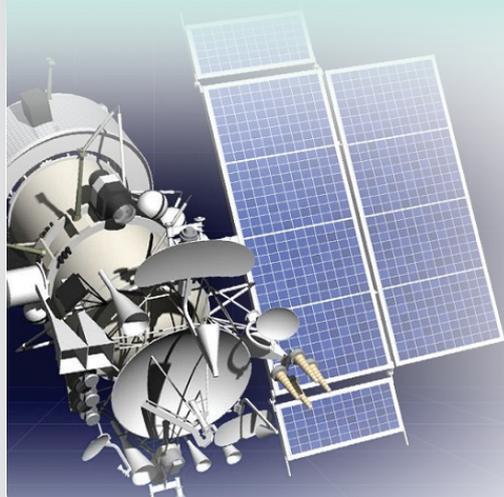


## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.396

### ЗАДАЧА ВЫБОРА МОМЕНТА ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВНОГО КАНАЛА ПРИ УГРОЗЕ ПЕРЕГРУЗКИ НАПРАВЛЕНИЯ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ

### THE PROBLEM OF CHOOSING THE MOMENT OF TURNING ON THE BACKUP CHANNEL IN CASE OF A THREAT OF OVERLOADING THE DIRECTION OF COMMUNICATION, TAKING INTO ACCOUNT THE DELAY IN CONTROL

**Евгений Николаевич Косяков**  
кандидат технических наук, доцент  
профессор кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Дмитрий Юрьевич Мишин**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Андрей Сергеевич Севостьянов**  
адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Александр Евгеньевич Кондрашин**  
кандидат технических наук  
директор  
Единый отраслевой закупочный центр АО «Организация «АГАТ»  
Адрес: 125047, Москва, ул. Бутырский вал, д. 18, стр. 1  
Тел.: 8(495) 631-90-09 доб. 2612  
E-mail: Kondrashinae@agat-rosocosmos.ru

#### Аннотация

Рассматриваются научно-технические предложения по реализации оперативного резервирования каналов для обеспечения абонентам систем спутниковой связи требуемого качества обслуживания в условиях непредсказуемых колебаний информационного трафика и угрозах возникновения перегрузки направлений связи.

**Ключевые слова:** марковски-модулированный пуассоновский поток, конечная марковская цепь, спутник-ретранслятор, частотно-энергетический ресурс, спутниковая система связи.

#### Summary

Scientific and technical proposals are considered for the implementation of operational channel redundancy to provide subscribers of satellite communication systems with the required quality of service in conditions of unpredictable fluctuations in information traffic and threats of overload of communication directions.

**Keywords:** Markov-modulated Poisson flow, finite Markov chain, repeater satellite, frequency-energy resource, satellite communication system.

#### Введение

Важным преимуществом радиосистем передачи информации, в особенности, систем спутниковой связи (ССС) [1], является возможность оперативного маневра радиоканалами между направлениями связи в соответствии с текущими потребностями абонентов. Особую значимость указанное преимущество приобретает при нестабильности объемов передаваемого трафика на разных направлениях связи, когда периоды с высокой интенсивностью нагрузки (пульсации)

чередуются с периодами низкой нагрузки. Как показывают многочисленные исследования [2-4, 6, 9] информационный трафик в современных телекоммуникационных сетях характеризуется высокой степенью «самоподобия» (фрактальности), что существенно затрудняет плановое распределение частотно-энергетического ресурса [1, 2] (далее, радиоресурса) спутника-ретранслятора (СР) между направлениями связи на долгосрочной основе. Поэтому, при планировании радиоресурса, как правило, ориентируются

