

RESTORING MOMENT DISTRIBUTION CHARACTERISTICS INTERVAL BETWEEN PACKETS OF INCOMING TRAFFIC

Gorelov G.A., Tarasov V.N., Ushakov Y.A.

The paper describes an approach to restore torque characteristics of the distribution of intervals between bursts of incoming traffic. These characteristics allow the methods to analyze the traffic queuing theory.

Keywords: torque characteristics, traffic, traffic analyzer, the program Wireshar.

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах (ПОУТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-13; 8-960-827-22-33. E-mail: vt@ist.psati.ru.

Ушаков Юрий Александрович, к.т.н., доцент Кафедры системного анализа и управления Оренбургского государственного университета. Тел. 8-922-536-40-81. E-mail: unpk@mail.ru.

Горелов Глеб Александрович, ассистент Кафедры ПОУТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13, 8-927-721-89-79. E-mail: gleb_fox@bk.ru.

УДК 004.728.3

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАРШРУТИЗАТОРА В СЕТИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Макаренко С.И., Михайлов Р.Л.

В статье представлена модель процесса функционирования маршрутизатора, произведена оценка влияния отказов каналов связи на его надежность по показателю вероятности нахождения в работоспособном состоянии. Исследованы показатели надежности сети с различными протоколами маршрутизации в зависимости от количества каналов связи с ограниченной надежностью и интенсивности их отказов.

Ключевые слова: модель маршрутизатора, устойчивость сети, надежность сети, протоколы маршрутизации.

Введение

С развитием телекоммуникационных технологий и увеличением структурной сложности сетей связи актуализируются вопросы обеспечения устойчивости связи к отказам оборудования, а также к различного рода деструктивным воздействиям (ДВ), что подтверждается исследованиями [1-2]. На сетевом уровне модели взаимодействия открытых систем данную задачу решают маршрутизаторы – устройства, организующие передачу информационных пакетов по сети связи в соответствии с протоколами маршрутизации.

Анализ публикаций, находящихся в открытом доступе, показал, что вопросы разработки моделей функционирования маршрутизаторов решались в [3-19]. В [3-8] разработаны модели маршрутиза-

тора, позволяющие оценить влияние структуры трафика на процесс его функционирования. Исследованию модели маршрутизатора как системы массового обслуживания (СМО) и оценке влияния параметров его буфера на процесс функционирования посвящены работы [9-13]. Вопросы влияния алгоритмов распределения информационных потоков рассмотрены в работах [14-17].

Схожая модель маршрутизатора рассмотрена в [18-19], однако авторами этих работ исследовались вопросы разработки метода повышения непрерывности функционирования сети связи за счет рациональной маршрутизации служебной информации, без учета временных параметров работы протоколов маршрутизации. При моделировании рассматривались условия скачкообразного изменения интенсивности потоков информации, но не учитывалась возможность отказов каналов связи (КС).

Таким образом, оригинальность предлагаемой модели функционирования маршрутизатора в сети определяется новыми рамками исследования – условием ограниченной надежности каналов связи.

Модель процесса функционирования маршрутизатора

Модель процесса функционирования маршрутизатора можно представить в виде процесса перехода между различными состояниями, параметры которого определяются вероятностью отказа $P_{\text{отк}}(t)$ и веро-

ятностью восстановления $P_{\text{восст}}(t)$ каналов за время t . Если КС в составе сети отказал с вероятностью $P_{\text{отк}}(t)$, то маршрутизатор переходит из работоспособного состояния S_0 в состояние S_1 . Состояние S_1 характеризуется принятием решения о реконфигурации, когда недоставка пакета проверки связи со смежным маршрутизатором в течение промежутка времени $T_{\text{диагн}}$ считается случайным сбоем и информация продолжает направляться в соответствии со старой таблицей маршрутизации. В случае если сбой является не случайным, а следствием целенаправленного ДВ на маршрутизатор, то это приводит к потере информации. Таким образом, состояние S_1 является худшим вариантом состояния системы. В случае, когда КС восстановил свою работоспособность (произошло событие восстановления) за время $T_{\text{ож}}$, система возвращается в работоспособное состояние $S_1 \rightarrow S_0$ или, если за время $T_{\text{ож}}$ восстановление КС не произошло, система производит обновлений таблиц маршрутизации $S_1 \rightarrow S_2$ за время $T_{\text{рек}}$ и переходит в работоспособное состояние $S_2 \rightarrow S_0$. Таким образом, состояния системы соответствуют следующим процессам, представленным на рис. 1:

