

20. Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Связь, 1971. – 204 с.
21. Альшев Ю.В., Маслов О.Н., Раков А.С., Рябушкин А.В. Исследование случайных антенн методом статистического имитационного моделирования // Успехи современной радиоэлектроники. №7, 2008. – С. 3-41.
22. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Моделирование условий возбуждения апертурной случайной антенны // ИКТ. Т.11, №4, 2013. – С. 96-101.
23. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. V.44, 247 (sep. 1949). – P. 335-341.
24. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. – 134 с.
25. Маслов О.Н., Раков А.С. Направленные свойства линейной случайной антенны с учетом корреляционной связи между ошибками // Антенны. №3, 2010. – С. 54-62.
26. Виттих В.А. Организация сложных систем. Самара: Изд. СНЦ РАН, 2010. – 66 с.
27. Маслов О.Н. Безопасность корпорации: моделирование и прогнозирование внутренних угроз методом риска. Самара: Изд-во ПГУТИ-АЭРОПРИНТ, 2013. – 170 с.
28. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска. М.: Физматлит, 2007. – 544 с.

THE RANDOM ANTENNA THEORY: ATTRIBUTES AND DISTINGUISHING FEATURES

Maslov O.N.

The difference of methods and tools of the random antennas theory from the fields of theoretical radiotechnics and computer simulation which are close to her are discussed in the article.

Keywords: *random antenna theory, statistical antenna theory, knowledge uncertainty, computer simulation, Monte Carlo method, scattering theory, statistically uneven surfaces.*

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой экономических и информационных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-902-371-06-24. E-mail: maslov@psati.ru

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 519.872.6

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ $M/M/n/q$ С НЕНАДЕЖНЫМИ КАНАЛАМИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

Макаренко С.И., Синицын И.А.

Предложена сравнительно простая методика расчета и оценки показателей качества обслуживания для системы массового обслуживания $M/M/n/q$ с ненадежными обслуживающими каналами. Показаны варианты приложения данной методики к исследованию процессов функционирования многоканальных систем связи в условиях воздействия помех.

Ключевые слова: многоканальная система связи, система массового обслуживания, радиоэлектронное подавление, помехозащищенность.

Введение

Современные телекоммуникационные системы (ТКС) интегрируют в себя многоканальные системы связи (СС) на основе различных физических сред. При этом именно СС радиосвязи являются наиболее уязвимыми элементами ТКС в плане помехозащищенности. Продолжая и развивая направление работ [1-3], в данной статье авторами предлагается методика расчета систем

массового обслуживания (СМО) с отказами каналов обслуживания (обслуживающих приборов) для оценки помехозащищенности многоканальных СС в условиях помех.

Анализ особенностей воздействия помех на многоканальные системы связи и обоснование первичной модели

В настоящее время в ТКС получили распространение пакетные технологии передачи данных. При этом с точки зрения формализации многоканальной СС при допущениях о пуассоновском характере поступления и обслуживания пакетов, ограничениях на количество доступных каналов связи n и на размер буфера пакетного коммутатора q ее можно интерпретировать как многоканальную систему массового обслуживания (СМО) вида $M/M/n/q$.

Воздействие преднамеренных помех приведет к тому, что часть каналов обслуживания окажется недоступной. Как показано в [1], процесс взаимодействия системы связи и системы радиоэлектронного подавления может быть описан вероятностными показателями протекания радиоэлектронного конфликта (РЭК). Этими показателями будут определяться вероятности отказов конкретных каналов СМО, и в итоге от них будут зависеть и основные показатели качества рассматриваемой СМО.

Для формализации рассматриваемых процессов введем следующие обозначения и сокращения: λ – интенсивность входного потока в СМО; μ – интенсивность потока обслуживания одним каналом в СМО; n – число каналов обслуживания (обслуживающих приборов) в СМО; q – число мест в очереди СМО; ρ – загрузка СМО; $\rho_{ст}$ – загрузка для стандартной модели СМО $M/M/n/q$ без учета отказов отдельных каналов обслуживания; $\rho_{сл}$ – загрузка для модели СМО $M/M/n_{ON-OFF}/q$ при допущении об отказах отдельных каналов обслуживания; $\eta \in [1, n]$ – случайная величина, определяющая число работоспособных каналов обслуживания в СМО вследствие их отказов; $P_{отк}$ – вероятность отказа в обслуживании поступившего в СМО пакета; C – относительная пропускная способность СМО; S_i – состояние СМО, при котором в ней находится i пакетов ($0 \leq i \leq n + q$); P_i – вероятность нахождения СМО в состоянии S_i с i пакетами ($0 \leq i \leq n + q$); $T_{ож}$ – время ожидания пакетом в очереди; $T_{обсл}$ – время обслуживания пакета в СМО; $\lambda_{отк\ КС}$ – интенсивность отказов отдельных каналов связи в многоканальной СС; $\mu_{восст\ КС}$ – интенсивность восстановления отдель-

ных каналов связи в многоканальной СС; $P_{OFF}(\eta)$ – вероятность отказа η каналов обслуживания в СМО; $P_{ON}(\eta) = 1 - P_{OFF}(\eta)$ – вероятность работоспособного состояния η каналов обслуживания в СМО; $t_{РЭК}$ – длительность РЭК.

