\; \frac{\sum\limits_{i=0}^{n}\left(C^{i}_{\left\lceil\frac{R_1+R_2}{2}\right\rceil}\cdot a^{i}\cdot(1-a)^{-i}\cdot 2^{i}\cdot i\right)}{\sum\limits_{j=0}^{\min\{R_1,\,R_2\}}\left(C^{j}_{\left\lceil\frac{R_1+R_2}{2}\right\rceil}\cdot a^{j}\cdot(1-a)^{-j}\cdot 2^{j}\right)} \geq 1-P^{\text{пот. соед}} \right\},$$

$$n = 0, 1, \ldots, \min\{R_1,\, R_2\} \qquad (13)$$

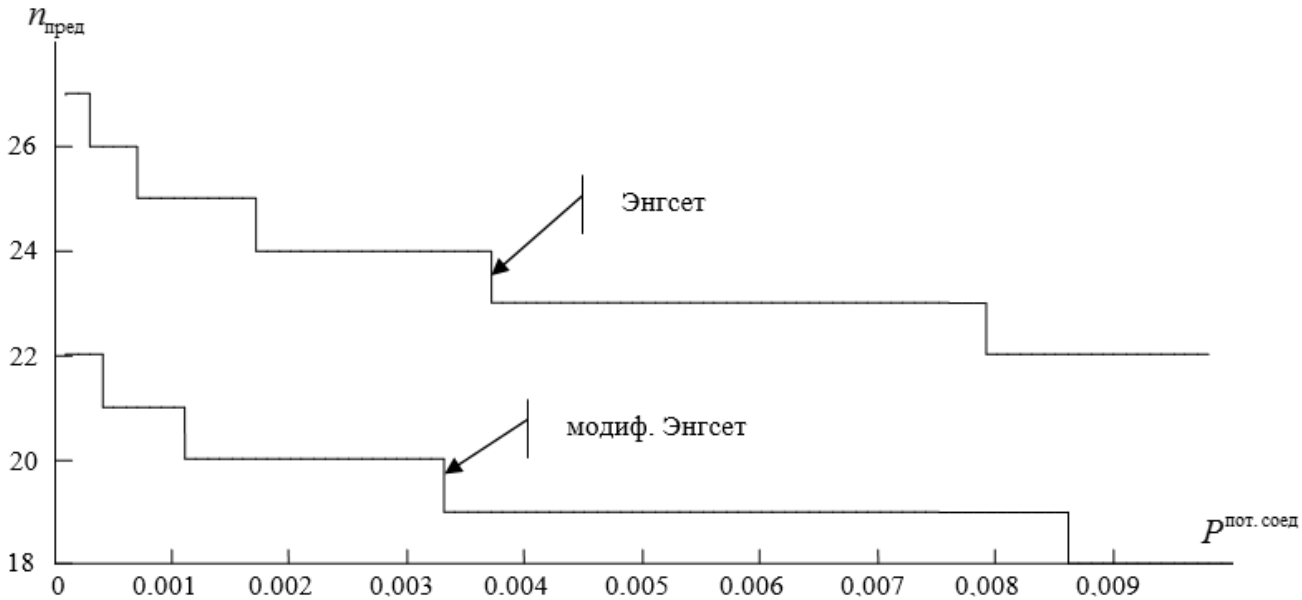

Рис. 3. *Зависимость* $n_{\text{пред}}$ *от* $P^{\text{пот. соед}}$ *для сеансов служебной связи по топологии "точка-точка"*

Анализ графиков, представленных на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что наличие последействия в потоке заявок на установление соединений в *модифицированной формуле Энгсета* выражено более заметно, чем в классическом выражении [4]. Учет выявленной закономерности обеспечит более рациональное распределение канального

ресурса СОДУ, необходимого для организации служебной связи.

Рассмотрим характеристики суммарного потока ПБД 2-го уровня для соединения "точка-многоточка" (рис. 4). Потоки ПБД формируют две одинаковые группы пользователей, и значение средней и предельной эффективных скоростей суммарных потоков 1-го уровня можно найти, используя выражения (6) и (7).