S_0 – состояние «сеть работоспособна», маршрутизаторы и КС между ними работоспособны;
 S_1 – состояние «отказ», произошел отказ любого из КС, подключенного к маршрутизатору, но маршрутизатор продолжает отправку пакетов в этот КС;
 S_2 – состояние «восстановление», принятие решения об изменении топологии сети и соответствующее обновление таблицы маршрутизации.

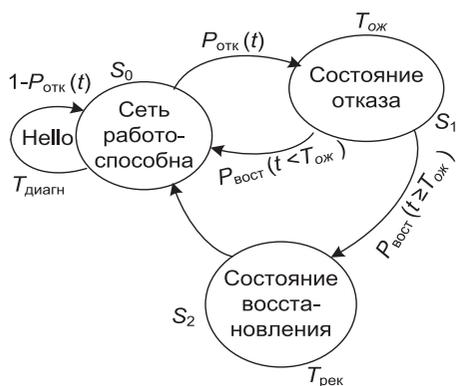


Рис. 1. Модель процесса функционирования маршрутизатора

Приведенную схему переходов состояния, введя допущения о пуассоновском процессе отказов КС и процессе их восстановления (в результате функционирования адаптивной системы связи), возможно преобразовать к вложенному марковскому процессу (см. рис. 2), который описывается известным из теории надежности процессом отказа-восстановления.

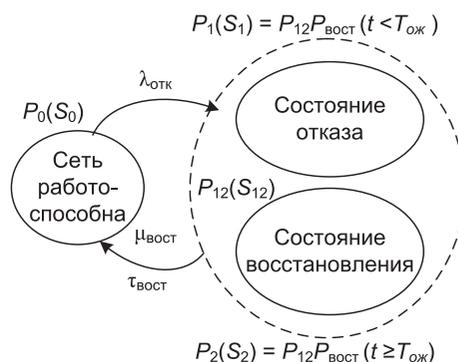


Рис. 2. Модель процесса функционирования маршрутизатора с использованием вложенных марковских цепей

Конечным вероятностям состояний этого процесса соответствуют следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_{\text{восст}} P_{12}(t) - \lambda_{\text{отк}} P_0(t); \\ \frac{dP_{12}(t)}{dt} = \lambda_{\text{отк}} P_0(t) - \mu_{\text{восст}} P_{12}(t), \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} P_1(t) = P_{12}(t) P_{\text{восст}}(t < T_{\text{ож}}); \\ P_2(t) = P_{12}(t) - P_1(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1. \end{cases}$$

При этом дополнительные вложенные вероятности нахождения системы в состояниях S_1 и S_2 будут определяться вероятностью события восстановления канала связи за время $T_{\text{ож}}$:

$$\begin{cases} P_1(t) = P_{12} P_{\text{восст}}(t < T_{\text{ож}}) = P_{12} (1 - e^{-\mu_{\text{восст}} T_{\text{ож}}}); \\ P_2(t) = P_{12} P_{\text{восст}}(t \geq T_{\text{ож}}) = P_{12} e^{-\mu_{\text{восст}} T_{\text{ож}}}. \end{cases}$$

При допущении о стационарном процессе получим следующую систему:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{\text{отк}} P_0 + \mu_{\text{восст}} P_{12}; \\ 0 = \lambda_{\text{отк}} P_0 - \mu_{\text{восст}} P_{12}; \\ P_1(t) = P_{12} P_{\text{восст}}(t < T_{\text{ож}}); \\ P_2(t) = P_{12} - P_1(t), \end{cases}$$

решая которую, получим

$$\begin{cases} P_{12} = \lambda_{\text{отк}} / (\lambda_{\text{отк}} + \mu_{\text{восст}}); \\ P_0 = 1 - P_{12}; \\ P_1(t) = P_{12} P_{\text{восст}}(t < T_{\text{ож}}); \\ P_2(t) = P_{12} - P_1(t). \end{cases}$$

