

УДК 004.056.53

А.О. Кравцов, А.А. Привалов, М.А. Ракк

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ДАННЫХ В СЕТИ MPLS-TP В УСЛОВИЯХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК ПРИ РЕДКОСЛЕДУЮЩЕМ ВХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ

Кравцов Антон Олегович, окончил факультет «Автоматизация и интеллектуальные технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, аспирант кафедры «Электрическая связь» ПГУПС. Имеет научные статьи в области информационной безопасности телекоммуникационных сетей. Область научных интересов: системы управления телекоммуникациями, информационная безопасность критической информационной инфраструктуры. [e-mail: kravcovanton@mail.ru].

Привалов Андрей Андреевич, доктор военных наук, профессор, окончил Ставропольское высшее училище связи. Профессор кафедры «Электрическая связь» ПГУПС. Автор более 110 научных и учебно-методических трудов и 8 изобретений в области информационной безопасности, математического моделирования систем и процессов связи, систем управления телекоммуникациями. [e-mail: aprivalov@inbox.ru].

Ракк Мария Анатольевна, кандидат технических наук, окончила «Электротехнический факультет» Ленинградского института инженеров путей сообщения. Доцент кафедры «Электрическая связь» ПГУПС. Имеет публикации в сфере системы массового обслуживания, моделирования систем связи. [e-mail: rakkma@mail.ru].

Аннотация

Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года «Белая книга» предусматривает организацию пакетной мультисервисной транспортной сети железнодорожной электросвязи (ТСС) на основе технологии многопротокольной коммутации по меткам для транспортной сети – Multiprotocol Label Switching – Transport Profile (MPLS-TP).

Авторами разработана математическая модель процесса передачи пакетов данных в сети MPLS-TP в условиях компьютерных атак (КА) при редкоследующем входящем потоке. В качестве характеристик КА выступают вероятность и среднее время успешной реализации нарушителем КА на сетевой элемент.

Получены выражения для расчета среднего времени, плотности распределения вероятностей и функции распределения времени передачи при редкоследующем входящем потоке в условиях n КА на ТСС MPLS-TP, различных значениях вероятности доступности нарушителя к каждому сетевому элементу на маршруте передачи и времени восстановления работоспособности каждого сетевого элемента после проведения КА.

Ключевые слова: транспортная сеть связи, MPLS-TP, метод топологического преобразования стохастических сетей, расчет времени доведения информации в сети, маршрутизация, компьютерные атаки, критическая информационная инфраструктура, защита критической информационной структуры.

doi: 10.35752/1991-2927-2019-2-56-44-52

THE MODEL OF DATA-BURST TRANSMITTING PROCESS IN THE NETWORK MPLS-TP IN TERMS OF COMPUTER ATTACKS AT RARE INFLUX OF DATA

Anton Olegovich Kravtsov, graduated from the Faculty of Automation and Intelligent Technologies of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Postgraduate Student at the Department of Electrical Communication of PGUPS; an author of articles in the field of information security of telecommunication networks; research interests are in the field of telecommunication control systems, security of the critical information infrastructure. e-mail: kravcovanton@mail.ru.

Andrei Andreevich Privalov, Doctor of Military Sciences, Professor; graduated from the Stavropol High School of Communications; Professor at the Department of Electrical Communication of PGUPS; an author of more than 110 research articles and educational materials, eight inventions in the field of information security and mathematical

modeling of systems and communication processes, telecommunication control systems. e-mail: aprivalov@inbox.ru.
Mariia Anatolevna Rakk, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Electroengineering Faculty of Leningrad Railway Transport Institute; Associate Professor at the Department of Electrical Communication of PGUPS; an author of articles in the field of queueing systems, communication system simulation. e-mail: rakkma@mail.ru.

Abstract

The strategy of scientific and technical development of the 'Russian Railways' Holding for the period up to 2020 and the prospect till 2025 'White book' envisages the organization of a batch Multiservice Transport Network of railway telecommunication on the basis of Multi-Protocol switching technology on the labels for the transport network-Multiprotocol Label Switching-Transport Profile (MPLS-TP).

The authors have developed a mathematical model of the process of transferring data packets in the network MPLS-TP in the conditions of computer attacks at rare influx of data. The probability of the successful cyberattacks on a network element implemented by penetrator as well as a mean time for that are characteristics of cyberattacks.

Formulas for calculating mean time, the probability density function as well as the function of transfer time distribution in the n conditions of computer attacks on Multiservice Transport Network MPLS-TP Technology at rare influx of data and at the various values of the probability of penetrator's accessibility to each network element on the routing of transmitting and recovering of each network-element performance after cyberattacks.