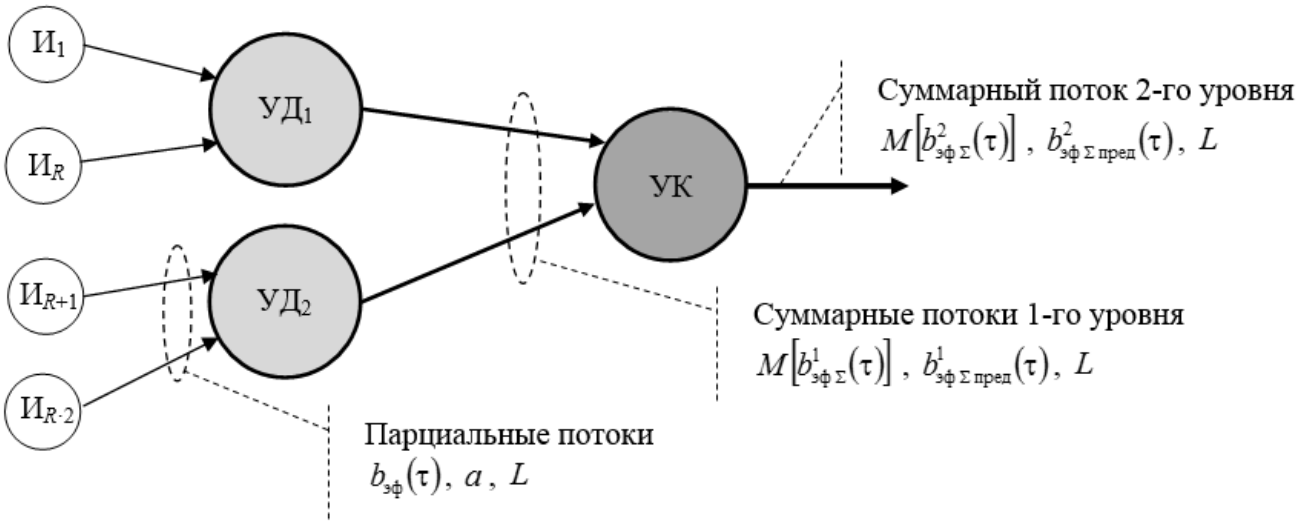

Рис. 4. *Суммарный поток на выходе узла коммутации для соединения "точка-многоточка"*

Для определения средней и предельной эффективных скоростей суммарного потока 2-го уровня целесообразно воспользоваться следующими выражениями

$$M\left[b^2_{эф\,\Sigma}(\tau)\right] = b_{эф}(\tau)\cdot R\cdot 2\cdot a = M\left[b^1_{эф\,\Sigma}(\tau)\right]\cdot 2, \tag{14}$$

$$b^2_{эф\,\Sigma\,пред}(\tau) = b_{эф}(\tau)\cdot \inf\left\{ n \;\middle|\; \sum_{j=0}^{n}\left[C^j_{2\cdot R}\cdot a^j\cdot(1-a)^{2\cdot R-j}\right] \geq 1-P^{пот.\ соед}\right\} \neq$$

$$\neq b^1_{эф\,\Sigma\,пред}(\tau)\cdot 2,\ n=0,1,\ldots,2\cdot R. \tag{15}$$

Для соединений "точка-точка" в случае, когда потоки данных формируют два ИН, значение средней и предельной эффективных скоростей суммарных потоков 1-го уровня можно найти, используя выражения (12) и (13). Для определения средней и предельной эффективных скоростей суммарного потока 2-го уровня воспользуемся выражениями (16) и (17).