То есть

$$\begin{cases} P_0 = 1 - \frac{\lambda_{отк}}{\lambda_{отк} + \mu_{восст}}; \\ P_1 = \frac{\lambda_{отк}}{\lambda_{отк} + \mu_{восст}} (1 - e^{-\mu_{восст} T_{ож}}); \\ P_2 = \frac{\lambda_{отк}}{\lambda_{отк} + \mu_{восст}} e^{-\mu_{восст} T_{ож}}. \end{cases} \quad (1)$$

Проведем моделирование исследования работы маршрутизатора в зависимости от его параметров функционирования. Практический интерес при моделировании представляет вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии $P_0(S_0)$ на общем времени функционирования, а также изменение значения вероятности необнаруженного отказа $P_1(S_1)$.

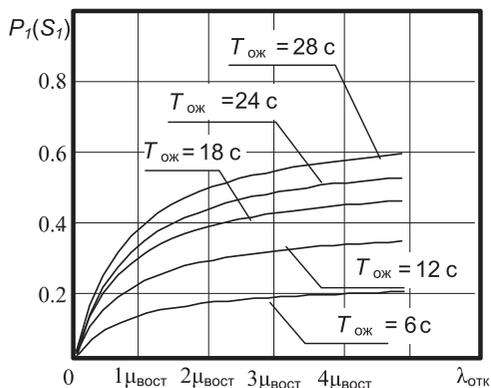


Рис. 3. Вероятность нахождения маршрутизатора в состоянии «отказ» $P_1(S_1)$ в зависимости от интенсивности отказов $\lambda_{отк}$

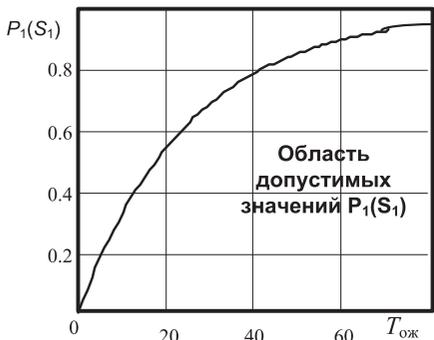


Рис. 4. Предельные значения вероятности нахождения маршрутизатора в состоянии «отказ» $P_1(S_1)$ в зависимости от значений таймера $T_{ож}$

Как показывает анализ графических зависимостей на рис. 3 и рис. 4, максимальное влияние на поведение системы оказывают параметры интенсивности отказов $\lambda_{отк}$ и таймера сохранения текущей конфигурации $T_{ож}$.

Уже при $\lambda_{отк} = 0,3\mu_{восст}$ система находится в работоспособном состоянии с вероятностью

$P_0(S_0) \approx 0,8$, а дальнейшее увеличение интенсивности отказов $\lambda_{отк}$ свыше данного значения ведет к фактическому неработоспособному состоянию системы (так, при $\lambda_{отк} = \mu_{восст}$ вероятность работоспособного состояния составляет $P_0(S_0) \approx 0,5$). Кроме того, состояния системы при увеличении $\lambda_{отк}$ показывают сходимость к предельному значению.

Необходимо отметить, что самым неблагоприятным состоянием системы является состояние S_1 , когда фактический отказ КС уже произошел, но маршрутизатор еще не принял решение об изменении топологии сети и продолжает использовать отказавший КС. Значение таймера сохранения текущей конфигурации $T_{ож}$ напрямую влияет на предельное значение вероятности состояния S_1 и скорость его достижения (см. рис. 3 и рис. 4):

$$\begin{aligned} P_1(S_1) &= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left(\frac{\lambda_{отк}}{\lambda_{отк} + \mu_{восст}} (1 - e^{-\mu_{восст} T_{ож}}) \right) = \\ &= 1 - e^{-\mu_{восст} T_{ож}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что предельные максимальные значения $P_1(S_1)$ зависят только от значений таймера $T_{ож}$ (см. рис. 4). При этом даже в случае гипотетической ситуации мгновенного обнаружения отказа канала связи маршрутизатором ($T_{ож} = 0$) в сети связи не произойдет потери пакетов, но процесс передачи данных в сети будет остановлен на время реконфигурации $T_{рек}$.