на пиковую нагрузку для каждого радионаправления с тем, чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов (Quality of Service, QoS). Однако такой подход заметно снижает эффективность использования ограниченного радиоресурса СР. Альтернативой такому подходу является оперативное подключение резервных каналов на тех направлениях связи, в которых возникает угроза перегрузки вследствие неожиданных пульсаций информационного трафика. В качестве модели «самоподобного» входного потока используется двумерный марковски-модулированный пуассоновский процесс (Markov-modulated Poisson processes [3, 4, 6, 9], далее ММР-поток), управляемый эргодической конечной цепью Маркова (КМЦ). Основным фактором, осложняющим решение задачи оперативного включения каналов при угрозах перегрузки, являются высокие задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях и, соответственно, запаздывание в управлении резервными каналами [1, 2, 8]. В работе предложена модель процесса обслуживания (передачи) нестационарного (пульсирующего) входного потока сообщений земной станцией спутниковой связи с возможностью подключения (по запросу) резервного канала СР при возникновении угрозы перегрузки в направлении связи.

### Постановка задачи оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

При планировании радиоресурса [2] для новых направлений связи необходимо оценивание (прогнозирование) требуемой пропускной способности организуемых каналов, которая определяет предельно достижимую скорость передачи информации ( $C_k$ ). Основным условием передачи планируемого объема информации  $V_k$  без искажения в формируемом канале является выполнение требования:  $C_k \geq V_k$ .

Для «самоподобных» потоков сообщений, поступающих на вход системы передачи информации (СПИ), при планировании пропускной способности организуемых каналов необходимо учесть дополнительный резерв  $\Delta C_k$  сверх  $V_k$ , чтобы компенсировать случайные пульсации информационного трафика и/или неточности прогноза.

Традиционное средство компенсации пульсаций трафика – буферизация сообщений – также используется, но ограничено требованиями к задержке передаваемых сообщений.

Резерв пропускной способности канала  $\Delta C_k$  определяется как уровнем пульсаций передаваемого трафика, так и уровнем допустимых

потерь сообщений. При высоком уровне пульсаций передаваемого трафика требования к запасу  $\Delta C_k$  могут превышать значение  $V_k$  на десятки процентов. Содержание таких запасов радиоресурса в каждом направлении связи в условиях кратковременного повышения интенсивности трафика и ограниченности ресурсов спутника-ретранслятора (СР) является нерациональным.

Альтернативный подход предполагает вместо постоянного поддержания в радионаправлении запаса по скорости  $\Delta C_k$  использование в качестве основного – канала, скорость которого соответствует средней прогнозируемой нагрузке  $C_k \approx V_k$ , а в случае угрозы перегрузки оперативное подключение резервного канала с аналогичными характеристиками. Основная сложность применения предложенного подхода состоит в том, как определить момент, когда возникает угроза перегрузки, и как долго будет подключаться резервный канал с учетом задержки в управлении и настройки параметров канала. Одним из способов фиксации момента возникновения угрозы перегрузки является контроль за уровнем заполнения буфера порта исходящего направления, когда при накоплении в буфере некоторого порогового количества ( $L$ ) сообщений формируется запрос на подключение резервного канала. Поэтому задача выбора момента включения дополнительного канала при угрозе перегрузки с учетом запаздывания может быть сформулирована так: определить максимальное пороговое значение  $L$ , при котором QoS не выйдет за пределы нормы с учетом случайной задержки в подключении резервного канала.

Дополнительно возникает задача технико-экономического обоснования соотношения стоимости аренды каналов в долгосрочной и кратковременной перспективе с учетом того, что оперативный маневр каналами потребует более сложных операций управления связью.

В работе представлен вариант поиска возможного решения поставленной задачи на основе построения математической модели канала передачи сообщений с возможностью подключения дополнительного резервного канала при определенном уровне ( $L$ ) заполнения буфера общей емкостью  $R$ . В качестве модели пульсирующего входного потока сообщений используется двумерный ММР-поток [3, 4], который может находиться в двух состояниях: состоянии  $A$ , которое соответствует периоду пульсации с высокой интенсивностью нагрузки  $\lambda_1$ , и в состоянии  $S$  (пауза), которое соответствует периоду с низкой интенсивностью нагрузки  $\lambda_2$ . Продолжительность периодов пребывания ММР-процесса в состояниях  $A$  и  $S$  являются случайными

величинами с экспоненциальным законом распределения и средними значениями  $T_a$  и  $T_s$  соответственно.