$$M\left[b^2_{эф\,\Sigma}(\tau)\right] = b_{эф}(\tau)\cdot \frac{\sum_{i=0}^{\min\{R1,R3\}+\min\{R2,R4\}}\left(C^i_{\left\lceil\frac{R1+R2+R3+R4}{2}\right\rceil}\cdot a^i\cdot(1-a)^{-i}\cdot 2^i\cdot i\right)}{\sum_{j=0}^{\min\{R1,R3\}+\min\{R2,R4\}}\left(C^j_{\left\lceil\frac{R1+R2+R3+R4}{2}\right\rceil}\cdot a^j\cdot(1-a)^{-j}\cdot 2^j\right)} \tag{16}$$

$$b^2_{\text{эф}\,\Sigma\,\text{пред}}(\tau) = b_{\text{эф}}(\tau)\cdot\inf\left\{ n \;\middle|\; \frac{\sum_{i=0}^{n}\left(C^{i}_{\left\lceil\frac{R1+R2+R3+R4}{2}\right\rceil}\cdot a^{i}\cdot(1-a)^{-i}\cdot 2^{i}\cdot i\right)}{\sum_{j=0}^{\min\{R1,\,R3\}+\min\{R2,\,R4\}}\left(C^{j}_{\left\lceil\frac{R1+R2+R3+R4}{2}\right\rceil}\cdot a^{j}\cdot(1-a)^{-j}\cdot 2^{j}\right)} \geq 1-P^{\text{пот.соед}} \right\},$$

$$n = 0, 1, \ldots, \left(\min\{R_1, R_3\} + \min\{R_2, R_4\}\right). \qquad (17)$$

Имеет место тот факт, что *предельная* эффективная скорость суммарного потока *i*-го уровня, не может быть найдена как сумма предельных эффективных скоростей суммарных потоков (*i*+1)-го уровня. В то время как средняя эффективная скорость суммарного потока любого уровня складывается из средних эффективных скоростей предыдущего уровня агрегирования.

Проверка полученных аналитических выражений на адекватность, чувствительность и устойчивость осуществлялась путем их сравнения с результатами имитационного моделирования и натурных экспериментов. Исследования показали, что модель потока ПБД, поступающего на вход каналов СОДУ, соответствует объекту исследования, обладает необходимой чувствительностью к изменению входных параметров и сохраняет устойчивость на всем возможном диапазоне изменения входных параметров, а также при изменении структуры СОДУ.

2. Модель СОДУ, как сети, обслуживающей поток ПБД в многопутевом режиме

Даже при известных параметрах интенсивности потока данных, поступающих на вход канала связи, существующий аппарат теории массового обслуживания при описании надежностных аспектов построения сетей оперирует громоздким инструментарием, получая результаты с погрешностью до 20 %. Ниже предлагаются направления его совершенствования для анализа и синтеза СОДУ на базе аппарата математической логики в направлении компактного и конструктивного формального описания условий связности (в том числе нестандартных для ТКС).

Структурную надежность любой сети, в том числе СОДУ, можно охарактеризовать различными параметрами, однако основу всех этих показателей составляет один факт наступления события связности либо несвязности. В СОДУ для передачи ПБД, подразумевающих специфически высокие требования по надежности доставки (например, управляющих воздействий), иногда целесообразно использовать несколько низкоскоростных путей доставки, нежели кратчайшие маршруты на высокой скорости передачи.

В предметной области анализа и синтеза сетей связи термин "двухполюсная сеть связи" (ДСС) понимается как часть ТКС, обеспечивающая *многопутевую* передачу данных ИН [5]. Данный факт позволяет использовать инструментарий моделирования ДСС с некоторой модификацией для описания многопутевого ИН передачи информации управления СОДУ.

Пусть, вектор-строка ДСС $\upsilon_i = [\mu_t, \mu_s, \ldots, \mu_l]$ есть перечисление маршрутов (путей для ориентированного графа), используемых для передачи ПБД для анализируемого ИН. Считается, что все ДСС заданы на графе сети связи, если определен вектор-строка $\Upsilon = [\upsilon_1, \upsilon_2, \ldots, \upsilon_r]$ элементами которого являются описания отдельных ДСС.