Проведенный анализ рекомендуемых временных параметров значений (см. таблицу 1) наиболее распространенных протоколов маршрутизации RIP (Routing Information Protocol), OSPF (Open Shortest Path First) и EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) [20] показал, что используемые ими значения не позволяют им эффективно реагировать на случаи многократного изменения топологии сети.

Таблица 1. Временные параметры протоколов маршрутизации

Протокол маршрутизации	Временной интервал проверки связей с соседними маршрутизаторами $T_{диагн}$	Временной интервал принятия решения об отказе в сети $T_{ож}$
RIP	30 с	180 с
OSPF	30 с	120 с
EIGRP	60 с	180 с

Модель процесса функционирования сети

Обобщим модель для случая, когда возможен отказ КС у нескольких маршрутизаторов в сети. С учетом того, что процесс, представленный на рис. 2, является стандартным процессом теории надежности, для анализа процесса появления нескольких отказов КС можно использовать модель надежности системы с задержанным восстановлением и выключением системы [21].

В этом случае, при исходных ограничениях: n – число маршрутизаторов в системе; λ_i – интенсивность отказов КС инцидентных i -му маршрутизатору; получим систему, переходящую в состояния:

S_0 – «сеть работоспособна», маршрутизаторы работоспособны;

S_1 – «отказ», произошел отказ любого из $\lambda_i, i = 1..n$ КС в сети, все n маршрутизаторов сохраняют свою конфигурацию;

S_2 – «восстановление», прекращение работы сети, обновление таблиц маршрутизации в соответствии с новой топологией сети.

При этом принимается допущение о мгновенном распространении информации об отказе КС ко всем маршрутизаторам области маршрутизации.

Решая ее аналогично вышеприведенной, с учетом модели надежности системы с задержанным восстановлением и выключением системы [21]:

$$P_{12} = \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i} / \left(\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i} \right),$$

получим:

$$\left\{ \begin{aligned} P_0 &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}; \\ P_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}} (1 - e^{-\mu_{восст} T_{отк}}); \\ P_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}} e^{-\mu_{восст} T_{отк}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Последнее уравнение системы определяет переходы состояний в сети, в которой отказывают

КС у n -го числа маршрутизаторов, с учетом допущения об экспоненциальном виде интенсивности отказов и восстановления.

Возможно доказать, что для области маршрутизации из m маршрутизаторов вероятности нахождения сети в том или ином состоянии не зависят от размера этой области, а определяются числом маршрутизаторов n , у которых отказывают соединенные с ними КС:

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^m \lambda_{отк\ i}} \left| \begin{array}{l} \lambda_{отк\ i} \neq 0, i \in [1, n] \\ \lambda_{отк\ j} = 0, j \in [n+1, m] \end{array} \right. = \\ &= \lim_{\substack{\lambda_{отк\ j} \rightarrow 0, \\ i \in [n+1, m]}} \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i} + \sum_{j=n+1}^m \lambda_{отк\ j}}{\mu_{восст} + \left(\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i} + \sum_{j=n+1}^m \lambda_{отк\ j} \right)} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}. \end{aligned}$$

Рассмотрим случай, когда отказы КС обусловлены преднамеренными ДВ. В этом случае система воздействий является управляемой системой типа «агент мониторинга – система воздействий». При этом ключевым элементом ее функционирования будет принятие решения о воздействии на доступные КС после оценки состояния сети связи. Как правило, в этом случае интенсивность воздействий сопоставима с интенсивностью восстановлений: $\lambda_{отк} \leq \mu_{восст}$. В этом случае интерес представляет определение области, в которой отказывают КС у n -го числа маршрутизаторов при низкой интенсивности отказов каждого КС $\lambda_{отк\ i}$. Для такого случая имеет место уравнение для условия функционирования сети связи в зависимости от параметров $\{\lambda_{отк\ i}\}$ и $\mu_{восст}$ с вероятностью не ниже заданного $P_0^{зад}$, получаемого из выражения (3):

$$\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}} \right) \geq P_0^{зад}. \quad (4)$$

Исследование неравенства (4) в зависимости от параметров $\lambda_{отк\ i}$ и $\mu_{восст}$, результаты которого представлены на рис. 6, показывает, что существует возможность перевода сети, соответствующей области маршрутизации, в неработоспо-

собное состояние уже при воздействии на КС единственного маршрутизатора ($n = 1$), но с высокой $\lambda_{отк\ 1}$.