### Разработка математической модели оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

В качестве прототипа разрабатываемой модели рассмотрим одноканальную систему массового обслуживания с аналогичным входным ММР-потокom [3, 6] и ограниченным буфером  $R$  без резервирования, но с постоянным резервом  $\Delta C_k$  для поддержания необходимого QoS. Для оценки QoS поступающего трафика будем использовать вероятность потери сообщения (пакета) при переполнении буфера. Будем полагать, что емкость буфера  $R$  одинакова для обеих моделей, чтобы уравнивать условия по задержке и потерям сообщений. Входящий ММР-поток в обеих моделях имеет одинаковые интенсивности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (сообщений в единицу времени) в течение периодов пульсации ( $T_a$ ) и паузы ( $T_s$ ). Средняя интенсивность для обеих моделей также полагается одинаковой:

$$\lambda = (\lambda_1 T_a + \lambda_2 T_s) / (T_a + T_s).$$

Если средний объем сообщений, передаваемых в единицу времени, составляет  $\nu$  бит, тогда средняя скорость передачи информации в направлении связи составит  $V_{kr} = \lambda \nu$ , (бит/с).

Если скорость передачи в канале  $C_k = V_k + \Delta C_k$ , то среднее время обслуживания сообщения составит  $b = \nu / C_k$  (с).

Предположим, что время передачи одного сообщения является величиной случайной с экспоненциальным законом распределения. Тогда модель канала передачи с ограниченным буфером (емкостью  $R$ ) и входным ММР-потокom с двумя состояниями может быть представлена в виде двумерной конечной марковской цепи (КМЦ) [5] с числом состояний  $2(R+2)$ , граф состояний которой представлен на *рисунке 1*, где  $\mu = 1/b$  – интенсивность обслуживания (передачи) сообщений.

Состояния нижнего яруса  $\{p_{i,1}, i=0, \dots, R+2\}$

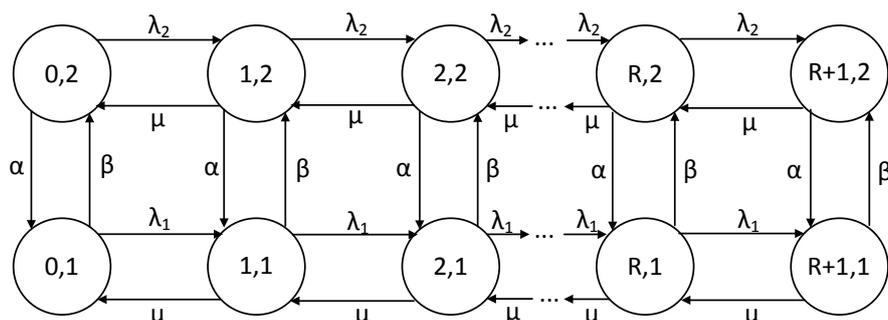
соответствуют пребыванию ММР-потока в состоянии  $A$  (пульсация), а состояния верхнего яруса  $\{p_{i,2}, i=0, \dots, R+2\}$  соответствуют пребыванию ММР-потока в состоянии  $S$  (пауза). Стационарные вероятности состояний  $\{p_{ij}\}$  для представленной КМЦ могут быть рассчитаны достаточно просто по известным методикам [5,7,8]. Для оценки QoS используется вероятность потери сообщений, что эквивалентно вероятности заполнения буфера, т.е. сумме вероятностей состояний при  $i=R+1$ . Тогда, зная требования к QoS, может быть определена необходимая интенсивность обслуживания  $\mu$ , а следовательно, и скорость передачи информации  $C_k = \mu \nu$  бит/с. При этом резерв пропускной способности составит  $\Delta C_k = C_k - V_k$ .

Принимая за 100% необходимую пропускную способность канала для передачи информации объемом  $V_k$  без учета пульсации, следует что в интересах обеспечения требуемого QoS в период пульсации трафика с высокой интенсивностью нагрузки необходимо предусмотреть наличие резерва пропускной способности  $(\Delta C_k / V_k) 100\%$ . Эффективность такого решения ( $\Theta_1$ ) может быть оценена отношением увеличения задействованной пропускной способности канала для передачи трафика в условиях пиковой нагрузки к объему передаваемого трафика без учета пульсаций  $V_k$ :

$$V_k : \Theta_1 \frac{(V_k + \Delta C_k)}{V_k} 100\%,$$

т.е. по существу, коэффициент  $\Theta_1$  показывает, насколько надо увеличить скорость передачи в канале, чтобы передавать пульсирующий трафик с допустимым уровнем потерь.

При построении модели альтернативного варианта [8] (с оперативным включением дополнительного канала при угрозе перегрузки) будем считать, что пропускная способность канала выбрана в соответствии с прогнозируемой (измеренной) средней скоростью поступающего трафика:  $C_k \approx V_k$ . Далее, будем полагать, что критерием возникновения угрозы перегрузки служит уровень заполнения буфера сообщениями  $L (1 < L < R)$ , при котором отправляется запрос на



**Рис. 1.** Граф состояний КМЦ для одноканальной системы с двумерным входным ММР-потокom и буфером емкостью  $R$

подключение и настройку дополнительного канала. На это требуется случайное время  $T_3$ , распределенное по экспоненциальному закону со средним значением  $z$ .

После передачи всех сообщений из буфера, арендованный резервный канал освобождается, а система переходит в исходный одноканальный режим.

Процесс обслуживания сообщений в СПИ с возможностью подключения резервного канала может быть представлен в виде трехмерной КМЦ, граф которой представлен на *рисунке 2*.

Первое измерение КМЦ (первый индекс состояний) соответствует количеству сообщений в СПИ. Для сокращения числа индексов состояний при обозначении состояний ММР-процесса используется второй индекс, причем четное значение соответствует состоянию  $S$  (паузы), а нечетное – состоянию  $A$  (пульсации). Верхний уровень КМЦ (состояния с индексами  $(i, 1)$  и  $(i, 2)$  при  $i=0, \dots, R+1$ ) соответствует одноканальному режиму функционирования СПИ, а нижний уровень (состояния с индексами  $(i, 3)$  и  $(i, 4)$  при  $i=2, \dots, R+2$ ) – двухканальному режиму. При достижении уровня заполнения буфера значения  $L$  формируется запрос на включение второго (резервного) канала, что соответствует переходам КМЦ в нижний ярус состояний (с интенсивностью  $\gamma$ ). Поскольку полагается (в качестве допущения), что переход в двухканальный режим занимает некоторое случайное время с экспоненциальным распределением вероятностей (при среднем значении  $z$ ), то интенсивность переходов в нижний ярус  $\gamma=1/z$ . В двухканальном режиме интенсивность обслуживания удваивается ( $2\mu$ ) и сохраняется до полного освобождения буфера, после чего второй канал отключается.

Задача состоит в том, чтобы определить максимальное (чтобы сократить время аренды дополнительного канала) значение  $L$ , при котором следует подключать дополнительный канал для

обеспечения требуемого QoS (уровня потерь).

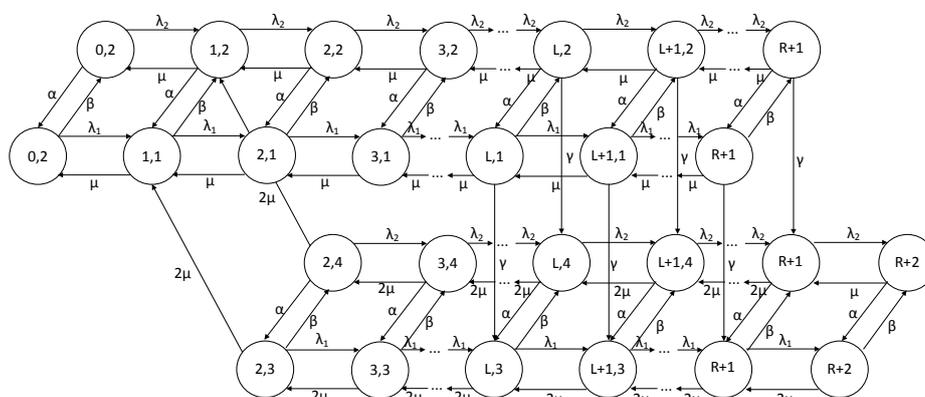
Выбор момента формирования запроса на подключение резерва (величина  $L$ ), в первую очередь, зависит от задержки включения и настройки дополнительного канала  $z$ , а во вторую очередь, от емкости буфера. В связи с этим необходимо оценить, как влияет оперативность подключения дополнительного канала (задержка  $z$ ) на эффективность предложенного подхода.

Для представленной трехмерной КМЦ (*рисунк 2*) существует установившийся режим равновесия [5], для которого могут быть рассчитаны стационарные вероятности состояний ( $p_{ij}$ ,  $i=0, \dots, R+2$ ;  $j=1, \dots, 4$ ), с помощью которых возможно оценивать показатели качества модели в зависимости от выбранного порога  $L$ . Поскольку множество возможных значений  $L$  ограничено емкостью буфера, т.е.  $L \in \{2, \dots, R+1\}$ , то критерием выбора является максимальное значение  $L$ , при котором показатель QoS остается в пределах нормы. Например, в современных СПИ вероятность потери сообщения (пакета) нормируется на уровне 1% [1].

### Итерационный метод расчета многомерной конечной марковской цепи для модели оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

При расчете вероятностей состояний многомерных КМЦ в установившемся режиме получил распространение итерационный векторно-матричный метод [7]. Однородность и неприводимость представленной трехмерной КМЦ (*рисунк 2*) гарантирует [5] существование установившегося режима и стационарного распределения вероятностей состояний при любых значениях интенсивностей переходов.

Обозначим через  $\mathbf{p}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}\}$  векторы-строки вероятностей состояний  $(i, j)$ , где  $i=0, \dots, R+2$  выступает в роли индекса укрупненных состояний и обозначает количество



**Рис. 2.** Граф КМЦ для одноканальной системы с входным ММР-потокм, буфером емкостью  $R$  и подключением резервного канала при заполнении буфера до уровня  $L$

сообщений в системе, а  $j=\{1, \dots, 4\}$  – номера микросостояний, соответствующих состояниям ММР-процесса (нечетные – пульсация, четные – пауза) и режиму каналов ( $j=1, 2$  – одноканальный режим,  $j=3, 4$  – двухканальный режим). Тогда уравнения баланса переходов между состояниями могут быть записаны в виде системы векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned} p_0 D_0 &= p_1 B_1 + p_0 C_0; \\ p_i D_i &= p_{i-1} A_{i-1} + p_{i+1} B_{i+1} + p_i C_i; \\ p_{R+2} D_{R+2} &= p_{R+1} D_{R+1} + p_{R+2} C_{R+2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_i, B_i, C_i, D_i$  – матрицы размерностью  $(4 \times 4)$  интенсивностей переходов при прибытии сообщений (вправо), при завершении обслуживания (влево), внутри  $i$ -го состояния и интенсивностей ухода из  $i$ -го состояния соответственно.

Путем несложных преобразований данную систему можно представить в виде, удобном для решения с помощью матричного процессора MATLAB:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_1 B_1 (C_0 - D_0)^{-1}; \\ p_i &= (p_{i-1} A_{i-1} + p_{i+1} B_{i+1}) (C_i - D_i)^{-1}, \quad i=1, \dots, R+1; \\ p_{R+2} &= p_{R+2} A_{R+2} (C_{R+2} - D_{R+2})^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Применяя к указанной системе векторно-матричных уравнений итерационную схему [7] последовательных приближений, основанную на численном методе Гаусса-Зейделя, можно рассчитать стационарные вероятности состояний многомерной КМЦ с любой заданной точностью. Итерационная схема последовательных приближений работает при любом начальном приближении, поэтому наиболее простым начальным приближением из условия нормировки ( $\sum p_{ij} = 1$ ) может служить равномерное приближение:  $p_{ij} = 1/4/(R+2)$ . Однако более быстрая сходимость наблюдается, если в начальном приближении дополнительно учесть, что при одинаковом индексе  $i$  величины вероятностей состояний с четными индексами  $j$  относятся к вероятностям состояний с нечетными индексами  $j$  как длительности периодов паузы ( $T_p$ ) и периодов пульсации ( $T_a$ ) соответственно.

Критерием завершения расчетов и подтверждением корректности полученного решения в представленном примере является совпадение баланса переходов для состояний верхнего и нижнего ярусов, а также баланса между ярусами с четными и нечетными индексами  $j$ , которые соответствуют состояниям ММР-потока (пауза или пульсация).

Вероятность потери сообщений вследствие переполнения буфера для данной модели будет составлять:

$$P_n = p_{R+1,1} + p_{R+1,2} + p_{R+2,3} + p_{R+2,4}, \quad (3)$$

Сумма вероятностей верхнего уровня  $S_1 = \sum (p_{i1} + p_{i2})$  позволяет оценить относительную

долю времени, в течение которого система работает только в одноканальном режиме, а сумма вероятностей нижнего уровня  $S_2 = \sum (p_{i3} + p_{i4})$  – относительную долю времени, когда система работает в двухканальном режиме.

### Результаты моделирования оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания при обслуживании ММР-потоков сообщений

Для апробации работоспособности предложенного метода рассмотрим процесс обслуживания различных ММР-потоков и оценим эффективность оперативного подключения резервного канала в зависимости от запаздывания управления.

Для характеристики неравномерности ММР-потока будем использовать коэффициент пульсации [3,9]  $K_{\Pi} = \lambda_1/\lambda$ , равный отношению интенсивности поступления сообщений в период пульсации к средней интенсивности. При этом соотношение длительностей периодов пульсации и паузы ( $T_a$  и  $T_p$ ) будем выбирать таким образом, чтобы средняя интенсивность поступления сообщений всегда была равна 1 (т.е. произведем нормировку модельного времени к среднему времени передачи отдельного сообщения ( $b$ ) по стандартному каналу, производительность которого  $\mu = 1/b$  соответствует средней интенсивности поступления сообщений  $\lambda$ ):

$$T_p/T_a = (\lambda_1 - 1)/(1 - \lambda_2). \quad (4)$$

Например, если положить  $\lambda_1 = 2$ , а  $\lambda_2 = 0.5$  ( $K_{\Pi} = 2$ ), то соотношение  $T_p/T_a = 2$ . Для примера выберем среднюю длительность пульсации  $T_a = 15$ , тогда  $T_p = 30$ . Нетрудно заметить, что при условии  $\lambda = 1$ , интенсивность  $\lambda_1$  будет совпадать с  $K_{\Pi}$ . Учитывая, что средний объем пульсации за период  $T_a$  составит  $N_a = \lambda_1 T_a = 30$  сообщений, будем полагать, что емкость буфера исходящего порта выбирается в соответствии с ожидаемым объемом пульсации, т.е.  $R \approx N_a$ . При моделировании зафиксируем объем буфера ( $R = 30$ ) и рассмотрим три варианта входного потока для значений коэффициента пульсации  $K_{\Pi} = 2, 2.5, 3$ . Очевидно, что для значений  $K_{\Pi} > 3$  включение лишь одного дополнительного канала не сможет «погасить» всю пульсацию, в течение которой интенсивность трафика более чем трехкратно превышает производительность типового канала.

Примем цену аренды канала с пропускной способностью  $V_k$  за 100%, а цену экстренной аренды дополнительного канала за 150%. Тогда эффективность работы СПИ в режиме резервирования с временной арендой дополнительного канала оценивается соотношением:

$$\mathcal{E}_2 = (S_1 + 2.5S_2) 100\%. \quad (5)$$

В таблице 1 приведены результаты моделирования трех вариантов входного ММР-потока для разных значений  $K_{\Pi}$  при условии, что в каждом варианте поддерживается одинаковое QoS (вероятность потерь сообщений нормируется на уровне 0,01).

Для каждого значения запаздывания ( $z$ ) в подключении резервного канала приведено значение  $L$ , определяющее порог заполнения буфера, при достижении которого передается запрос на подключение резервного канала для обеспечения требуемого QoS. Емкость буфера для всех вариантов выбрана одинаковой (в соответствии со средним объемом пульсации  $N_a = \lambda_1 T_a = 30$ ), а среднее заполнение (очередь) буфера  $q$  позволяет судить (с учетом нормировки времени) о задержках ожидания сообщений в буфере.

Ключевым параметром таблицы является средняя задержка подключения резервного канала  $z_{\Pi}$ , нормированная к среднему времени передачи сообщения  $b$ :  $z_{\Pi} = z/b$ . Учитывая, что время включения и настройки резервного канала не может быть меньше времени передачи сообщения, то анализируемый диапазон изменения задержки  $z_{\Pi}$  выбран от 1 до уровня задержки, при которой дополнительный канал необходимо подключать сразу при появлении первого сообщения в буфере ( $L=2$ ).

В последней строке таблицы приведены значения относительных издержек ( $\mathcal{E}_1$ ) для одноканальной системы с аналогичным буфером без резервирования для тех же вариантов входного ММР-потока. При этом значение  $\mathcal{E}_1$  показывает, какую долю пропускной способности канала надо дополнительно арендовать на постоянной основе, чтобы «справляться» с неожиданными перегрузками канала трафиком, интенсивность которого в период пульсации в 2-3 раза превышает среднюю (прогнозируемую) величину. Так для случая, когда коэффициент пульсации

$K_{\Pi}=3$ , необходим канал, фактически, с удвоенной скоростью передачи ( $\mathcal{E}_1=198\%$ ).

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что для всех рассматриваемых случаев оперативный маневр резервными каналами дает положительный эффект от 40 до 15% по сравнению с постоянной арендой дополнительного радиоресурса для каждого направления связи. Однако по мере увеличения задержек включения резервных каналов эффект от маневра резервами заметно снижается. Так, при увеличении значений относительной задержки  $z_{\Pi}$  свыше 8, выигрыш составляет менее 20%. Кроме того, следует отметить, что снижение оперативности резервирования (увеличение задержки  $z_{\Pi}$ ) приводит к необходимости снижения порогового значения  $L$ , достижение которого является критерием возникновения угрозы перегрузки и определяет момент передачи запроса. При увеличении  $K_{\Pi}$  входящего ММР-потока от 3 и выше подключение всего лишь одного дополнительного канала дает заметный эффект только при мгновенной реакции на угрозу перегрузки, что и видно из третьего раздела таблицы (т.е. постоянно наготове должен быть дополнительный резервный канал). В четвертом столбце каждого раздела для трех значений  $K_{\Pi}$  приведены значения  $\mathcal{E}$ , которые соответствуют относительной эффективности оперативного подключения дополнительного канала, в том случае, когда его стоимость совпадает со стоимостью основного канала (а не на 50% выше, как при расчетах  $\mathcal{E}_2$ ). Эта же величина позволяет судить о том, какую долю времени система работает в двухканальном режиме (цифры, превышающие 100%), т.е. о степени задействования резервного канала. Кроме того, эта величина дополнительно характеризует возможность совместного использования резервных каналов на нескольких направлениях связи, например, в сетях спутниковой связи.

**Таблица 1**

Результаты моделирования одноканальной системы с входным ММР-потоком и буфером  $R=30$  (резервный канал включается при заполнении буфера выше уровня  $L$ )

$z_{\Pi}$	$K_{\Pi}=2;$ $\lambda_1=2; T_a=15; \lambda_2=0.5; T_s=30$				$K_{\Pi}=2.5;$ $\lambda_1=2.5; T_a=12; \lambda_2=0.5; T_s=36$				$K_{\Pi}=3;$ $\lambda_1=3; T_a=10; \lambda_2=0.5; T_s=40$			
	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$
1	27	8.4	129	119	18	6.5	137	125	2	4.3	152	135
2	26	8.3	129	119	15	6.2	138	126				
3	25	8.2	129	119	13	6.0	139	126				
4	23	7.9	130	120	11	5.9	140	126				
6	21	7.8	103	120	7	5.6	141	127				
8	18	7.4	131	121	2	5.4	143	129				
10	15	7.1	132	122								
14	9	6.5	134	123								
18	2	6.3	136	124								
без доп. канала (рис.1)		5.8	$\mathcal{E}_1 = 152\%$			4.8	$\mathcal{E}_1 = 176\%$			4.2	$\mathcal{E}_1 = 198\%$	

### Заключение

Оперативный маневр резервными каналами при значительных колебаниях информационной нагрузки в направлениях связи позволяет существенно повысить эффективность использования радиоресурсов СПИ, в особенности систем спутниковой связи, несмотря на высокие задержки распространения сигналов и, как следствие, запаздывание в управлении. Особенно заметным этот эффект ожидается при совместном использовании резервов на нескольких направлениях связи, например, на узловых станциях спутниковой связи.

Следует отметить, что используемый подход для ММР-потока с двумя состояниями, соответствующим интенсивностям входного потока  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , легко может быть распространен [4] и на большее количество состояний в зависимости от контекста инженерной задачи. В работе рассмотрен случай, который наиболее часто встречается на практике, когда неожиданные периоды повышенной нагрузки различной продолжительности чередуются с периодами относительного «затишья».

В заключение следует отметить, что применение в качестве модели входного потока марковски-модулированного пуассоновского процесса (ММРП) является лишь одним из средств [3,4,6,9], позволяющих учесть сложную структуру мультисервисного трафика или так называемый эффект «самоподобия», характерный для трафика современных телекоммуникационных сетей. Однако применение такого подхода и проработанность методического аппарата расчета многомерных марковских моделей позволяет не только ставить задачи управления в стохастических системах, но и довести решение до численного результата.

### Литература

1. Тарасов С.С. Современные технологии и системы спутникового доступа в сеть Интернет // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт, 2013. Т.7. №10. С. 89-91.
2. K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang and M. Dohler. Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications // IEEE Communications Magazine, 2012. Vol.50(7). Pp.184-192.
3. Fischer, W., Meier-Hellstern, K. The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook. Perf. Eval, 1993. №18(2). Pp.149-171.
4. Anderson A.T., Nielsen B. F. An Application of Superposition of Two State Markovian Source to the Modeling of Self-Similar Behavior, Proc. INFO-COM'97, Kobe, Japan, 1997. Pp.196-204.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Под ред. В.И.Неймана. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
6. Akimaru H., Kawashima K., Teletraffic Theory and Applications. Springer, 1993.
7. Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д. Итерационный метод расчета многоканальных систем с произвольным законом обслуживания // Проблемы управления и теории информации, 1980. Т.9. №3. С.203-213.
8. Астахов Е.Н., Косяков Е.Н. Оперативное резервирование каналов как средство борьбы с перегрузками направлений связи // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2020. №673. С.42-47.
9. Ramesh N.I. Statistical analysis on Markov-modulated Poisson processes. Environmetrics 6(2), 1995. Pp.165-179.