Объединением всех ДСС является многополюсная сеть связи (МСС), под которой в общем случае понимается часть ТКС, обеспечивающая одновременную передачу информации для нескольких ИН [5]. Для формального описания МСС используется вектор-строка $w_i = [\upsilon_t, \upsilon_s, \ldots, \upsilon_l]$, в котором перечисляются все ДСС, образующие ее. МСС задана на графе СОДУ, если определен вектор-строка вида $W = [w_1, w_2, \ldots, w_k]$, элементами которого являются описания отдельных МСС.

Таким образом, СОДУ может быть представлена множествами ДСС и МСС. Такое формальное представление СОДУ позволяет применять существующий инструментарий моделирования сетей связи и усовершенствовать его в интересах проводимого исследования.

Далее нормальное функционирование СЭ СОДУ (УК или КСУ) называется его исправным состоянием. Состояние когда СЭ не может продолжать выполнение своих функций называется неисправным состоянием. На достаточно большом интервале времени в процессе функционирования СОДУ для ее СЭ попеременно с той или иной частотой наступает исправное или неисправное состояние. В общем случае это процесс носит случайный характер. Однако, используя специальные методы, основывающиеся на обработке статистических данных можно вычислить вероятности исправного состояния того или иного СЭ СОДУ [6].

Далее используются следующие обозначения: $\overline{\overline{x_s}}$ – исправное состояние *s*-го СЭ СОДУ ($x_s = 1$); $\overline{x_s}$ – неисправное состояние *s*-го СЭ СОДУ ($x_s = 0$); $p\left(\overline{\overline{x_s}}\right)$ и $p\left(\overline{x_s}\right)$– вероятность нахождения *s*-го С" СОДУ в исправном $p(x_s = 1)$ и, соответственно, в неисправном состоянии $p(x_s = 0)$.

В свою очередь нормальное функционирование маршрута, когда все его элементы находятся в исправном состоянии, называется исправным состоянием маршрута. Состояние, когда хотя бы один элемент маршрута неисправен, называется неисправным состоянием.

Для удобства записи нестандартных условий связности сложно-разветвленных СОДУ предлагается ввести *новую логическую функцию*, которую будет называться ***логическим сочетанием*** и обозначать следующим образом

$$(x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\textcircled{m}} \tag{18}$$

правила работы этой логической функции формулируется следующим образом – логическое сочетание *n* логических переменных по *m* равно единице, тогда и только тогда, когда число логических переменных равных единице равно *m* или более.

Поскольку с помощью функции логического сочетания можно записать основные функции одной и двух переменных: отрицание $\left((x_1)^{\textcircled{2\cdot x_1}} = \overline{x_1}\right)$, конъюнкцию $(x_1, x_2)^{\textcircled{2}} = x_1 \otimes x_2$ и дизъюнкцию $(x_1, x_2)^{\textcircled{1}} = x_1 \oplus x_2$, следовательно, эта функция, как и функции "штрих Шеффера" и "стрелка Пирса" достаточна для записи любой логической функции одного и двух независимых логических переменных.

Новое аналитическое выражение, с помощью которого находится *дизъюнктивная нормальная форма* логического сочетания для случая, когда $0 < m \le n$, будет иметь вид

$$(x_1, x_2, \ldots, x_n)^m = \sum_{i_{m-1}=1}^{\textcircled{n}-(m-1)} x_{i_{m-1}} \otimes \left[\sum_{i_{m-2}=i_{m-1}+1}^{n-(m-2)} x_{i_{m-2}} \otimes \left[\ldots \otimes \left[\sum_{i_{m-m}=i_{m-m+1}+1}^{n-(m-m)} x_{i_{m-m}} \right] \ldots \right] \right]. \tag{19}$$

При этом под символом $\sum_{i=1}^{n} x_i$ будем понимать логическую сумму *n* логических переменных

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = x_1 \oplus x_2 \oplus \cdots \oplus x_n .$$

Пусть $\hat{\mu}_i$ – случайная величина, описывающая состояние i-го маршрута; $\overline{\overline{\hat{\mu}_i}}$ – исправное состояние ($\hat{\mu}_i = 1$), а $\overline{\hat{\mu}_i}$ – неисправное состояние ($\hat{\mu}_i = 0$) i-го маршрута; $p\left(\overline{\overline{\hat{\mu}_i}}\right)$ и $p\left(\overline{\hat{\mu}_i}\right)$ – вероятность нахождения i-го маршрута в исправном $p(\hat{\mu}_i = 1)$ и, соответственно, в неисправном состоянии $p(\hat{\mu}_i = 0)$.

Значение логической переменной может быть найдено с помощью следующей логической функции

$$\hat{\mu}_i = \left(x_r, x_k, \ldots, x_t\right)^{\textcircled{m}}, \tag{20}$$

при этом переменная *m* равна числу элементов, образующих данный маршрут.

Так как надежность ДСС и МСС в СОДУ характеризуется лишь одним фактом – наступлением события ***связности*** (кратной числу используемых путей) информационного направления передачи ПБД, логика дальнейших рассуждений будет следующей:

событие связности ДСС наступает в том случае, если между выбранной парой вершин графа в исправном состоянии находится не менее *заданного* числа маршрутов, такое состояние ДСС называется *исправным*;

состояние, когда число исправных КМУФ менее заданного, является *неисправным*.

Далее используются следующие обозначения: $\hat{\upsilon}_i$ – случайная величина, описывающая состояние *i*-й ДСС; $\overline{\overline{\hat{\upsilon}_i}}$ и $\overline{\hat{\upsilon}_i}$ – исправное ($\hat{\upsilon}_i = 1$) и, соответственно, неисправное состояние *i*-й ДСС ($\hat{\upsilon}_i = 0$); $p\left(\overline{\overline{\hat{\upsilon}_i}}\right)$ и $p\left(\overline{\hat{\upsilon}_i}\right)$ – вероятность нахождения *i*-й ДСС в исправном $p(\hat{\upsilon}_i = 1)$ и, соответственно, неисправном состоянии, $p(\hat{\upsilon}_i = 0)$.

Значение логической переменной $\hat{\upsilon}_i$ может быть найдено с помощью следующей логической функции

$$\hat{\upsilon}_i = \left(\hat{\mu}_r, \hat{\mu}_k, \ldots, \hat{\mu}_t\right)^{\textcircled{m}}, \tag{21}$$

при этом переменная *m* меньше либо равна числа маршрутов, образующих данную ДСС.

По аналогии может быть определено событие связности (исправности) МСС, которое наступает в том случае, если на заданном множестве корреспондирующих пар в исправном состоянии (в состоянии связности) находится не менее заданного числа ДСС.

Пусть $\hat{w}_i$ – случайная величина, описывающая состояние *i*-й МСС; $\overline{\overline{\hat{w}_i}}$ и $\overline{\hat{w}_i}$ – исправное и неисправное состояние *i*-й МСС соответственно ($\hat{w}_i = 1$ и $\hat{w}_i = 0$); $p\left(\overline{\overline{\hat{w}_i}}\right)$ и $p\left(\overline{\hat{w}_i}\right)$ – вероятность нахождения *i*-й МСС в исправном и неисправном состоянии соответственно ($p(\hat{w}_i = 1)$ и $p(\hat{w}_i = 0)$). Тогда значение логической переменной $\hat{w}_i$

$$\hat{w}_i = \left(\hat{\upsilon}_r, \hat{\upsilon}_k, \ldots, \hat{\upsilon}_t\right)^m, \tag{22}$$

при этом переменная *m* меньше либо равна числа ДСС, образующих данную МСС.

Таким образом, использование новой логической функции – логического сочетания, позволяет осуществить удобное и конструктивное формальное представление СОДУ и его элементов с учетом *дублирования* маршрутов передачи управляющей информации (ПБД).

Для обеспечения надежной передачи ПБД необходимо выполнить следующие процедуры:

Шаг 1: Сформировать между источником и приемником управляющей информации ДСС определенной конфигурации из *К* путей;

Шаг 2: Определить состояние ДСС по выражению (21).

Шаг 3: При выполнении требований по надежности закончить определение состава и структуры ДСС (числа и конфигурации путей доставки ПБД) и перейти к шагу 4. В обратном случае сформировать *К* + 1 путь и вернуться к шагу 2.