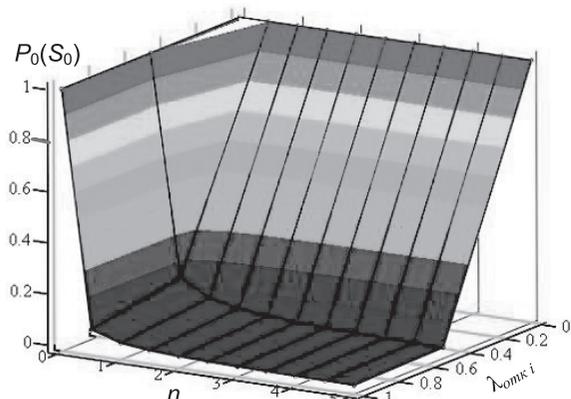


Рис. 5. Вероятность работоспособного состояния сети при отказе КС с интенсивностью $\lambda_{отк\ i}$ у n маршрутизаторов

Из выражения (4) возможно получить условие для значений n , $\lambda_{отк\ i}$, $P_0^{зад}$ и $\mu_{восст}$, при котором область маршрутизации переходит в неработоспособное состояние:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}}{\mu_{восст} + \sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i}} \geq 1 - P_0^{зад},$$

откуда

$$\left(\sum_{i=1}^n \lambda_{отк\ i} \right) > \frac{\mu_{восст} (1 - P_0^{зад})}{P_0^{зад}}. \quad (5)$$

Таким образом, параметры n и $\lambda_{отк\ i}$ определяют возможности ДВ по выведению области маршрутизации из работоспособного состояния.

Выводы

Процесс функционирования маршрутизатора может быть формализован на основе модели вложенных марковских цепей, описываемых выражением (1). Поведение сети определяется интенсивностью отказов отдельных КС $\lambda_{отк}$ и значением таймера сохранения текущей конфигурации сети $T_{ож}$. При $\lambda_{отк} = 0,3\mu_{восст}$ сеть находится в работоспособном состоянии с вероятностью $P_0(S_0) \approx 0,8$, а дальнейшее увеличение интенсивности отказов КС $\lambda_{отк}$ ведет к фактическому неработоспособному состоянию сети. При этом предельные максимальные значения вероятностей состояния сети $P_i(S_i)$, использующей конкретный протокол

маршрутизации, определяются значением таймера сохранения текущей конфигурации $T_{ож}$. Наиболее неблагоприятным состоянием сети является состояние «отказ» S_1 , которое также определяется значением таймера $T_{ож}$. Процесс функционирования области маршрутизации может быть формализован на основе той же модели, описываемой выражением (3). Вероятность сохранения работоспособного состояния области маршрутизации не зависит от объема сети, а зависит от числа маршрутизаторов n , у которых отказывают КС.

В дальнейшем планируется усовершенствовать представленную базовую модель в направлениях учета особенностей конкретных протоколов маршрутизации, снятия допущений об экспоненциальном распределении плотности вероятности времени восстановления каналов связи, расширения числа оцениваемых состояний маршрутизатора, а также допущения о стационарном процессе функционирования маршрутизаторов в сети.

Литература

1. Галкин А.М. Исследование вероятностно-временных характеристик и протоколов построения маршрутов в сетях Metro Ethernet. Дисс. к.т.н. – СПб: 2008. – 147 с.
2. Попков В.К., Блукке В.П., Дворкин А.Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. № 4, 2009. – С. 63-78.
3. Жарикова В.О., Новиков С.Н. Математическая модель анализа многоадресной маршрутизации в мультисервисной сети связи // Доклады ТУСУРа. № 1 (25), ч. 2, 2012. – С. 92-96.
4. Ромасевич П.В., Тяжев А.И. Адаптивная телекоммуникационная система как средство реализации качества обслуживания в сетях с интенсивным трафиком // ИКТ. Т. 4, № 3, 2006. – С. 47-51.
5. Сидорова О.И., Хохлов Ю.С. Вероятность переполнения буфера в модели с различным распределением длины активных периодов // Обзорение прикладной и практической математики. Т. 14, № 1, 2007. – С. 78-79.
6. Тарасов В.Н., Коннов А.Л. Анализ производительности сети кампуса на основе имитационного моделирования // Вестник ОГУ. №4 (123), 2011 – С. 147-151.
7. Усовик С.В. Модель трафика вычислительной сети с пакетной коммутацией при априорно неизвестной интенсивности поступления