Модель отказов каналов

Воздействие помех на многоканальную СС будет описываться моделью РЭК [1]. Протекание РЭК можно формализовать известной моделью устройства со стационарными значениями интенсивности отказов отдельных каналов $\lambda_{отк\ КС}$ (вследствие воздействия помех), и интенсивностью восстановления $\mu_{восст\ КС}$ (вследствие функционирования средств адаптации системы связи к условиям помеховой обстановки) [4]. При допущении о простейшем потоке событий отказов и восстановлений и бесконечной длительности РЭК получим [4]:

- вероятности работы и отказа одного канала на длительности РЭК:

$$\lim_{t_{РЭК} \rightarrow \infty} P_{ON} = \frac{\mu_{восст\ КС}}{\lambda_{отк\ КС} + \mu_{восст\ КС}};$$

$$\lim_{t_{РЭК} \rightarrow \infty} P_{OFF} = 1 - \frac{\mu_{восст\ КС}}{\lambda_{отк\ КС} + \mu_{восст\ КС}}.$$

- вероятность отказа η каналов из n на длительности РЭК будет иметь биномиальное распределение

$$P_{OFF}(\eta) = \sum_{i=1}^{\eta} C_n^{\eta} P_{OFF}^{n-i} P_{ON}^i,$$

где $C_n^{\eta} = \frac{n!}{\eta!(n-\eta)!}$.

Модель многоканальной СМО с отказами каналов вида $M/M/n_{ON-OFF}/q$

Рассмотрим модель СМО $M/M/n/q$ [5]. Для данной СМО при допущениях о стационарном режиме функционирования будет иметь место простейший поток поступления и обслуживания пакетов и марковская цепь переходов системы между различными состояниями S , приведенная на рис. 1.

Состояние системы $S = S_i$ соответствует наличию в СМО i -го числа заявок, обусловленного свободными местами в очереди и незанятостью каналов обслуживания.

Для данной системы вероятности нахождения в конкретном состоянии определяются следующим образом [5]:

- вероятность нахождения системы в состоянии без заявок:

$$P_0(n) = \left(1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right) + \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \cdot \frac{\frac{\lambda}{n\mu} - \left(\frac{\lambda}{n\mu} \right)^{q+1}}{n! \left(1 - \frac{\lambda}{n\mu} \right)} \right)^{-1}; \quad (1)$$

- вероятность нахождения системы в состоянии S_i :

$$P_i(n) = \begin{cases} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i P_0(n), & i \leq n; \\ \frac{1}{n! n^{i-q}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i P_0(n), & n < i \leq (n+q). \end{cases} \quad (2)$$

В соответствии с данными вероятностями основные показатели качества обслуживания (QoS – Quality of Service) СМО определяются следующим образом [5]:

- загрузка системы:

$$\rho = \lambda/n\mu; \quad (3)$$

- вероятность отказа в обслуживании:

$$P_{отк} = P_{n+q}; \quad (4)$$

- относительная пропускная способность:

$$C = 1 - P_{n+q}; \quad (5)$$

- время ожидания в очереди:

$$T_{ож} = \sum_{i=1}^q \frac{i P_{n-1+i}}{n\mu}; \quad (6)$$

- время пребывания (обслуживания) в системе:

$$T_{обсл} = T_{ож} + \frac{1 - P_{отк}}{\mu}. \quad (7)$$

Введем следующие допущения:

- в стационарном режиме функционирования СМО имеют место независимые отказы каналов обслуживания с известной вероятностью P_{OFF} ;

- отказ каналов обслуживания происходит мгновенно, переходные режимы в СМО при отказах не учитываются;

- процессы поступления заявок, их обслуживания и наступления отказов каналов обладают свойствами ординарности;

- процессы возвращения заявок в очередь или их потеря вследствие отказа каналов обслуживания не учитываются.

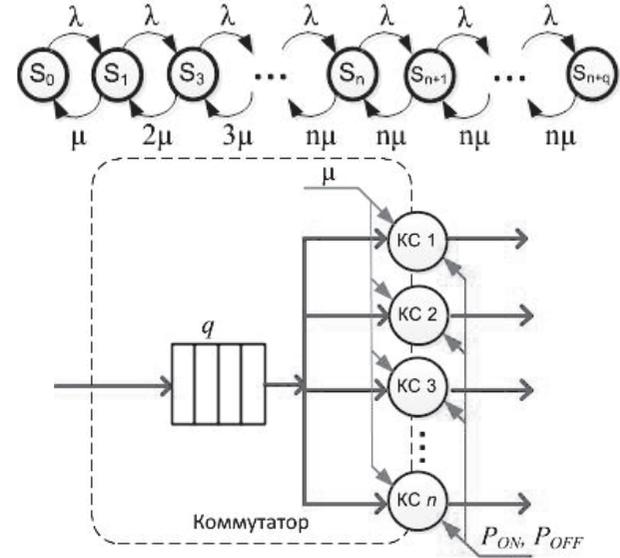


Рис. 1. Модель коммутатора системы многоканальной связи и марковская цепь для описания его функционирования

Указанные допущения задают функционирование СМО при отказах каналов в виде смены отдельных стационарных режимов СМО, без учета переходных процессов. Тогда для СМО с n каналами число работоспособных каналов η будет определяться биномиальным распределением [6]:

- вероятности, соответствующие событиям $P_{OFF}(\eta)$ и $P_{ON}(\eta)$, что работоспособны все η каналов и что η каналов отказали:

$$P_{ON}(\eta) = \sum_{i=\eta}^n C_n^i P_{OFF}^{n-i} P_{ON}^i, \quad (8)$$

$$P_{OFF}(\eta) = \sum_{i=1}^{\eta} C_n^i P_{OFF}^{n-i} P_{ON}^i;$$

- ряд распределения отказавших каналов:

$$f_{OFF}(\eta) = C_n^{\eta} P_{OFF}^{n-\eta} P_{ON}^{\eta}; \quad (9)$$

- математическое ожидание числа работоспособных каналов:

$$m(\eta) = n P_{ON}; \quad (10)$$

- среднее квадратическое отклонение числа работоспособных каналов:

$$\sigma(\eta) = \sqrt{nP_{ON}P_{OFF}} \cdot \quad (11)$$

Так как при большом значении n , в соответствии с центральной предельной теоремой [6], биномиальное распределение может быть аппроксимировано нормальным законом с параметрами $m(\eta) = nP_{ON}$ и $\sigma^2 = nP_{ON}P_{OFF}$, то в силу «закона трех сигма», с учетом выражений (10) и (11), граничными значениями интервала числа отказавших каналов будут [6]:

$$\eta \in \left[nP_{ON} - 3\sqrt{nP_{ON}P_{OFF}}, nP_{ON} + 3\sqrt{nP_{ON}P_{OFF}} \right], \quad (12)$$

и, как будет показано далее, от значений данного интервала существенно зависит поведение системы.

При допущении о вероятностном виде числа работоспособных каналов η вероятности нахождения СМО в отдельных состояниях (1) и (2) будут определяться вероятностным распределением значений η :

$$P_0(\eta) = \left(1 + \sum_{i=1}^{\eta} \left(\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right) + \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{\eta} \cdot \frac{\frac{\lambda}{\eta\mu} - \left(\frac{\lambda}{\eta\mu} \right)^{q+1}}{\eta! \left(1 - \frac{\lambda}{\eta\mu} \right)} \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$P_i(\eta) = \begin{cases} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i P_0(\eta), & i \leq \eta; \\ \frac{1}{\eta! \eta^{i-q}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i P_0(\eta), & \eta < i \leq (\eta + q); \\ 0, & (\eta + q) < i \leq (n + q). \end{cases} \quad (14)$$

Обозначим полученную модель СМО как $M/M/n_{ON-OFF}/q$. Основные QoS для такой СМО (показатели $\rho, P_{отк}, C, T_{ож}, T_{обсл}$) будут определяться аналогично вышеуказанным выражениям (3)-(7), однако в этом случае они будут являться случайными дискретными функциями от η и $P(\eta)$.

Стандартный метод поиска аналитического решения плотности распределения значений показателей QoS как для функций от случайной величины η , представленный в [6], в данном случае неприемлем вследствие невозможности аналитически выразить $\eta(P)$ из (13) и (14).

Предлагается, с учетом известных из выражений (8) и (9) вероятностей событий работоспо-

собности η из n каналов, рассчитать согласно (13) и (14) значения вероятностей нахождения СМО в соответствующих состояниях. В дальнейшем на основе этих вероятностных значений, в соответствии с (3)-(7), получить основные показатели QoS ($\rho_{cl}, P_{отк}, C, T_{ож}, T_{обсл}$) в виде вероятностно-дискретных функций, которые в силу своего физического смысла аппроксимируются непрерывными распределениями.

Исследование поведения СМО вида $M/M/n_{ON-OFF}/q$ в зависимости от нагрузки системы

Введем исходные данные для исследования СМО $M/M/n_{ON-OFF}/q$: число каналов обслуживания $n = 64$; размер очереди СМО $q = 100$; исследуемый диапазон значений для вероятности отказа отдельного канала в СМО $P_{OFF} = 0...0,5$; исследуемый диапазон значений для вероятности работоспособного состояния отдельного канала в СМО $P_{ON} = 1 - P_{OFF} = 0,5...1$; исследуемый диапазон значений для области стандартной загрузки СМО $\rho_{cm} = \lambda/\eta\mu = 1..0,5$. Так же для модели $M/M/n_{ON-OFF}/q$ введены все допущения из стандартной модели $M/M/n/q$ [5], за исключением допущения о постоянном количестве каналов обслуживания n .

Расчеты для СМО вида $M/M/n_{ON-OFF}/q$ в соответствии с выражениями (3-7) показали, что поведение системы существенно зависит от ее загрузки. Для модели СМО $M/M/n/q$ стандартная загрузка определяется как $\rho_{cm} = \lambda/\eta\mu$ [5], и при снижении количества каналов обслуживания СМО n (при прочих равных условиях) значение загрузки ρ_{ct} увеличивается. При целом значении $n = \lambda/\mu$ загрузка достигает значения $\rho_{ct} = 1$. Уменьшение числа каналов $n < \lambda/\mu$ ведет к перегрузке системы, а следовательно, к неограниченному росту времени обслуживания заявок в СМО и снижению относительной пропускной способности до $C = 0$. Таким образом, показатель загрузки ρ_{ct} определяет зависимость между способностью СМО обслуживать входной поток заявок и наличием необходимого количества каналов.

Для СМО вида $M/M/n_{ON-OFF}/q$ физический смысл загрузки будет идентичен предыдущему случаю, однако загрузка будет функцией от случайной величины количества работоспособных каналов η , в связи с чем целесообразным является введение нового показателя загрузки ρ_{cl} :

$$\begin{cases} \rho_{cl}(\eta) = \frac{\lambda}{\eta\mu}; \\ P(\rho_{cl}(\eta)) = P_{ON}(\eta). \end{cases} \quad (15)$$

В этом случае определение условий перегрузки системы имеет более сложный характер. На рис. 2а показано, что за счет отказов отдельных каналов диапазон значений работоспособных каналов η находится в пределах (12), что соответственно определяет значения загрузки СМО и условие ее перегрузки ($\rho > 1$).

Таким образом, закон распределения значений ρ_{cl} полностью определяется распределением работоспособных каналов η (см. рис. 2б). Однако в силу нелинейного вида функциональной зависимости $\rho_{cl}(\eta)$, данное распределение уже не будет биномиальным, хотя зависимости для вероятностей: $P(\rho_{cl}(\eta)) = P(\eta)$, а также для функции вероятности $F(\rho_{cl}(\eta)) = F(\eta)$ сохраняются.

Для рассматриваемого случая вероятность перегрузки системы $\rho_{cl} > 1$ будет определяться как интеграл функции $f(\rho_{cl})$ по области $\rho_{cl} > 1$. С учетом дискретного характера переменной η , ограничения $\rho = 1$ при $n = \lceil \lambda / \mu \rceil$ (где $\lceil \cdot \rceil$ – функция округления до минимального целого значения), а также функциональных зависимостей $F(\rho_{cl}(\eta)) =$

$$F(\eta) = \sum_{i=\eta}^n C_n^i P_{OFF}^{n-i} P_{ON}^i \text{ получим:}$$

$$\int_1^{\infty} f(\rho_{cl}) d\rho = 1 - \sum_{\eta=\lceil \lambda/\mu \rceil}^n f_{OFF}(\eta) =$$

$$= 1 - \sum_{i=\lceil \lambda/\mu \rceil}^n C_n^i P_{OFF}^{n-i} P_{ON}^i. \tag{16}$$

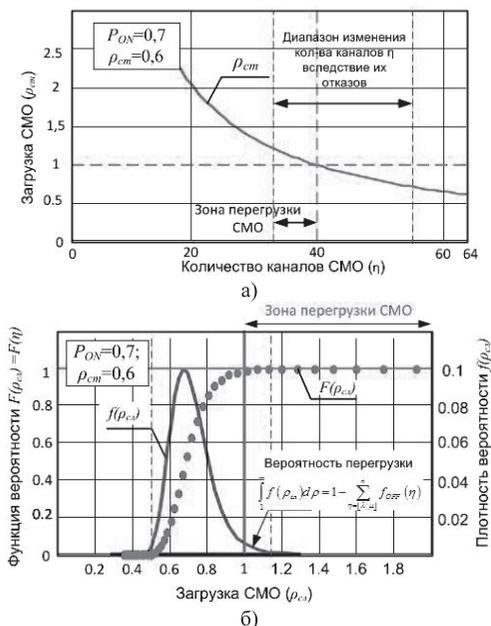


Рис. 2. Зависимости загрузки СМО и вероятности перегрузки системы от числа работоспособных каналов при их вероятностном распределении

Выражение (16) позволяет сформулировать критерий функционирования СМО без перегрузки:

$$\sum_{\eta=1}^{\lfloor \lambda/\mu \rfloor} C_n^\eta P_{OFF}^{n-\eta} P_{ON}^\eta = 0, \tag{17}$$

смысл которого состоит в том, что если вся область вероятностных значений загрузки системы ρ_{cl} меньше единицы, то любые отказы каналов с вероятностью $P_{OFF} = 1 - P_{ON}$ не приводят к перегрузке СМО, и соответственно значение вероятности события, что произошла перегрузка системы $\rho_{cl} > 1$, определяемая выражением (16), равна нулю. В соответствии с этим критерий функционирования СМО с перегрузкой: будет определяться как

$$\sum_{\eta=1}^{\lfloor \lambda/\mu \rfloor} C_n^\eta P_{OFF}^{n-\eta} P_{ON}^\eta > 0. \tag{18}$$

Следствием сформулированной зависимости является положение о том, что загрузка СМО является функцией не только параметров λ, μ, n , но и зависит от вероятности работоспособности отдельного канала P_{ON} . Анализ значений стандартной загрузки СМО $\rho_{cm} = \lambda/n\mu$ и значения P_{ON} , полученные в соответствии с критерием (17), позволяют сделать вывод о том, что для компенсации снижения надежности каналов в СМО необходимо снижать поступающий в систему поток заявок. При этом при вероятности отказа $P_{OFF} = P_{ON} = 0,5$ для достижения $\rho_{cl} \approx 1$ стандартная загрузка не должна превышать значение $\rho_{cm} \approx 0,35$.

На рис. 3 приведены результаты моделирования в среде MathCAD зависимости плотности вероятности $f(\rho_{cl})$ от вероятности отказа P_{OFF} и стандартной загрузки системы ρ_{cm} , учитывающей (8), (13) и (14) в выражении (15).

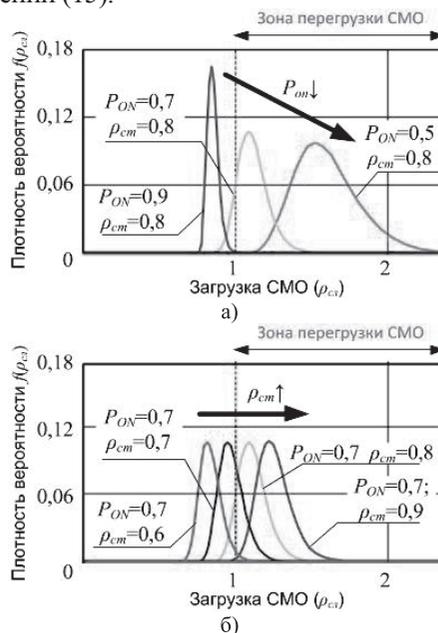


Рис. 3. Результаты исследования зависимости функции плотности вероятности $f(\rho_{cl})$ от вероятности отказа канала P_{OFF} и загрузки ρ_{cm}

Анализ приведенных на рис. 3 зависимостей позволяет сделать вывод о том, что рост стандартной загрузки системы ρ_{cm} при заданном значении вероятности отказа канала P_{OFF} не влияет на вид функции плотности вероятности $f(\rho_{cl})$, а определяет смещение ее математического ожидания (МОЖ) в область перегрузки СМО. Рост вероятности отказа канала P_{OFF} при фиксированном значении стандартной загрузки системы ρ_{cm} увеличивает дисперсионную характеристику функции плотности вероятности $f(\rho_{cl})$, а также определяет смещение ее МОЖ в область перегрузки СМО, тем самым быстро увеличивая значение вероятности перегрузки СМО, определяемое выражением (16). Таким образом, основным фактором, определяющим переход СМО в перегруженный режим, является увеличение показателя P_{OFF} (соответственно, снижение показателя P_{ON}).

Исследование поведения СМО вида $M/M/n_{ON-OFF}/q$ в зависимости от вероятности отказа канала

Результаты исследования основных показателей QoS (ρ_{cl} , $P_{отк}$, C , $T_{ож}$, $T_{обсл}$) для СМО $M/M/n_{ON-OFF}/q$ в зависимости от различных значений PON приведены на рис. 4. Данные зависимости получены с учетом того, что выражения (3)-(7) являются функциями случайной величины P_{ON} :

- вероятность отказа в обслуживании $P_{отк}(\eta)$ определяется выражениями (4), (8), (13) и (14):

$$\left\{ \begin{aligned} P_{отк}(\eta) &= \frac{1}{\eta! \eta^\eta} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{\eta+q} \times \\ &\times \left(1 + \sum_{i=1}^{\eta} \left(\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right) + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^\eta \times \right. \\ &\left. \times \frac{\frac{\lambda}{\eta\mu} - \left(\frac{\lambda}{\eta\mu}\right)^{q+1}}{\eta! \left(1 - \frac{\lambda}{\eta\mu}\right)} \right)^{-1}; \\ P(P_{отк}(\eta)) &= P_{ON}(\eta), \end{aligned} \right. \quad (19)$$

- относительная пропускная способность $C(\eta)$ определяется выражениями (5), (8), (13) и (14):

$$\left\{ \begin{aligned} C(\eta) &= 1 - P_{отк}(\eta); \\ P(C(\eta)) &= P_{ON}(\eta), \end{aligned} \right. \quad (20)$$

- время ожидания в очереди $T_{ож}(\eta)$ определяется выражениями (6), (8), (13) и (14):

$$\left\{ \begin{aligned} T_{ож}(\eta) &= \sum_{i=1}^q \frac{i P_{\eta-1+i}}{\eta \mu}; \\ P(T_{ож}(\eta)) &= P_{ON}(\eta), \end{aligned} \right. \quad (21)$$

- время пребывания (обслуживания) $T_{обсл}(\eta)$ в системе определяется выражениями (7), (8), (13) и (14):

$$\left\{ \begin{aligned} T_{обсл}(\eta) &= T_{ож}(\eta) + \frac{1 - P_{отк}(\eta)}{\mu}; \\ P(T_{обсл}(\eta)) &= P_{ON}(\eta). \end{aligned} \right. \quad (22)$$

Анализ основных показателей QoS, согласно выражениям (19)-(22), позволил сделать следующей обобщающий вывод.

В условиях нормальной загрузки СМО $\rho_{cl} \leq 1$ показатели QoS системы $M/M/n_{ON-OFF}/q$ имеют детерминированный характер и равны показателям QoS системы $M/M/n/q$. То есть особенности функционирования системы $M/M/n_{ON-OFF}/q$ проявляются только при ее перегрузке $\rho_{cl} > 1$ вследствие увеличения P_{OFF} , что соответствует выполнению критерия:

$$\sum_{\eta=1}^{\lfloor \lambda/\mu \rfloor} C_n^\eta P_{OFF}^{n-\eta} P_{ON}^\eta > 0.$$

Условие проявления особенностей СМО $M/M/n_{ON-OFF}/q$ относительно СМО $M/M/n/q$ также определяет границы целесообразности применения предлагаемой методики.

Вышеприведенный обобщающий вывод следует из анализа значений показателей QoS для их области определения η (рис. 4). Если область значений числа работоспособных каналов, определяемых выражением (12), попадает на стационарный участок функции показателя QoS, то для всего диапазона значений η показатель QoS принимает одинаковое детерминированное значение. Специфика же поведения СМО $M/M/n_{ON-OFF}/q$ проявляется в условиях, когда вероятность перегрузки системы, определяемая выражением (16), отлична от нуля (то есть выполняется критерий (18)). При этом основным фактором, влияющим на загрузку и на значение показателей QoS, является вероятность P_{ON} .

При уменьшении P_{ON} диапазон работоспособных, а значит и доступных для СМО каналов, уменьшается, смещаясь влево по оси η . В результате рабочий диапазон η попадет в зону зависимости параметров QoS от доступного количества каналов СМО. Причем линейная зависимость па-

параметра QoS от числа каналов η приводит к итоговой биномиальной плотности распределения параметра QoS (графики функции и плотности вероятности для вероятности отказа в обслуживании $P_{отк}(\eta)$ и относительной пропускной способности $C(\eta)$). Нелинейная зависимость параметра QoS от числа каналов η (характерно для параметров $T_{ож}(\eta)$ и $T_{обсл}(\eta)$) приводит к сложной плотности распределения параметра QoS (графики функции и плотности вероятности для $T_{ож}(\eta)$ и $T_{обсл}(\eta)$), вид которой зависит от значений $P_{ОН}$. При этом для значений $P_{ОН} = 0,8...1$ плотности вероятности $f(T_{ож})$ и $f(T_{обсл})$ могут быть аппроксимированы гамма-распределением, однако при значениях $P_{ОН} < 0,8$ аппроксимация данных функций каким-то конкретным законом затруднена, и для аппроксимации данных распределений предлагается использовать семейство кривых Пирсона [16].

Также к общим выводам по анализу зависимостей на рис. 4 стоит отнести вывод об увеличении общего отличия поведения СМО $M/M/n_{ОН OFF}/q$ и значений ее показателей QoS от СМО $M/M/n/q$ при $\rho_{ст} \rightarrow 1$ и $P_{ОН} \rightarrow 0,5$.

Выводы и сравнение предложенной методики с другими работами в области СМО с ненадежными каналами обслуживания

Для оценки пропускной способности многоканальной СС в условиях помех при ее моделировании востребованы оценки показателей QoS СМО с переменным и изменяемым числом каналов. Однако получение аналитических решений для таких оценок QoS, как правило, затруднено, в связи с чем прибегают к имитационному моделированию [7].

Проведенный анализ имеющихся публикаций показал, что аналогами представленной методики в плане постановки задачи исследования СМО с ненадежными приборами (каналами обслуживания) являются: работы Иванешкина А.И. по исследованию QoS СМО с переменным числом приборов обслуживания [9]; Бабицкого А.В., Дудина А.Н., Клименова В.И. по исследованию качества функционирования ненадежных СМО [10]; Статкевич С.Э., Матальцкого М.А. по исследованию СМО с ненадежными элементами в стационарном и переходном режимах [11-12]; работы Микадзе И.С., Хочолава В.В., Хуродзе Р.А. по моделированию канала связи с помощью СМО с ненадежным прибором [13]; Печинкина А.В., Соколова И.А., Чаплыгина В.В. по исследованию многолинейных СМО со сложными потоками

заявок и при различных вариантах процесса отказов-восстановлений приборов обслуживания [14]; а также частично работа Назарова А.Н., Сычева К.И. [15] по исследованию многоканальных СМО с относительными приоритетами входных потоков заявок при учете надежностных характеристик приборов обслуживания.

Однако в данных работах расчет показателей СМО ведется стандартным образом: рассматривается марковский процесс перехода состояний СМО, осуществляется переход к дифференциальной системе уравнений, вычисляются конечные вероятности состояний, а из них рассчитываются показатели качества системы. Методика, предложенная авторами настоящей работы, является менее трудоемкой и основана на рассмотрении модели СМО в виде «черного ящика» со встроенным оператором преобразования входных воздействий (λ, μ, n, q) в выходные показатели QoS $(\rho, P_{отк}, C, T_{ож}, T_{обсл})$ при вероятностном входном параметре n .

Литература

1. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
2. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. № 9, 2011. / <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf>
3. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. № 6, 2012. / <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf>
4. Кучер В.Я. Основы технической диагностики и теории надежности: письменные лекции. СПб.: Изд. СЗТУ, 2004. – 48 с.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
7. Патент RU №1674148. Устройство для моделирования системы массового обслуживания с переменным числом каналов / Адерихин И.В., Калинин М.А., Пархоменко Н.Г., Козелков С.В., Еременко С.П. По заявке №4664991 от 22.03.1989.
9. Иванешкин А.И. Многоканальная система массового обслуживания с переменным чи-

слом устройств и пороговыми значениями их подключения и отключения // Зв'язок. 2009 № 3, 2009. – С. 40-47.

10.Бабицкий А.В., Дудин А.Н., Клименок В.И. К расчету характеристик ненадежной системы массового обслуживания с конечным источни-

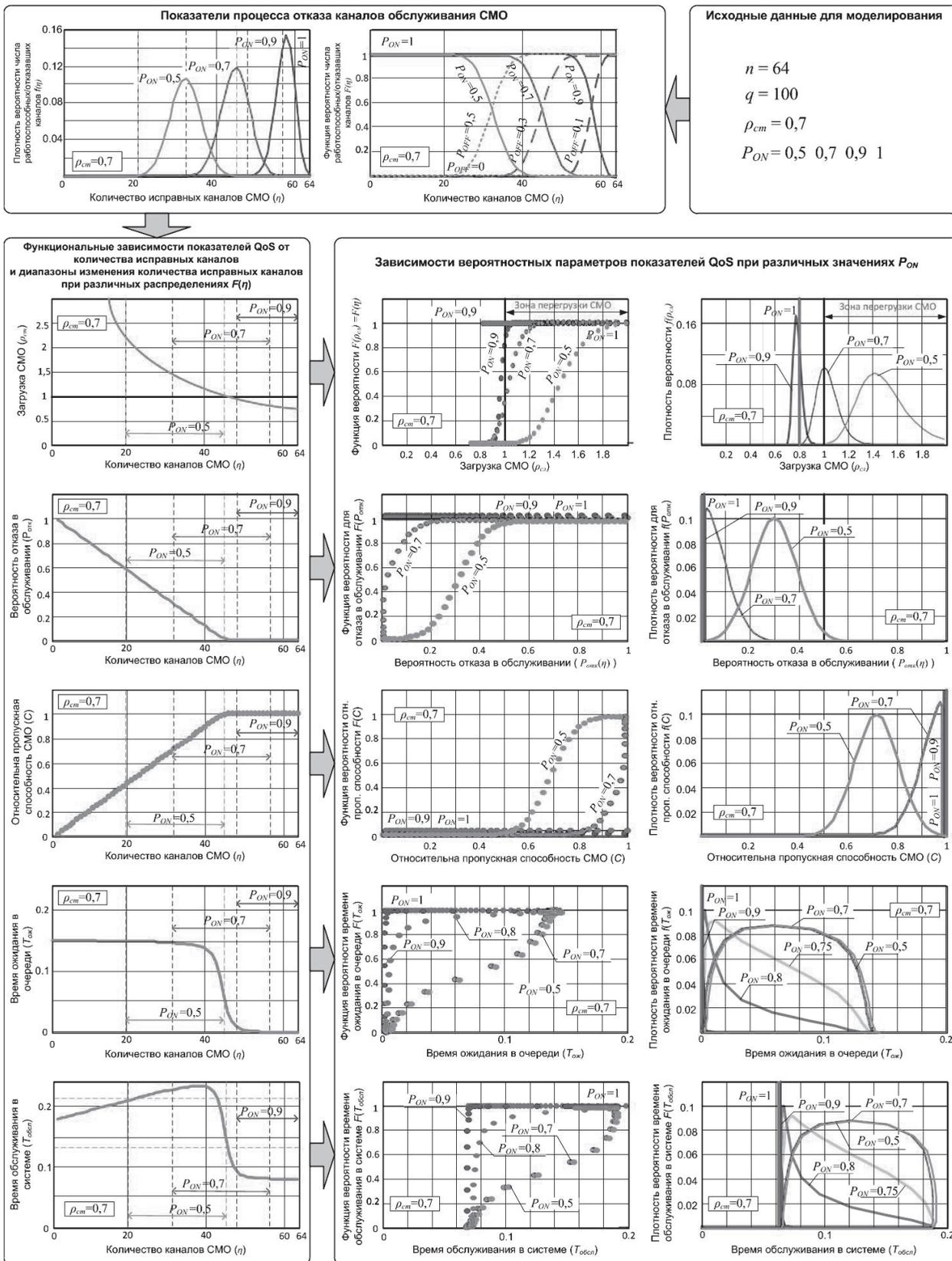


Рис. 4. Исследование основных показателей качества СМО с отказами каналов в зависимости от вероятности работоспособного состояния канала P_{ON}

- ком // Автоматика и телемеханика. №1, 1996. – С. 92-103.
11. Статкевич С.Э., Матальцкий М.А. Исследование сети массового обслуживания с ненадежными системами в переходном режиме // Вестник Томского ГУ. № 1(18), 2012. – С. 112-125.
 12. Матальцкий М.А. Сети массового обслуживания в стационарном и переходном режимах. Гродно: Изд-во ГрГУ, 2001. – 211 с.
 13. Микадзе И.С., Хочолава В.В., Хуродзе Р.А. Виртуальное время ожидания в однолинейной СМО с ненадежным прибором // Автоматика и телемеханика, №12, 2004. – С. 119-128.
 14. Печинкин А.В., Соколов И.А., Чаплыгин В.В. Многолинейная система массового обслуживания с конечным накопителем и ненадежными приборами // Информатика и ее применения. Т. 1, вып. 1, 2007. – С. 27-39.
 15. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.
 16. Рыжиков Ю.И. Управление запасами. М.: Наука, 1969. – 344 с.

THE EVALUATION PROCEDURE OF THE QUALITY OF SERVICE OF M/M/N/Q QUEUING SYSTEM WITH UNSAFE CHANNELS AND ITS ANNEX FOR THE ANALYSIS OF MULTI-CHANNEL RADIO COMMUNICATION SYSTEMS IN NOISE EFFECT ENVIRONMENT IS PRESENTED

Makarenko S.I., Sinitsyn I.A.

The rather simple calculation and evolution procedure of the quality of service of $M/M/n/q$ queuing system with unsafe channels is offered. The variants of annex of this procedure for the researching of the functioning of multi-channel communication systems functioning under noises effect are shown.

***Keywords:** multi-channel communication system, multi-channel queuing system, electronic countermeasure, noise immunity.*

Макаренко Сергей Иванович, к.т.н., доцент Кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А.Ф.Можайского (г. Санкт-Петербург). Тел. 8-981-820-49-90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Синицын Игорь Аркадьевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник «ОКБ Траверз» (г. Москва). Тел. 8-916-496-26-98. E-mail: isinitsyn@yandex.ru

УДК 621.397

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Аббасова Т.С., Артюшенко В.М.

Рассмотрены вопросы, связанные с анализом изменений характеристик высокочастотных кабелей под действием окружающей среды на параметры мультимедийных кабельных сетей. Получены характерные зависимости изменения погонных потерь кабелей в диапазоне рабочих частот от температуры окружающей среды.

Ключевые слова: мультимедийные кабельные сети, высокочастотные кабели, затухание, температура окружающей среды.

Введение

Высокочастотные кабели являются важнейшим пассивным элементом в мультимедийных кабельных сетях (МКС), качество и надежность которых существенно влияют на их основные эксплуатационные показатели [1-3]. Учитывая, что кабель, применяемый в МКС, играет важную роль в ее работе, представляет значительный интерес проанализировать, как повлияет изменение