Шаг 4. Вывод состава ДСС – число и конфигурацию путей доставки ПБД.

3. Модель обслуживания приоритетных потоков ПБД в СОДУ с ненадежными сетевыми элементами

На данном этапе с учетом результатов п. 1 и 2 может быть использована существующая модель *Б. В. Гнеденко* [7]. Отличными будут только условия ее применения:

входными данными модели являются объемно-временные характеристики трафика ИУИ, соответствующие типу и режиму функционирования СОДУ (п. 1);

скорости передачи в КСУ определяются после определения конфигурации соответствующих ДСС (п. 2), с учетом многопутевой доставки ПБД.

Следовательно, в рамках аналитико-алгоритмической модели формализм Гнеденко оказывается "погруженным" в специфику функционирования СОДУ. Пусть $M\left[t_s^{(r)}\right]$ и $D\left[t_s^{(r)}\right]$ – математическое ожидание и дисперсия случайной величины $t_s^{(r)}$ (времени пребывания ПБД *r*-го приоритета в *s*-том элементе СОДУ; $P_s^{\text{своевр}(r)}$ – вероятность своевременной доставки сообщения *r*-го приоритета. Тогда в случае выхода из строя отдельных КСУ, через которые проходит маршрут доставки, ПБД ожидают своего обслуживания в запоминающих устройствах на входе соответствующих КСУ до тех пор, пока каналы не будут восстановлены, и

$$M\left[t_s^{(r)}\right] = \frac{\left(\chi_s \cdot k_s^{\text{г}}\right)^2 \cdot \left(1 - k_s^{\text{г}}\right) + d_s \cdot \sum\limits_{r=1}^{R} \lambda_s^{(r)}}{d_s \cdot \left(\chi_s \cdot k_s^{\text{г}} - \sum\limits_{r=1}^{r} \lambda_s^{(r)}\right) \cdot \left(\chi_s \cdot k_s^{\text{г}} - \sum\limits_{r=1}^{r-1} \lambda_s^{(r)}\right)} + \frac{1}{\chi_s \cdot k_s^{\text{г}}}, \tag{23}$$

при условии, что $\sum\limits_{r=1}^{0} \lambda_s^{(r)} = 0$,

$$D\left[t_s^{(r)}\right] = \alpha_2\left[t_s^{(r)}\right] - \left(M\left[t_s^{(r)}\right]\right)^2, \tag{24}$$

$$P_s^{\text{своевр}\,(r)} = 1 - P_s^{\text{БД вр}\,(r)} = \left(\frac{\beta_s^{\text{гамма}\,(r)}}{v_s^{(r)} + \beta_s^{\text{гамма}\,(r)}} \right)^{\alpha_s^{\text{гамма}\,(r)}}, \qquad (25)$$

где $\alpha_s^{\text{гамма}\,(r)} = \left(M\left[t_s^{(r)}\right]\right)^2 \cdot \left(D\left[t_s^{(r)}\right]\right)^{-1}$ и $\beta_s^{\text{гамма}\,(r)} = \alpha_s^{\text{гамма}\,(r)} \cdot \left(M\left[t_s^{(r)}\right]\right)^{-1}$ – параметры гамма-распределения

$$s\left(t_s^{(r)}\right) = \frac{\left(\beta_s^{\text{гамма}\,(r)}\right)^{\alpha_s^{\text{гамма}\,(r)}}}{\Gamma\left(\alpha_s^{\text{гамма}\,(r)}\right)} \left(t_s^{(r)}\right)^{\alpha_s^{\text{гамма}\,(r)}-1} \cdot \exp\left(-\beta_s^{\text{гамма}\,(r)} \cdot t_s^{(r)}\right),\ t_s^{(n)} \geq 0, \qquad (26)$$

которое может быть использовано для аппроксимации плотности распределения времени пребывания сообщения *r*-го приоритета [8].