- ния нагрузки // Известия ОрелГТУ. Серия «Информационные системы и технологии». № 2/58 (585), 2010. – С.115-118.
8. Шибанов А.П. Стохастическая модель канала связи // Вычислительные технологии. Т. 8, №1, 2003. – С. 111-116.
 9. Афонцев Э.В., Гребенкин М.К., Поршнев С.В. О выборе размера буфера маршрутизатора компьютерной сети, нагруженного интенсивным трафиком реального времени // Известия ТПТУ. Т. 313, №5, 2008. – С. 106-109.
 10. Еременко В.Т. Озаренко О.В. Имитационная модель процессов информационного обмена // Известия ОрелГТУ. Серия «Информационные системы и технологии». № 1-4/269 (544), 2008. – С. 187-190.
 11. Еремин Е.Л., Охотников С.С., Теличенко Д.А. Синтез робастного контроллера очереди AQM маршрутизатора // Вестник ТОГУ. № 4 (19), 2010. – С. 13-22.
 12. Никитин А.Ю., Перегняк А.Е. Особенности оценки качества сервисных параметров при моделировании IP-сетей с видеотрафиком // Электротехнические и информационные комплексы и системы. Т. 4, № 4, 2008. – С. 60-62.
 13. Северов Д.С. Поточковая модель сплошной среды для анализа IP-сетей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. № 1, 2009. – С. 146-149.
 14. Березко М.П., Вишневецкий В.М., Левнер Е.В., Федотов Е.В. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. Т. 1, № 2, 2001. – С. 103-125.
 15. Кафтанников И.Л., Домбровский К.А. Адаптивный метод динамической IP-маршрутизации с обратной связью // Известия Челябинского научного центра. Вып. 1 (35), 2007. – С. 49-54.
 16. Картунов В.И., Воробьев А.В. Решение задачи распределения нагрузки на основе динамической модели маршрутизатора // Проблемы телекоммуникаций. № 2 (4), 2011. – С. 128-138.
 17. Орехов С.Е., Ваганов И.Н. Концептуальная модель пакетной сети радиосвязи метрового диапазона с многомерными маршрутами передачи сообщений // Известия ИИФ. Т. 1, № 11, 2009. – С. 57-61.
 18. Гахов Р.П., Косенко И.В. Разработка метода повышения непрерывности функционирования сетей передачи данных // ИКТ. Т. 5, № 3, 2007. – С. 81-83.
 19. Гахов В.Р., Гахов Р.П., Косенко И.В. Разработка математической модели маршрутизатора // ИКТ. Т. 5, № 3, 2007. – С.52-55
 20. Программа сетевой академии Cisco CCNA 1 и 2. М.: ИД «Вильямс». 2008. – 1168 с.
 21. Справочник по исследованию операций. М.: Воениздат, 1979. – 368 с.

THE MODEL OF FUNCTIONING OF THE ROUTER IN THE CASE OF LIMITED RELIABILITY OF COMMUNICATION CANALS

Makarenko S.I., Mikhaylov R.L.

The model of functioning of the router was developed and the influence of faults of communication canals on its reliability by the factor of serviceable condition probability was estimated. The metrics of reliability of the network, which applies different routing protocols, in case of number of communication canals with limited reliability and the intensity of their faults, were researched.

Keywords: model of the router, operation stability of the network, reliability of the network, routing protocols.

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

Михайлов Роман Леонидович, адъюнкт Кафедры СССР КП ВКА им. А.Ф.Можайского МО РФ. Тел. 8-911-777-69-73. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru