

УДК 681.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА СИСТЕМОЙ СВЯЗИ СО СЛУЧАЙНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ

С. И. Макаренко,

канд. техн. наук, преподаватель

М. А. Татарков,

инженер

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Проведено моделирование нестационарного потока в сети связи с CSMA методом доступа абонентов. Рассмотрен пуассоновский нестационарный поток с интенсивностью, представленной псевдослучайной тригонометрической функцией. Оценены показатели качества сети связи с данным входным потоком. Обосновано резервирование дополнительного канала в составе системы связи для обслуживания рассматриваемых информационных потоков.

Ключевые слова — нестационарный пуассоновский поток, показатели качества обслуживания, метод CSMA.

Введение

Реальные информационные потоки, передаваемые по информационным вычислительным сетям (ИВС), имеют более сложную структуру (например, обладают свойствами нестационарности, самоподобия и др.), чем используемые в моделях ИВС потоки со стационарными свойствами. Отсутствие учета нестационарности (варьирование в широких пределах интенсивности) входного потока в моделях каналов связи (КС) ведет к существенным погрешностям в определении характеристик качества обслуживания (QoS — Quality of Service) таких ИВС. Это в дальнейшем влияет на качество функционирования автоматизированных систем управления реального времени, в составе которых функционируют данные ИВС [1].

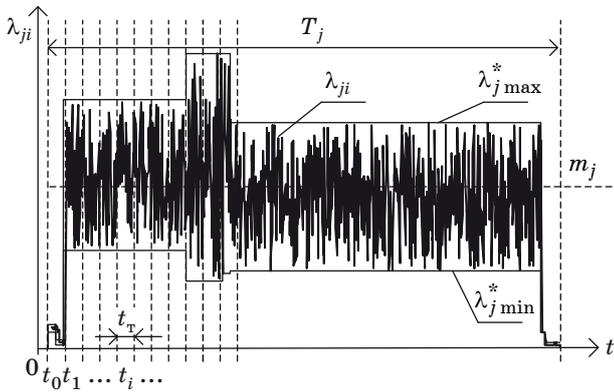
Ранее авторами была предложена обобщенная модель для расчета QoS сети связи (СС), моделируемой системой массового обслуживания (СМО), в случае если на вход системы поступает дважды стохастический поток заявок [2]. Частные решения данной модели были использованы при вычислении QoS проводного канала связи (КС) [3] и спутниковой сети с доступом по типу S-ALOHA [4]. Результатом применения обобщенного подхода [2] для вычисления параметров сети радиосвязи (СРС) с доступом абонентов по типу CSMA [5] явился вывод о невозможности аналитического

вычисления характеристик QoS. При оценке QoS для СРС со случайным множественным доступом с проверкой несущей частоты (МДПН) целесообразно использовать статистическое или численное моделирование. Таким образом, настоящая работа дополняет аналитическое решение [5] и позволяет качественно оценить QoS СРС с МДПН при поступлении на вход СРС нестационарного информационного потока.

Моделирование нестационарного информационного потока сложной псевдослучайной тригонометрической функцией

Для моделирования СРС с МДПН предлагается использовать модель СМО, предложенную в работе [6]. СРС имеет синхронизацию по тактам, причем на длительности такта t_r ведет информационный обмен один активный абонент. Пусть интенсивность λ_i^* реального входного в СРС трафика имеет сложную природу, меняется независимо при переходе от такта к такту, причем заранее неизвестно, какое значение примет данная интенсивность λ_i^* в каждый i -й такт, однако заданы границы изменения интенсивности потока от каждого абонента для каждого такта (рис. 1).

Интенсивность потока в этом случае необходимо моделировать аналитической функцией, удовлетворяющей следующим требованиям:



■ **Рис. 1.** Интенсивность информационного потока λ_{ji}^* и потока, задаваемого ПСТФ λ_{ji}

— вид функции должен соответствовать реальному изменению интенсивности информационных потоков в СРС;

— вероятностные характеристики должны быть равны вероятностным характеристикам реальным информационным потокам от абонентов СРС;

— функция должна иметь псевдослучайный характер изменения интенсивности и быть непериодической.

Для описания входного в СМО потока с изменяющейся нестационарной интенсивностью предлагается использовать сложную псевдослучайную тригонометрическую функцию (ПСТФ) интенсивности входного потока λ_{ji} на i -м такте от j -го абонента, удовлетворяющую вышеуказанным требованиям:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{ji} &= m_{\lambda_j} + \frac{\sigma_{\lambda_j}^2}{2} \sin(\omega_j t_i + \pi \cos(t_i W_{ji})) \times \\ &\times \cos(\omega_j t_i + \pi \sin(t_i W_{ji})) \\ W_{ji} &= \Omega_j + \sin(k_j \Omega_j t_i) \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

где m_{λ_j} — математическое ожидание интенсивности исходящего информационного потока j -го абонента; $\sigma_{\lambda_j}^2$ — дисперсия интенсивности реального информационного потока j -го абонента; ω_j — частота ПСТФ j -го абонента; Ω_j, k_j подбирают эмпирическим путем, исходя из наибольшего соответствия ПСТФ реальному информационному потоку от j -го абонента.

Параметры m_{λ_j} и $\sigma_{\lambda_j}^2$ могут быть вычислены априорно по анализу больших реализаций λ_{ji}^* на интервале активной передачи абонента T_j :

$$m_{\lambda_j} = \frac{1}{T_j} \sum_{l \in T_j} \lambda_{jl}^*; \quad \sigma_{\lambda_j}^2 = \frac{1}{T_j} \sum_{l \in T_j} (\lambda_{jl}^* - m_{\lambda_j})^2. \quad (2)$$

Если на основании проверки по критерию Колмогорова возможно выдвинуть гипотезу о нор-

мальном распределении случайных флуктуаций интенсивности λ_{ji}^* :

$$m_{\lambda_j} \approx \frac{1}{2} (\lambda_{j \max, l}^* - \lambda_{j \min, l}^*); \quad \sigma_{\lambda_j} \approx \frac{1}{6} (\lambda_{j \max, l}^* - \lambda_{j \min, l}^*).$$

Параметры Ω_j, k_j в (1) определяют исходя из соответствия ПСТФ λ_{ji} реальному информационному потоку λ_{ji}^* от j -го абонента по критерию Пирсона при заданной доверительной вероятности.

Предполагается, что на длительности i -го такта информационного обмена j -й абонент генерирует стационарный пуассоновский поток с интенсивностью λ_{ji} . При переходе к следующему $i + 1$ такту интенсивность пакетов от j -го абонента меняется в соответствии с ПСТФ на λ_{ji+1} . Это позволяет сгенерировать нестационарный поток пакетов, для которого в общем случае на всем интервале информационного обмена T_j выполняется свойство ординарности и отсутствия последействия. Вероятности поступления m пакетов на i -м такте за время τ ($t_i < \tau < t_{i+1}$) будут распределены по закону Пуассона [7]:

$$P_{ji}(m, \tau) = \frac{(\lambda_{ji} \tau)^m}{m!} e^{-\lambda_{ji} \tau}, \quad \tau \in [t_i, t_{i+1}), \quad (3)$$

параметры которого будут меняться при переходе к каждому следующему такту.

В этом случае для известной СМО с j входными потоками, при стационарной интенсивности обслуживания μ , вероятности нахождения системы в том или ином состоянии (количество заявок в системе l) длительности каждого такта будут зависеть от суммы интенсивностей λ_{ji} и, так как сохраняется свойство отсутствия последействия (свойство марковского процесса), будут определяться системой уравнений Колмогорова [7] с вероятностями p_0, \dots, p_l нахождения в системе соответственно 0, ..., l заявок:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_{0i}(t)}{dt} &= \mu p_{1i}(t) - \lambda_{nst i} p_{0i}(t) \\ \frac{dp_{1i}(t)}{dt} &= \mu p_{2i}(t) + \lambda_{nst i} p_{0i}(t) - \\ &- (\lambda_{nst i} + \mu) p_{1i}(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_{ki}(t)}{dt} &= \mu p_{k+1, i}(t) + \lambda_{nst i} p_{k-1, i}(t) - \\ &- (\lambda_{nst i} + \mu) p_{k, i}(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_{li}(t)}{dt} &= \lambda_{nst i} p_{l-1, i}(t) - \mu p_{l, i}(t) \\ \sum_{k=0}^l p_{ki}(t) &= 1 \\ \lambda_{nst i} &= \sum_j \lambda_{ji} \end{aligned} \right. . \quad (4)$$

Данное представление позволяет решить вышеуказанную систему относительно p_0, \dots, p_i для каждого i -го такта, после чего по известным методам [7] вычислить характеристики обслуживания заявок в СМО (время нахождения в очереди, время обслуживания в системе, относительную пропускную способность системы). Предложенный подход существенно упрощает задачу анализа характеристик СМО, так как характеристика интенсивности $\lambda_{nst\ i}$ не зависит от времени в течение длительности такта, а задача вычисления характеристик вышеуказанной системы при произвольных законах распределения $\lambda_j(t)$ практически не может быть решена в аналитическом виде [7]. Вместе с тем при представлении интенсивности в виде ПСТФ необходимо дополнительно оценить «шумы квантования» для выражений (1) и (2) либо использовать в (1) частоты в соответствии с частотой квантования Котельникова.

Использование при моделировании предложенной ПСТФ для описания нестационарного потока отличает данную работу от аналогов, где для упрощенного описания нестационарного потока требований в СМО используется поток второго порядка стохастичности [2–5], интервальные стационарные функции [8] или аппроксимация интенсивности интервально-линейными функциями [9].

Моделирование процесса обслуживания нестационарного информационного потока сетью радиосвязи со случайным множественным доступом

При моделировании обслуживания СРС с МДПН входного нестационарного потока нескольких абонентов за основу была взята модель из работы [6]. Пусть в системе имеется j абонентов, каждый из которых на протяжении независимого времени T_j активен и ведет информационный обмен по СРС. Обмен ведется в режиме разделения канала обслуживания во времени, по тактам длительностью t_T (размер окна передачи, соответствующий времени передачи одного абонента). В начале каждого такта абоненты пытаются получить доступ к КС; если КС свободен, то абонент осуществляет передачу длительностью t_T . В случае занятости КС абонент откладывает свою передачу до следующего такта в соответствии со случайным распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет КС и повторяет описанный алгоритм.

Введем обозначения: C — пропускная способность КС; S — относительная пропускная способность СРС; G — число попыток передач пакетов

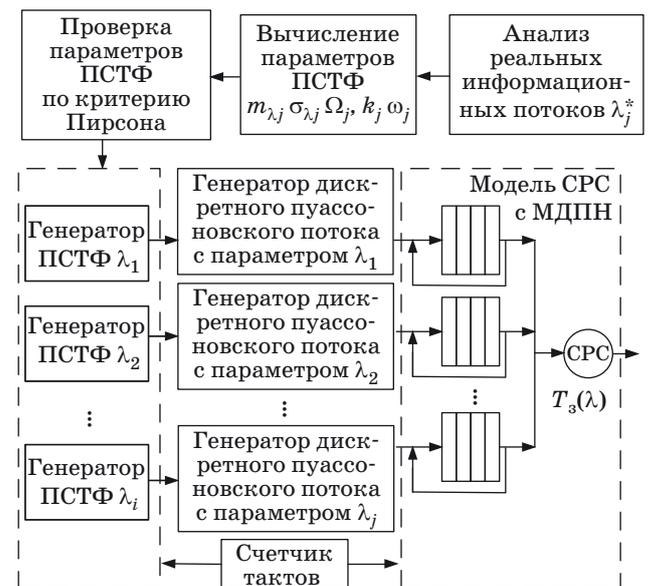
$G(t)$ за длительность такта t_T ; G_j — вероятность, что j -й абонент передаст пакет за длительность данного такта t_T ; T_3 — среднее время задержки пакета в системе, за которое пакет будет успешно передан и принят; K — задержка повторной передачи в количестве тактов, равномерно распределенная со средним значением K единиц на такт; c — скорость света; D_{mes} — объем пакета, бит; d_{max} — радиус СРС, км.

Ограничения модели [6]: канал является бесшумным; все абоненты находятся в пределах прямой видимости; канал для передачи квитанций отделен от рассматриваемого КС и предполагается, что квитанции о доставке прибывают надежно и без затрат; рассматриваемая модель действительна при наличии большого числа «равномерно интенсивных» пользователей.

Используем модель СРС в виде СМО (рис. 2), для упрощения рассмотрим случай, когда $j = 4$. Каждый абонент генерирует поток пакетов с интенсивностью λ_{ji} , причем интенсивность на i -м такте определяется выражением (1). Абоненты вступают в информационный обмен поочередно в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 и завершают его в момент t_5 (рис. 3). Суммарная интенсивность пакетов, поступающих в систему, для данной модели определяется суммой

$$\lambda_{nst}(t_i) = \sum_{j=1}^4 \lambda_j(t_i), \quad t = 0..t_5. \quad (5)$$

Поток с нестационарной интенсивностью $\lambda_{nst}(t_i)$ существенно отличается от потока со стационарной интенсивностью $\lambda_{st}(t_i)$, который, как



■ Рис. 2. Модель обслуживания СРС с МДПН нестационарных информационных потоков

правило, используется при моделировании СРС с МДПН и в данной модели определяется как

$$\lambda_{st}(t_i) = \sum_{j=1}^4 m_{\lambda_j}(t_i), \quad t = 0..t_5. \quad (6)$$

В результате по мере вступления все большего количества абонентов в информационный обмен расхождение между результатами модели потока, представляемого ПСТФ, и моделью стационарного пуассоновского потока нарастает (см. рис. 3):

$$\Delta\lambda(t_i) = |\lambda_{nst}(t_i) - \lambda_{st}(t_i)|, \quad t = 0..t_5, \quad (7)$$

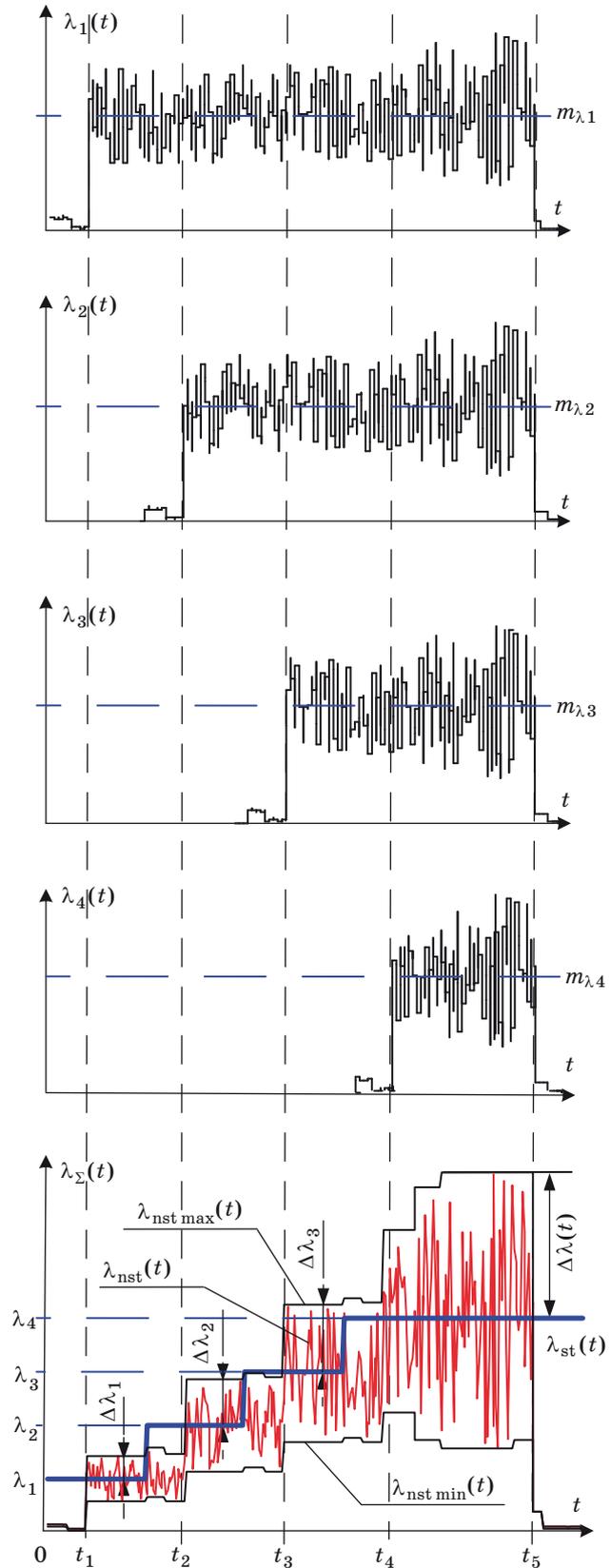
$$\Delta\lambda_1 < \Delta\lambda_2 < \Delta\lambda_3 < \Delta\lambda_4.$$

Дисперсионная характеристика нестационарного потока $\lambda_{nst}(t_i)$ существенно возрастает при росте количества абонентов. Так как качество обслуживания СРС с МДПН зависит от характеристик входного потока, возникает систематическая ошибка между результатами по качеству обслуживания СРС потока с интенсивностью $\lambda_{nst}(t_i)$, представляемой ПСТФ, и моделью, в которой качество обслуживания рассчитывается как функция от стационарной интенсивности $\lambda_{st}(t_i)$.

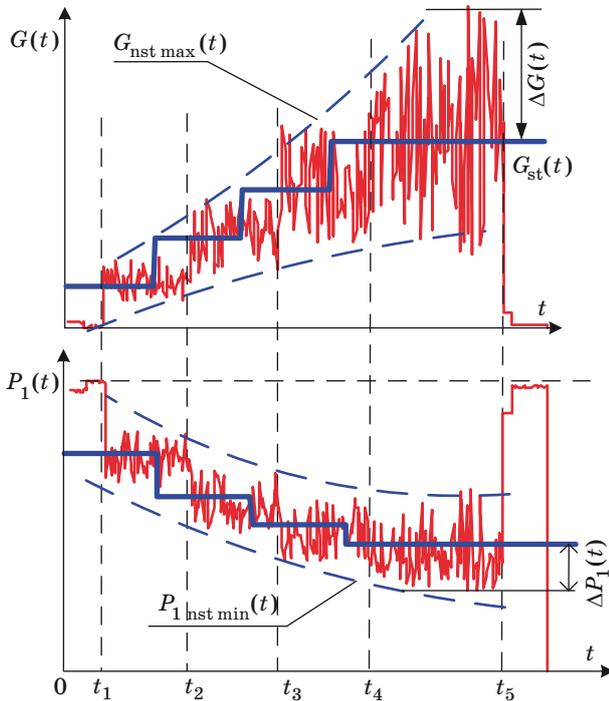
Произведем расчет значений показателей качества обслуживания для модели СРС с МДПН [6] с учетом того, что на вход системы с пропускной способностью C поступает поток с интенсивностью, определяемой выражениями (1) и (5). Рассмотрим число попыток передач пакетов $G(t)$ за длительность такта t_T . В соответствии с [6] данный параметр определяется как

$$\begin{cases} G_j(t_i) = \frac{t_T \lambda_j(t_i)}{D_{mes}} \\ G(t_i) = \sum_j G_j(t_i) = \frac{1}{C} \sum_j \lambda_j(t_i) \end{cases} \quad (8)$$

Результаты аналитического моделирования (рис. 4) показывают, что при использовании потока с интенсивностью, представленной ПСТФ, существенно возрастает максимально необходимое число попыток передач пакета $G_{nst \max}(t)$. При сравнении с результатами $G_{st}(t)$ для модели стационарного пуассоновского потока с ростом количества абонентов, участвующих в информационном обмене, на $\Delta G(t)$ возрастает число попыток передач пакета. Проведенный анализ показывает, что рост $\Delta G(t)$ пропорционален росту дисперсионной характеристики $\lambda_{nst}(t_i)$ и количеству абонентов j . При этом снижается минимальная вероятность передачи пакета с первой попытки $P_{1 \text{ nst max}}(t)$ на $\Delta P_1(t)$ по сравнению со стационарным потоком, что ведет к увеличению пакетов, требующих повторной передачи, и, соответственно, росту загрузки СРС.



■ Рис. 3. Частные и суммарная интенсивности стационарного $\lambda_{st}(t_i)$ и нестационарного $\lambda_{nst}(t_i)$ потоков пакетов в систему



■ **Рис. 4.** Моделирование числа попыток передач пакета $G(t)$ и вероятности передачи пакета $P_1(t)$ при входных стационарном и нестационарном потоках

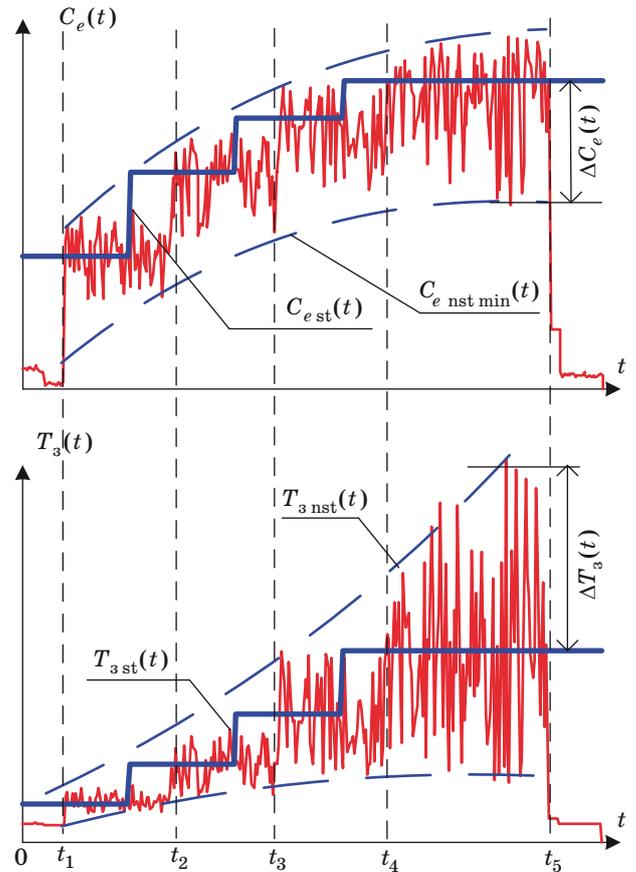
Произведем расчет значений времени задержки при доставке пакетов и относительной пропускной способности СРС с МДПН [6] с учетом входного потока с интенсивностью, определяемой выражениями (1) и (5). Эффективная пропускная способность СРС с МДПН C_e определяется как [6]

$$\begin{cases} C_e(t_i) = CS(t_i) \\ S(t_i) = \frac{\lambda_{nst}(t_i) e^{-\frac{d_{max}\lambda_{nst}(t_i)}{cD_{mes}}}}{\lambda_{nst}(t_i) \left(1 + 2\frac{d_{max}C}{cD_{mes}}\right) + Ce - \frac{d_{max}\lambda_{nst}(t_i)}{cD_{mes}}} \end{cases} \quad (9)$$

Время задержки T_3 при передаче пакета в СРС с МДПН определяется выражением [6]

$$T_3 = \frac{D_{mes}}{C} \times \left[\left(\frac{\lambda_{nst}(t_i)}{SC} - 1 \right) \left(2\frac{d_{max}C}{cD_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \right] \quad (10)$$

Результаты аналитического моделирования по выражениям (9) и (10) с учетом (1) и (4), представленные на рис. 5, показывают, что при ис-



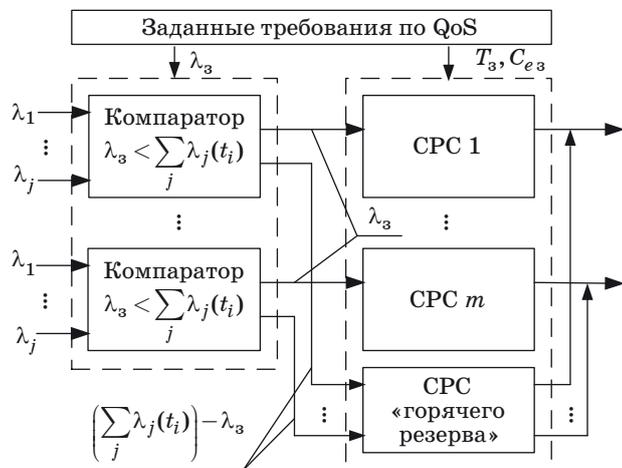
■ **Рис. 5.** Моделирование эффективной пропускной способности СРС $C_e(t)$ и времени задержки передачи пакета $T_3(t)$ при входных стационарном и нестационарном потоках

пользовании потока с нестационарной интенсивностью, представленной ПСТФ, расчетная эффективная пропускная способность $C_{e\ nst}(t)$ существенно снижается с ростом количества участников информационного обмена (на значение $\Delta C_e(t)$) по сравнению со значением пропускной способности, рассчитанным для стационарного пуассоновского потока. Соответственно, со снижением пропускной способности возрастает задержка в доставке пакетов по СРС с $T_{3\ st}(t)$ до $T_{3\ nst}(t)$. Увеличение $\Delta C_e(t)$ и $\Delta T_3(t)$ пропорционально дисперсионной характеристике $\lambda_{nst}(t_i)$ и увеличению количества абонентов j . Проведенный анализ показал, что при моделировании стандартных информационных потоков сетей специального назначения отклонение эффективной пропускной способности $\Delta C_e(t)$ достигает относительных значений порядка 10–30 % от $C_{e\ st}(t)$, а $\Delta T_3(t)$ — до 50–80 % от $T_{3\ st}(t)$. Порядок данных величин позволяет сделать вывод о необходимости учета нестационарности информационных потоков в системах связи специального назначения и систем управления реального времени.

Предложения по обработке нестационарных информационных потоков в системах связи

Таким образом, предложенная модель, представляющая входящий в СРС информационный поток с интенсивностью в виде ПСТФ, является более адекватной и позволяет более точно оценить время обслуживания заданных информационных потоков и пропускную способность СРС с МДПН. Это особенно актуально в случае, когда подобные потоки циркулируют в составе систем управления реальным временем и погрешности в оценке времени обслуживания информационных потоков ведут к существенным ошибкам в определении эффективности функционирования всей системы, как, например, для случая, рассмотренного в работе [9].

Таким образом, снижение QoS в результате обслуживания нестационарного потока требует введения новых способов обработки и передачи пакетов в СРС. В работе [9] автором было предложено динамически перераспределять пропускную способность логических соединений в пользу абонентов с высокими требованиями по QoS. Однако такое перераспределение невозможно в случае, если требования по QoS превышают общие возможности СРС по пропускной способности. Для компенсации данного недостатка предлагается для системы связи, состоящей из нескольких высоконагруженных СРС, ввести дополнительную СРС, функционирующую в режиме «горячего резерва» и параллельно включаемую для тех СРС, в которых обслуживание общей интенсивности нестационарных потоков приведет к снижению QoS ниже заданного (рис. 6).



■ **Рис. 6.** Использование дополнительной СРС для обслуживания нестационарных информационных потоков

Заключение

В данной работе рассмотрено обслуживание нестационарных потоков в СРС с CSMA методом доступа абонентов. Полученные результаты дополняют работы автора [2–5], в частности позволяют методами статистического моделирования оценить качество обслуживания для СМО, аналитическое решение для которых невозможно [5]. Предложенное представление нестационарного информационного потока в виде дискретного пуассоновского потока с интенсивностью, представленной ПСТФ, и выполненный расчет качества обслуживания ИВС отличаются от существующих подходов. В современных работах по расчету ИВС с нестационарными информационными потоками сложной структуры большое распространение получили методы диффузной аппроксимации [10–13]. Так, в работе Н. И. Головки [11] для учета нестационарности предложено использовать аппроксимацию нестационарного потока дважды стохастическим потоком с диффузионной интенсивностью. В работах Н. Ф. Бахарева [12] и К. И. Сычева [13] предложена аппроксимация интервалов времени между пакетами для непуассоновских потоков и оценка предельных границ характеристик качества обслуживания ИВС в условиях предложенной аппроксимации. Вместе с тем, как отмечается в работе Ю. И. Рыжикова [14], при такой аппроксимации ошибки в аналитическом расчете качества обслуживания растут пропорционально усложнению структуры аппроксимируемого потока. Существенные погрешности имеют место при расчете качества обслуживания многоканальных приоритетных [15] систем обслуживания или систем со сложной процедурой обработки информационных потоков (например, при групповом [16] или случайном [17] обслуживании пакетов). Предложенный способ учета нестационарности информационных потоков может быть сравним с аппроксимацией информационных потоков гиперэкспоненциальным [18] или Кокса [19] распределениями, однако в сравнении с указанными распределениями может иметь ПСТФ параметра распределения и невысокую вычислительную сложность расчета качества обслуживания. Методом имитационно-аналитического моделирования в работе получены качественные результаты оценки QoS при обслуживании СРС с МДПН потока предлагаемого вида. Кроме того, предложены рекомендации по обслуживанию нестационарных потоков в интересах повышения надежности (по показателю отказ в обслуживании) и пропускной способности системы связи, отличающиеся от аналога [9] тем, что используется СРС «горячего резерва».

Литература

1. **Макаренко С. И.** Обоснование актуальности исследования вопросов передачи нестационарных информационных потоков по сетям связи, находящихся под воздействием средств радиоэлектронной борьбы // *Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения: сб. докл. Всерос. НТК / ВАИУ. Воронеж, 2009. Т. 10. С. 117–122.*
2. **Макаренко С. И.** Методика вероятностной оценки показателей качества обслуживания сети связи при передаче нестационарных информационных потоков // *Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 11. С. 78–81.*
3. **Макаренко С. И.** Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях неустойчивости входного трафика // *Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 94–96.*
4. **Макаренко С. И., Кихтенко А. В.** Методика оценки времени задержки пакета в спутниковой сети связи в условиях неустойчивости входного трафика // *Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1.3 (27). С. 344–348.*
5. **Макаренко С. И., Сидорчук В. П., Краснокутский А. В.** Методика оценки времени задержки пакета в сети воздушной радиосвязи в условиях неустойчивости входного трафика // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 6. С. 70–74.*
6. **Клейнрок Л.** Вычислительные сети с очередями: пер с англ. — М.: Мир, 1979. — 600 с.
7. **Вентцель Е. С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М.: Наука, 1988. — 208 с.
8. **Баканов М. И., Степанов В. Г.** Информационные технологии контроля качества функционирования систем обслуживания в торговле // *Аудит и финансовый анализ. 2000. № 4. http://www.cfin.ru/press/afa/2000-4/52_bak.shtml. (дата обращения: 19.12.2011).*
9. **Макаренко С. И.** Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // *Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54–58.*
10. **Ададунов С. Е., Мальцев Г. Н., Моторин Н. М., Ададунов А. С.** Диффузионная аппроксимация процессов информационного обмена в низкоорбитальных спутниковых радиосетях // *Информационно-управляющие системы. 2006. № 4. С. 40–44.*
11. **Головко Н. И.** Исследование моделей систем массового обслуживания в информационных сетях: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. — Владивосток: Тихоокеанский ГЭУ, 2007. — 404 с.
12. **Бахарева Н. Ф.** Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания для исследования компьютерных сетей: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.15. — Пенза: Поволжский ГУТИ, 2011. — 360 с.
13. **Назаров А. Н., Сычев К. И.** Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. — Красноярск: Поликом, 2010. — 389 с.
14. **Рыжиков Ю. И., Уланов А. В.** Опыт расчета сложных систем массового обслуживания // *Информационно-управляющие системы. 2009. № 2. С. 56–62.*
15. **Рыжиков Ю. И.** Средние времена ожидания и пребывания в многоканальных приоритетных системах // *Информационно-управляющие системы. 2006. № 6. С. 43–49.*
16. **Рыжиков Ю. И.** Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок // *Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 39–49.*
17. **Рыжиков Ю. И.** Расчет систем со случайным выбором на обслуживание // *Информационно-управляющие системы. 2007. № 3. С. 56–59.*
18. **Алиев Т. И.** Основы моделирования дискретных систем. — СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2009. — 363 с.
19. **Рыжиков Ю. И.** Полный расчет системы обслуживания с распределениями Кокса // *Информационно-управляющие системы. 2006. № 2. С. 38–46.*