Аналитические выражения для расчета показателей качества обслуживания ПБД *r*-го приоритета отдельными ИН СОДУ могут быть представлены в виде

$$P_{n,m}^{\text{своевр}(r)} = 1 - P_{n,m}^{\text{ПБД вр}\,(r)} = \prod_{\substack{s \\ C_S \in \text{ВК}_{n,m}}} P_s^{\text{своевр}(r)}; \qquad (27)$$

$$M\left[t_{n,m}^{(r)}\right] = \sum_{\substack{s \\ C_S \in \text{ВК}_{n,m}}} M\left[t_s^{(r)}\right], \qquad (28)$$

$$D\left[t_{n,m}^{(r)}\right] = \sum_{\substack{s \\ C_s \in \text{ВК}_{n,m}}} D\left[t_s^{(r)}\right]. \qquad (29)$$

$C_s \in \text{ВК}_{n,\,m}$ – означает, что необходимо учесть все КСУ, через которые проходит ПБД из *n*-го узла коммутации в *m*-й узел коммутации

Аналитические выражения для расчета показателей качества обслуживания ПБД СОДУ в целом определяются с учетом доли трафика *r*-го приоритета того или иного ИН в суммарном потоке *r*-го приоритета поступающим в СОДУ на обслуживание

$$P^{\text{своевр}\,(r)} = 1 - P^{\text{ПБД вр}\,(r)} = \left(\gamma^{(r)}\right)^{-1} \cdot \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} \left(\gamma_{n,m}^{(r)} \cdot P_{n,m}^{\text{своевр}\,(r)}\right), \qquad (30)$$

$$M\left[t^{(r)}\right] = \left(\gamma^{(r)}\right)^{-1} \cdot \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} \left(\gamma_{n,m}^{(r)} \cdot M\left[t_{n,m}^{(r)}\right]\right), \qquad (31)$$

$$D\left[t^{(r)}\right] = \left(\gamma^{(r)}\right)^{-1} \cdot \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} \left(\gamma_{n,m}^{(r)} \cdot D\left[t_{n,m}^{(r)}\right]\right). \qquad (32)$$

В свою очередь средневзвешенные показатели качества обслуживания ПБД СОДУ в целом определяются с учетом доли трафика того или иного приоритета в суммарном потоке данных поступающим в СОДУ на обслуживание

$$P^{\text{своевр}} = 1 - P^{\text{ПБД вр}} = (\gamma)^{-1} \cdot \sum_{r=1}^{R} \left(\gamma^{(r)} \cdot P^{\text{своевр}\,(r)} \right), \tag{33}$$

$$M[t] = (\gamma)^{-1} \cdot \sum_{r=1}^{R} \left(\gamma^{(r)} \cdot M\left[t^{(r)}\right] \right), \tag{34}$$

$$D[t] = (\gamma)^{-1} \cdot \sum_{r=1}^{R} \left(\gamma^{(r)} \cdot D\left[t^{(r)}\right] \right). \tag{35}$$

Таким образом, выражения (23)–(35) позволяют формально представить вероятностно-временные характеристики СОДУ с учетом надежности КСУ и наличия приоритетов.

При отсутствии приоритетов на этом этапе моделирования может использоваться модель Г. П. Захарова [9], а в случае абсолютно надежных КСУ – модель Л. Клейнрока [10].

Заключение

В ходе моделирования получены новые выражения, уточняющие нагрузочные характеристики потока ПБД на входе КСУ, предложен инструментарий, позволяющий описывать ситуации многопутевой передачи управляющей информации по СОДУ при ограниченной надежности отдельных КСУ в рамках ДСС и информационных направлений в рамках МСС. При этом, использование модифицированного распределения Энгсета позволяет точнее оценивать среднее число сеансов служебной связи, предельное и среднее значение эффективной скорости агрегированного потока данных, что позволяет более рационально распределять канальный ресурс СОДУ (минимизировать непроизводительные затраты ресурсов пропускной способности линий передачи), необходимый для организации служебной связи. Использование новой логической функции – логического сочетания, позволяет осуществить удобное и конструктивное формальное представление СОДУ и его элементов с учетом дублирования маршрутов передачи ПБД.

Разработанная аналитико-алгоритмическая модель СОДУ ТКС, учитывающая вариативность интенсивности поступления потока управляющей информации, многопутевую доставку ПБД различного приоритета, может быть применена для решения расчетных и исследовательских задач анализа и синтеза СОДУ гетерогенных ТКС, разработки алгоритмов выбора оптимальных скоростей передачи каналов СОДУ ТКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. ITU-T Recommendation M.3010. Principles for a telecommunications management network, 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://faculty.wiu.edu/Y-Kim2/ M.3010.pdf. – Загл. с экрана.
2. Дымарский, Я. С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я. С. Дымарский, Н. П. Крутякова, Г. Г. Яновский. – М. : ИТЦ "Мобильные коммуникации", 2003. – 384 с.
3. Степанов, С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М. : Эко-Трендз, 2010. – 392 с.
4. Назаров, А. Н. АТМ: Технические решения создания сетей / А. Н. Назаров, И. А. Разживин, М. В. Симонов : под ред. А. Н. Назарова. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001. - 376 с. : ил.
5. Трегубов, Р.Б. Методика оптимизации характеристик сетей передачи данных малой и средней связности / Р.Б. Трегубов, И.А. Саитов, А.В. Королёв // Телекоммуникации. – 2006. – № 11. – С. 14–19.
6. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник, В. Ф. Овчеренко [и др.] : под ред. Б. Я. Дудника. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.
7. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей : 7-е изд. – М. :УРСС, 2001. – 448 с.
8. Сычёв, К. И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи. – СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2008. – 272 с.
9. Захаров, Г. П. Методы исследования сетей передачи данных. – М. : Радио и связь, 1982. – 208 с.
10. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями : пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 600 с.

Рецензент: Орешин Андрей Николаевич, заместитель начальника кафедры, кандидат технических наук, ГКОУ ВПО "Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации", Россия, Орёл, E-Mail: strongnuts@mail.ru.

REFERENCES

1. ITU-T Recommendation M.3010. Principles for a telecommunications management net-work, 2000. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://faculty.wiu.edu/Y-Kim2/M.3010.pdf. – Zagl. s jekrana.
2. Dymarskij, Ja. S. Upravlenie setjami svjazi: principy, protokoly, prikladnye zadachi / Ja. S. Dymarskij, N. P. Krutjakova, G. G. Janovskij. – M. : ITC "Mobil'nye kommunikacii", 2003. – 384 s.
3. Stepanov, S. N. Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej. – M. : Jeko-Trendz, 2010. – 392 s.
4. Nazarov, A. N. ATM: Tehnicheskie reshenija sozdanija setej / A. N. Nazarov, I. A. Razzhivin, M. V. Simonov : pod red. A. N. Nazarova. – M. : Gorjachaja linija-Telekom, 2001. 376 s. : il.
5. Tregubov, R.B. Metodika optimizacii harakteristik setej peredachi dannyh maloj i srednej svjaznosti / R.B. Tregubov, I.A. Saitov, A.V. Koroljov // Telekommunikacii. – 2006. – № 11. – S. 14–19.
6. Nadezhnost' i zhivuchest' sistem svjazi / B. Ja. Dudnik, V. F. Ovcherenko [i dr.] : pod red. B. Ja. Dudnika. – M. : Radio i svjaz', 1984. – 216 s.
7. Gnedenko, B. V. Kurs teorii verojatnostej : 7-e izd. – M. : URSS, 2001. — 448 s.
8. Sychjov, K. I. Mnogokriterial'noe proektirovanie mul'tiservisnyh setej svjazi. – SPb. : Izd-vo Politeh. un-ta, 2008. – 272 s.
9. Zaharov, G. P. Metody issledovanija setej peredachi dannyh. – M. : Radio i svjaz', 1982. – 208 s.
10. Klejnrok, L. Vychislitel'nye sistemy s ocheredjami : per. s angl. – M. : Mir, 1979. – 600 s.