Key words: transport communication network, MPLS-TP technology, Method of topological transformation of stochastic networks, calculation of average time of the package delivery, routing, computer attacks, critical information infrastructure, protection of critical information structure.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения возрастающих потребностей холдинга ОАО «РЖД» в области телекоммуникационных услуг и ресурсов ставится задача организации пакетной мультисервисной транспортной сети связи (ТСС) на базе технологии многопротокольной коммутации по меткам для транспортной сети (Multiprotocol Label Switching – Transport Profile (MPLS-TP)) [1–4]. Известно, что ТСС ОАО «РЖД» является критической информационной инфраструктурой (КИИ) [5]. Анализ крупных компьютерных атак (КА) на объекты КИИ мира [6] показывает, что ТСС ОАО «РЖД» находится в зоне повышенного внимания нарушителя [7]. В то же время, существующие модели оценки процессов функционирования ТСС не учитывают влияние КА. Поэтому актуализируется задача создания модели для исследования процесса передачи пакетов в перспективной ТСС MPLS-TP в условиях применения нарушителем КА при редкоследующем входящем потоке. Под редкоследующим потоком понимается такой поток входящих пакетов, при котором вероятность поступления очередного пакета в момент обслуживания предыдущего стремится к нулю [8, 9].

В сети MPLS-TP существуют основной (рабочий) коммутируемый по меткам тракт (Label Switch Path Work (LSP W)) и резервный коммутируемый по меткам тракт (Label Switch Path Protection (LSP P)) [10]. Чтобы пакет был передан между корреспондирующими узлами, т. е. коммутируемыми по меткам граничными маршрутизаторами (Label Edge Router (LER)), он проходит через несколько коммутируемых по меткам транзитных маршрутизаторов (Label Switch Router (LSR)). Нарушитель может осуществ-

влять КА на LSR основного тракта, резервного и LER, воздействуя на связность MPLS-TP, тем самым затрудняя или прерывая информационный обмен [11]. В данном вопросе авторов интересует только ТСС, т. е. клиентские (граничные) маршрутизаторы (Client Edge (CE)) не рассматриваются. При реализации КА ТСС ОАО «РЖД», построенная на основе технологии MPLS-TP (рис. 1), может находиться в различных состояниях, что обуславливает актуальность разработки модели для оценки качества ее функционирования в условиях КА по показателям, согласующимся с требованиями автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП) [12].

1 Постановка задачи

Пусть имеется ТСС на базе технологии MPLS-TP, в которой передаются пакеты данных. При организации сети MPLS-TP в соответствии с заданным качеством обслуживания определяются маршруты передачи данных (LSP) [1].

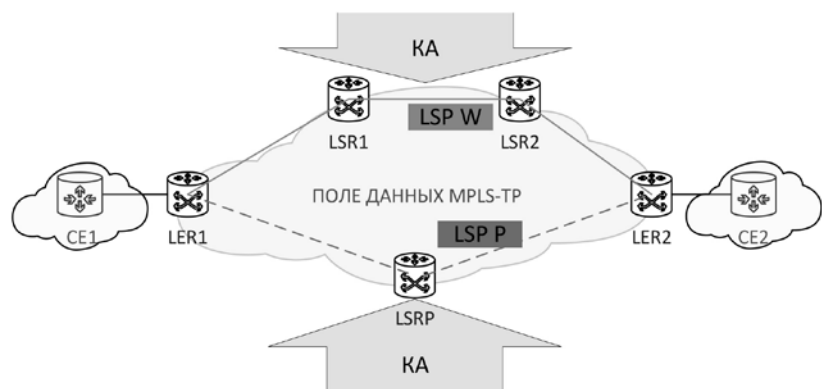


Рис. 1. ТСС на основе технологии MPLS-TP

Положим, что каждый маршрут содержит n узлов, на которые осуществляются КА, и $n-1$ участков. Так как время передачи на участке определяется технической скоростью передачи R и объемом V передаваемых данных, то $t_{nep} = V/R$. Время передачи пакета по LSP-пути сети MPLS-TP [1] равно:

$$t_{nep} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\mu_i} \cdot \frac{1 - (K_i + 1)\rho^{K_i} + K_i\rho^{K_i+1}}{(1 + \rho^{K_i})(1 - \rho)} \right) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\mu_i}$$

при $\mu_i = R/V_i$, $R = const$,

где t_{nep} – среднее время передачи между корреспондирующими узлами;

K_i – величина пачки пакета; ρ – нагрузка сети;

μ_i – скорость передачи пакетов в секунду на i -м участке.

Допустим, что на сеть осуществляется деструктивное информационное воздействие (ДВ), в ходе которого нарушитель может успешно реализовать n КА, каждая из которых с вероятностью P_i , $i = \overline{1, n}$, нарушает работоспособность MPLS-TP, т. е. создает условия, при которых качество передачи пакетов снижается ниже допустимого уровня. Если работоспособность MPLS-TP не нарушена, то пакеты данных будут передаваться за время $t_{nep} = V/R$. В общем случае, t_{nep} является случайной величиной, с функцией распределения (ФР) $B(t)$. В случае нарушения работоспособности MPLS-TP восстанавливается за случайное время t_{ei} , $i = \overline{1, n}$, с ФР $\Delta_i(t)$, а поступивший пакет данных передается повторно.

Входящий поток пакетов данных является редкоследующим, а КА возможны как во время передачи пакетов, так и в паузах между ними. Количество мест для ожидания передачи считается неограниченным [7, 8].

Требуется определить математическое ожидание времени передачи пакета между корреспондирующими узлами (T_h) и ФР времени успешной передачи пакетов данных в условиях КА.

1.2 РЕШЕНИЕ

Представим описанный в постановке задачи процесс функционирования MPLS-TP в виде стохастической сети [12] (рис. 2).

На рисунке 2:

$$\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[B(t)] - \text{преобразование}$$

Лапласа-Стилтьеса (ЛС) [8] ФР времени передачи пакетов без учета КА нарушителя, т. е. в «идеальных условиях»;

$$\delta_i(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[\Delta_i(s)], i = \overline{1, n} - \text{преоб-}$$

разования ЛС ФР времени восстановления ТСС после i -го вида КА.

Используя уравнение Мейсона для замкнутых графов [8], составим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$h_n(s) = \frac{k\beta(s)(\bar{D} + \bar{c} + s)}{\left[1 - \beta(s) \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right]} \times \frac{\prod_{i=1}^n (1 - P_i)}{(\bar{D} + s)} = \frac{V(s)}{U(s)}, \quad (1)$$

где $\bar{d} = \sum_{i=1}^n t_{ei}^{-1} P_i$, $\bar{c} = \sum_{i=1}^n t_{psi}^{-1} P_i$ – математические

ожидания интенсивностей восстановления и реализации нарушителем КА соответственно [13];

s – параметр преобразования Лапласа;

$V(s)$ – многочлен числителя эквивалентной функции стохастической сети;

$U(s)$ – многочлен знаменателя эквивалентной функции стохастической сети;

$$k = \frac{\bar{d}}{\bar{d} + \bar{c}} - \text{вероятность восстановления работоспо-}$$

собности сетевых элементов за время повторной передачи пакета и реализации очередной КА.

С целью определения математического ожидания и ФР времени передачи требуется вычислить значение производных многочленов числителя ($V'(0)$) и знаменателя ($U'(0)$) (3) в точке $s = 0$:

$$U(0) = \left[1 - \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^n (1 - P_j) \right] \bar{d}; \quad (3)$$

$$V'(s) = k \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \left[\beta'(s)(\bar{d} + \bar{c} + s) + \beta(s)(\bar{d} + \bar{c}) \right]; \quad (4)$$

$$V'(0) = k(\bar{d} + \bar{c}) \left(1 - \bar{t}_\beta \right) \prod_{i=1}^n (1 - P_i); \quad (5)$$

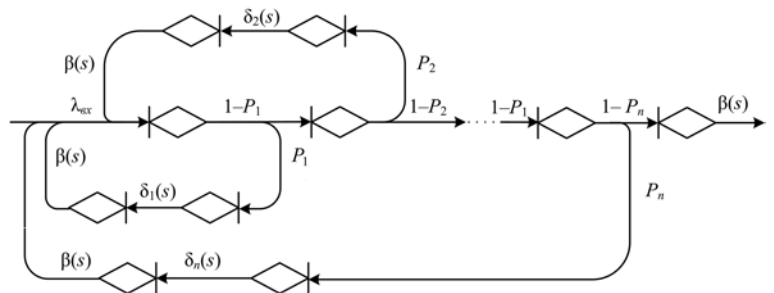


Рис. 2. Стохастическая сеть процесса функционирования ТСС на базе MPLS-TP при реализации КА

$$\begin{aligned}
 U'(s) &= \bar{d} \left[1 - \beta(s) \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right] + \\
 &+ (\bar{d} + s) \left[-\beta'(s) \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) - \right. \\
 &\quad \left. - \beta(s) \sum_{i=1}^n P_i \delta'_i(s) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right], \\
 U'(0) &= \bar{d} \left[1 - \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right] + \\
 &+ \bar{d} \left[\bar{t}_\beta \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) + \sum_{i=1}^n \bar{t}_{\delta_i} P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right] = \\
 &= \bar{d} \left[1 - (1 - \bar{t}_\beta) \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right] + \sum_{i=1}^n P_i \bar{t}_{\delta_i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j),
 \end{aligned} \tag{6}$$

где \bar{t}_β – среднее время передачи пакета между корреспондирующими узлами.

Подставляя (4–9) в формулу (10)

$$\bar{T}_h = - \frac{d}{ds} \left[\frac{h_n(s)}{h_n(0)} \right]_{s=0}, \tag{8}$$

получим математическое ожидание времени передачи пакета в условиях КА:

$$\begin{aligned}
 \bar{T}_h &= \frac{(1 - \bar{t}_\beta) \cdot \tilde{P} \cdot [1 - \tilde{E}]}{(1 - \tilde{E})^2} - \\
 &\frac{\tilde{P} \cdot \left[1 - (1 - \bar{t}_\beta) \cdot \tilde{E} + \sum_{i=1}^n P_i \cdot \bar{t}_{\delta_i} \cdot \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right]}{(1 - \tilde{E})^2} = \\
 &= \frac{\tilde{P}}{[1 - \tilde{E}]^2} \cdot \left[\sum_{i=1}^n P_i \cdot \bar{t}_{\delta_i} \cdot \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) + \bar{t}_\beta \right],
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $\tilde{P} = \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$, $\tilde{E} = 1 - \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j)$; (10)

\bar{t}_{δ_i} – среднее время восстановления после i -й КА.

Таким образом, получим:

$$h_n(s) = \sum_{k=1}^n \frac{k \beta(s_k) (\bar{d} + \bar{c} + s_k) \prod_{i=1}^n (1 - P_i)}{d [1 - \beta(s_k) XY] + (\bar{d} + s_k) \left[-\beta'(s_k) XY - \beta(s_k) \sum_{i=1}^n P_i \delta'_i(s_k) Y \frac{1}{S - S_k} \right]}, \tag{14}$$

Соответственно, дисперсия определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 D[t_h] &= h_1 - h_1^2 = \frac{d^2}{dS^2} \left[\frac{h_n(s)}{h_n(0)} \right]_{s=0} - \\
 &- \left\{ \frac{d}{dS} \left[\frac{h_n(s)}{h_n(0)} \right]_{s=0} \right\}^2.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Для получения ФР времени передачи пакетов необходимо произвести обратное преобразование, позволяющее вычислить оригинал $H_n(t)$ по его изображению $h_n(s)$.

Известно, что наиболее точным средством для вычисления оригинала $F(t)$ по изображению $f(s)$ является комплексный интеграл [14]

$$F(t) = \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi - j} \int_{\alpha - jy}^{\alpha + jy} e^{-st} h_n(s) ds, \tag{12}$$

где α – абсцисса в полуплоскости абсолютной сходимости интеграла Лапласа.

Однако для вычисления функции $F(t)$ формула (14) практически не пригодна, так как требуется знание функции $h_n(s)$ для комплексных значений $s = x + jy$, $-\infty < y < +\infty$. Поэтому для определения $F(t)$ необходимо преобразовать функцию $h_n(s)$, используя методы, известные из теории функций комплексного переменного [14].

В результате подстановки в (3) конкретных значений $\delta_i(s)$ и $\beta(s)$, полученных по формулам (1) и (2), функция $h_n(s)$ приводится к дробному – рациональному виду:

$$h_n(s) = \frac{V(s)}{U(s)}, \quad \deg V(s) = m, \quad \deg U(s) = n, \tag{13}$$

где $V(s)$ и $U(s)$ – многочлены степени m и n соответственно. При этом $\deg V(s) < \deg U(s)$, а $h_n(s)$ имеет простые нули, $s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_n$, т.е. $U(s) = (s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_k) \dots (s - s_n)$. Тогда коэффициентами такого разложения являются вычеты функции $h_n(s)$ в ее полюсах s_k . Вычет функции определяется по следующему правилу: «Если функции $f_1(s)$ и $f_2(s)$ в окрестности точки s_1 аналитические и если $f_1(s_0) \neq 0$, в то время как $f_2(s)$ имеет в точке s_0 простой нуль, тогда вычет функции $f_1(s)/f_2(s)$ в точке s_0 равен $f_1(s_0)/f_2'(s_0)$ » [8].

где $X = \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s_k)$, $Y = \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j)$.

Так как этот ряд содержит только конечное число членов, то легко выполнить переход в пространство оригиналов $h_n(t)$ [13]:

$$h_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{V'(s_k)}{U'(s_k)} e^{s_k t}, \tag{15}$$

где $V'(s_k) = k \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \times$

$$\times [\beta'(s_k)(\bar{d} + \bar{c} + s_k) + \beta(s_k)(\bar{d} + \bar{c})],$$

$$U'(s_k) = \bar{D} \left[1 - \beta(s_k) \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s_k) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right] +$$

$$+ (\bar{D} + s_k) \left[-\beta'(s_k) \sum_{i=1}^n P_i \delta_i(s_k) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) - \right. \tag{17}$$

$$\left. - \beta(s_k) \sum_{i=1}^n P_i \delta'_i(s_k) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j) \right].$$

Полученное выражение представляет собой функцию плотности вероятности времени передачи пакетов. Для определения интегральной ФР $H_n(t)$ необходимо проинтегрировать выражение (17) по переменной t с переменным верхним пределом [13], т. е.

$$H_n(t) = \int_0^t H_n(t) dt = \tag{18}$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} S_k^{-1} (1 - e^{s_k t}).$$

Если вместо t в формулу (17) подставить значение заданного времени передачи пакетов T'_3 , то получим вероятность передачи пакетов в условиях реализации нарушителем n КА за время не более заданного:

$$P(t_n \leq T'_3) = \sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} S_k^{-1} (1 - e^{-T'_3 s_k}). \tag{19}$$

Выражения (11), (17), (21) справедливы для любых законов распределения $\Delta_i(t)$, $B(t)$ и являются, по существу, правилом для вычисления значений \bar{T}_h , $D(t_h)$ и $P(t_n \leq T'_3)$. В частном случае, при $\deg U(s) - \deg V'(s) = n - m = 1$, что справедливо при показательных законах распределения $\Delta_i(t)$ и $B(t)$, выражение (3) приводится к виду:

$$h_n(s) = \frac{b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_i s^i + \dots + b_1 s + b_n}{(s + s_1)(s + s_2) \dots (s + s_i) \dots (s + s_n)}. \tag{20}$$

Функция плотности вероятности времени передачи, в этом случае, будет равна:

$$H_n(t) = \frac{b_{n-1} (-s)^{n-1} + \dots + b_n}{(s_2 - s_1)(s - s_i) \dots (s_n - s_i)} e^{-s_i t} + \dots \tag{21}$$

$$+ \frac{b_{n-1} (-s_k)^{n-1} + \dots + b_0}{(s_{k+1} - s_k)(s_{k+2} - s_k) \dots (s_n - s_k)} e^{s_k t} + \dots$$

Почленно интегрируя (23), получим интегральную функцию распределения времени передачи пакетов:

$$H(t) = \sum_{k=1}^n \frac{b_{n-1} (-s_k)^{n-1} + \dots + b_i s_k + b_n}{(s_{k+1} - s_n)(s_{k+2} - s_k) \dots (s_n - s_k)} \times \tag{22}$$

$$\times s_k^{-1} (1 - e^{s_k t}).$$

1.3 Вывод

Таким образом, в общем виде получены выражения для вычисления значений математического ожидания \bar{T}_h , дисперсии $D[t_h]$, вероятности своевременной передачи $h_n(s)$, функций плотности вероятности $h_n(t)$, а также вероятности передачи пакета за время не более заданного $P(t_n \leq T'_3)$ в условиях реализации нарушителем n КА. Данные выражения получены без ограничения на вид ФР времени передачи $B(t)$ и времени восстановления $\Delta_i(t)$.

Для демонстрации изложенного метода определения ФР времени доведения пакетов данных в сети MPLS-TP рассмотрим следующую частную задачу.

2 Постановка частной задачи

Положим, что целью нарушителя является блокировка оборудования корреспондирующих узлов MPLS-TP (LER1 и LER2) (рис. 1) [15, 16], на которые нарушитель осуществляет КА и нарушает их работоспособность с вероятностью P_1 и P_2 соответственно. При этом среднее время успешной реализации каждой КА равно \bar{t}_{pe1} , \bar{t}_{pe2} соответственно. Если работоспособность узлов MPLS-TP не нарушена, то поступивший на передачу пакет будет передан за время $t_{nep} = V/R$, являющееся случайной величиной, распределенной по закону $B(t)$. В случае нарушения работоспособности MPLS-TP восстанавливается за случайное время t_{gi} , $i = 1, 2$, с ФР $\Delta_i(t)$, а поступивший пакет передается повторно.

Входящий поток пакетов данных является редкоследующим, а КА возможны как во время передачи пакетов, так и в паузах между ними. Количество мест для ожидания передачи считается неограниченным [7].

Требуется определить среднее время T_h и ФР $F(t)$ времени успешной передачи пакетов данных в условиях КА, реализуемых нарушителем.

2.1 РЕШЕНИЕ

Представим процесс функционирования ТСС при реализации нарушителем двух видов КА в виде стохастической сети (рис. 3).

Предположим, что $\Delta_1(t) = 1 - e^{\delta_1 t}$; $\Delta_2(t) = 1 - e^{\delta_2 t}$; $\beta(t) = 1 - e^{\beta t}$.

Используя уравнение Мейсона для замкнутых графов, составим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$h(s) = \frac{(1-P_1)(1-P_2)\beta(s)}{\left[1 - P_1\delta_1(s)\beta(s) - P_2\delta_2(s)\beta(s)(1-P_1)\right]} \times \frac{k(\bar{d} + s + \bar{c})}{(\bar{d} + s)}, \quad (23)$$

где $h_0 = \frac{b(P_1 - 1)(P_2 - 1)(\bar{c} + \bar{d})}{\bar{d}(P_1 + P_2 - b - P_1P_2)}$;

$$\bar{d} = d_1P_1 + d_2P_2; \bar{c} = \frac{P_1}{t_{pe1}} + \frac{P_2}{t_{pe2}}$$

$$k = \frac{\bar{d}}{\bar{d} + \bar{c}}; d_1 = \frac{1}{t_{e1}}; d_2 = \frac{1}{t_{e2}}; b = \frac{1}{t_n}$$

Представим знаменатель эквивалентной функции в каноническом виде, т. к. это позволяет перейти к разложению Хевисайда для случая простых полюсов [13]:

$$h(s) = \sum_{i=1}^4 \frac{(\bar{d} + \bar{c} + s)(d_1 + s)(d_2 + s)(1 - P_1)(1 - P_2)bk}{4(s_1)^3 + 3(s_1)^2 \cdot A + 2s_1B + C}, \quad (24)$$

где

$$D = b\bar{d}d_1d_2 - P_2\bar{d}d_1d_2 - P_1\bar{d}d_1d_2 + P_1P_2\bar{d}d_1d_2;$$

$$C = b\bar{d}d_1 - P_2\bar{d}d_2 - P_1d_1d_2 - P_2d_1d_2 - P_1\bar{d}d_1 + b\bar{d}d_2 + bd_1d_2 + \bar{d}d_1d_2 + P_1P_2\bar{d}d_2 + P_1P_2d_1d_2;$$

$$B = b\bar{d} - P_2d_2 - P_1d_1 + bd_1 + bd_2 + \bar{d}d_1 + \bar{d}d_2 + d_1d_2 + P_1P_2d_2;$$

$$A = b + \bar{d} + d_1 + d_2.$$

(25)

Среднее время \bar{T}_h успешной передачи пакетов равно:

$$\bar{T}_h = \frac{k(P_1 - 1)(P_2 - 1)}{b\bar{d}^2 d_1 d_2 (P_2 - P_2^2 + P_1 - 1)^2 h(0)} \times \left(\bar{d}^2 d_1 d_2 - P_2^2 b d^2 d_1 + b\bar{c}d_1 d_2 + \bar{c}d d_1 d_2 + P_1 b \bar{d}^2 d_2 + P_2 b d^2 d_1 - P_2^2 b \bar{c}d d_1 + P_2^2 b \bar{c}d_1 d_2 + P_1 b \bar{c}d d_2 + P_2 b \bar{c}d d_1 - P_1 b \bar{c}d_1 d_2 - P_2 b \bar{c}d_1 d_2 \right). \quad (26)$$

Функция плотности распределения вероятностей времени передачи имеет следующий вид:

$$h(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{\left[(\bar{d} + s_i + \bar{c})(d_1 + s_i)(d_2 + s_i)(1 - P_2) b \cdot k \right] e^{s_i t}}{\left[4(s_i)^3 + 3A(s_i)^2 + 2Bs_i + C \right] (-s_i) h_0 k} \quad (27)$$

Функция плотности распределения вероятностей времени передачи представлена следующим образом:

$$H(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{\left[(\bar{d} + s_i + \bar{c})(d_1 + s_i)(d_2 + s_i)(1 - P_2) b k \right] (1 - \exp s_i t)}{\left[4(s_i)^3 + 3A(s_i)^2 + 2Bs_i + C \right] (-s_i) h_0 (s_i) - (s_k)}. \quad (28)$$

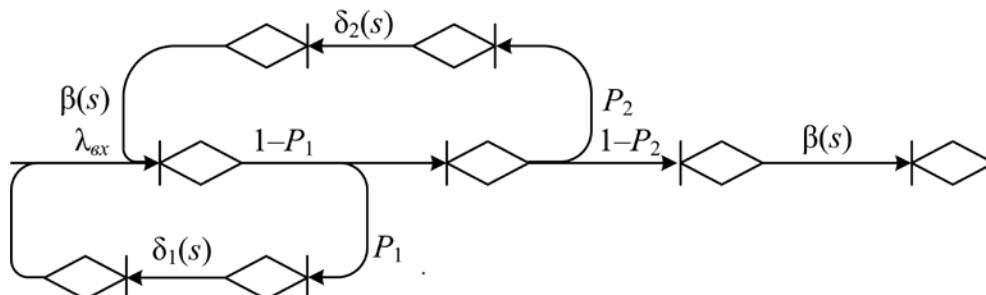


Рис. 3. Стохастическая сеть процесса функционирования ТСС MPLS-TP при реализации нарушителем двух видов КА

При проведении расчетов предполагалось следующее:

- среднее время передачи пакета данных с объемом $V = 10$ Мбит между корреспондирующими узлами равно 1 с;

- среднее время восстановления работоспособности MPLS-TP после успешной реализации нарушителем КА изменяется в пределах $t_{\theta_1} = 3 \dots 5$ с и $t_{\theta_2} = 2,5 \dots 4$ с, соответственно;

- среднее время реализации нарушителем КА равно $t_{p\theta_1} = 50$ и $t_{p\theta_2} = 100$ с соответственно;

- вероятность успешной реализации нарушителем КА принимает значения в диапазоне 0,08...0,8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- вероятность успешного доведения информации в сети не может превышать значения коэффициента исправного действия $K_{ин}$, зависящего не только от надежности оборудования MPLS-TP, но и от возможностей нарушителя по оказанию КА на сеть. То есть $K_u = K_{ин} \cdot K_{ижс} \cdot K_{ину} \cdot K_{инсв}$, где $K_{ин}$, $K_{ижс}$, $K_{ину}$, $K_{инсв}$ – коэффициенты исправного действия по надежности, живучести, помехоустойчивости и КА соответственно. Так как требуемые согласно руководящим документам [17] значения $K_{ин}$, $K_{ижс}$, $K_{ину}$ обеспечиваются на этапе проектирования сети, то будет справедли-

во полагать, что в условиях КА $K_u = \frac{\bar{t}_{p\theta}}{\bar{t}_{p\theta} + \bar{t}_\theta}$, где $\bar{t}_{p\theta}$,

\bar{t}_θ – среднее время реакции нарушителя по реализации КА и восстановления работоспособного состояния сети соответственно;

- в условиях реализации нарушителем КА существенно возрастает роль эффективности системы управления информационной безопасностью MPLS-TP, характеризуемой в модели временем восстановления работоспособности после КА. Так, например, при вероятности успешной реализации нарушителем КА $P_i \geq 0,5$, незначительное увеличение времени восстановления работоспособности приводит к резкому увеличению среднего времени передачи пакетов;

- время успешного доведения информации в сети зависит от возможности нарушителя оказать КА на сетевые элементы. Так, например, если нарушитель способен успешно реализовать воздействие с вероятностью не ниже 0,7, следует ожидать увеличения среднего времени доведения информации в сети более чем в пять раз;

- закон распределения времени успешной передачи пакета в общем случае является гиперэкспоненциальным и, как показано в [18], может быть с достаточной точностью аппроксимирован неполной гамма-функцией. Расчеты показывают, что полученное

распределение обладает значительной правосторонней асимметрией (коэффициент асимметрии $K_A \geq 1,9$), является несущественно островершинным (коэффициент эксцесса $E_A \geq 5,7$), а поток успешно переданных пакетов является неоднородным (коэффициент вариации $K_v \geq 130\%$) [18]. Следует ожидать, что параметр потока

успешно переданных пакетов $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$ являет-

ся непостоянным во времени и при $t \rightarrow \infty$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} e^{s_k t}}{1 - \left(\sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} S_k^{-1} (1 - e^{s_k t}) \right)} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} e^{s_k t} \cdot s_k}{\sum_{k=1}^n \frac{V(s_k)}{U'(s_k)} e^{s_k t}} \leq \frac{1}{T_h}, \quad (29)$$

т. е. интенсивность успешной передачи пакетов не превосходит интенсивности, определяемой как величины обратной среднему времени успешной передачи пакето-

тов $\frac{1}{T_h}$. Это говорит о том, что поток успешно переданных пакетов не является простейшим, в связи с чем актуализируется задача оценки времени доведения информации в сетях MPLS-TP для случая, когда входящий поток не является редкоследующим, а соответствует реальному взаимодействию корреспондирующих пар в сети (рис. 4).

Таким образом, разработанная модель обеспечивает получение не противоречащих логике результатов, чувствительна к изменению параметров и работоспособна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцов А.О., Ракк М.А. Эффективность применения технологии MPLS-TP на сети передачи данных // Бюллетень результатов научных исследований. – СПб., 2015. – С. 40–48.
2. RFC 5317 Joint Working Team (JWT) Report MPLS Architectural Considerations for a Transport Profile. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5317> (дата обращения: 19.02.2019).
3. RFC 5654 Requirements of an MPLS Transport Profile. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5654> (дата обращения: 19.02.2019).
4. RFC 5921 A Framework for MPLS in Transport Networks. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5921> (дата обращения: 19.02.2019).
5. О безопасности критической информационной структуры Российской Федерации : федер. за-

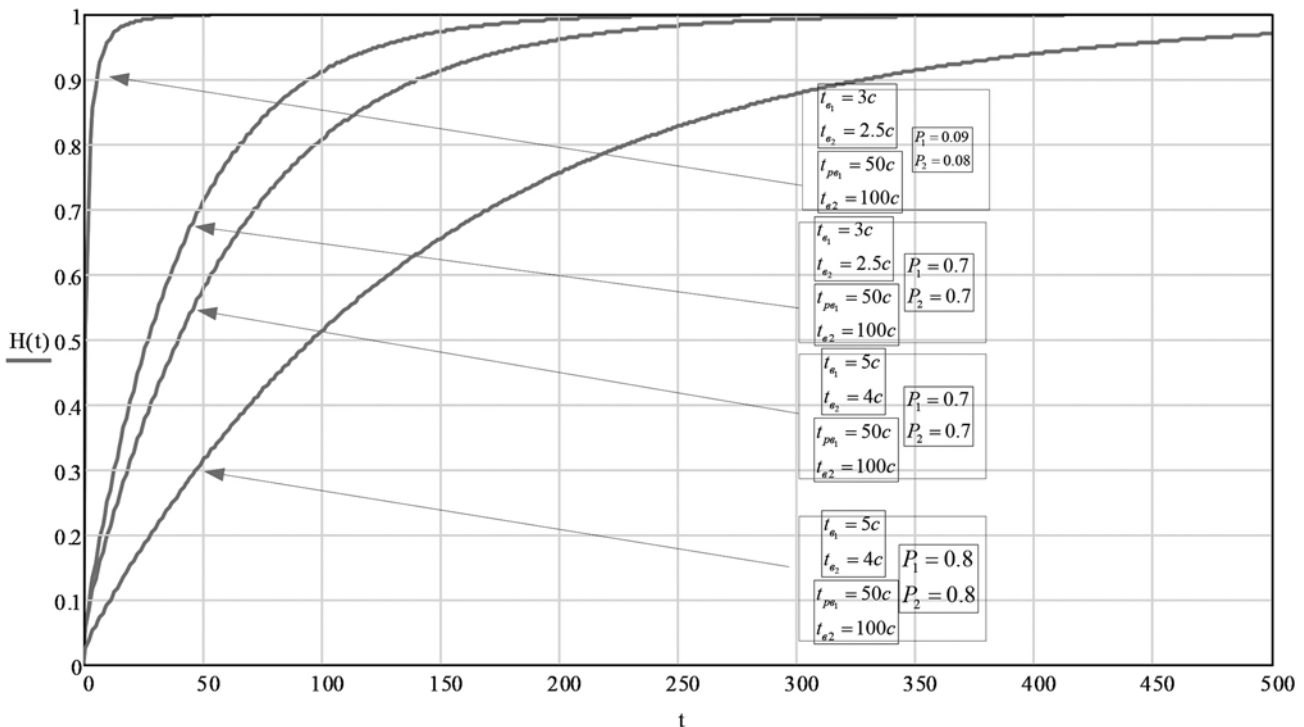


Рис. 4. Семейство ФР времени передачи сообщения при осуществлении двух видов КА

кон РФ от 26.07.17 № 187-ФЗ. – URL: <https://fstec.ru/index?id=1610:federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz> (дата обращения: 05.10.2018).

6. Самые громкие кибератаки на критические инфраструктуры // Блог компании Panda Security в России и СНГ, Антивирусная защита, IT-инфраструктура. 30.11.2016. – URL: <https://habr.com/ru/company/panda/blog/316500/> (дата обращения 19.02.2019).

7. Духвалов А.П. Кибератаки на критически важные объекты – вероятная причина катастроф // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 3 (4). – С. 50–53.

8. Розенберг В.Я., Прохоров А.И. Что такое теория массового обслуживания. – М.: Советское радио, 1962. – 257 с.

9. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ. – СПб.: ВМА, 2000. – 166 с.

10. Кравцов А.О., Рак М.А. Сетевые защитные механизмы технологии MPLS-TP // Бюллетень результатов научных исследований. – 2015. – С. 30–40.

11. Кравцов А.О., Привалов А.А. Методика выбора приоритетных элементов информационно-телекоммуникационной системы, функционирующей в условиях применения организованным нарушителем таргетированных атак // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 137–148.

12. Евлевская Н.В. Методика комплексной оценки информационной безопасности телекоммуникационной сети единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками ОАО «РЖД»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2016. – 21 с.

13. Pristker A.A.B., Harp W.W. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 1 // The Journal of Industrial Engineering. May 1966.

14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –10-е изд. – М.: Высшая школа, 2006. – 575 с.

15. Привалов И.И. Введение в теорию функций комплексного переменного: учеб. – М.: Наука, 1984. – 356 с.

16. Модель процесса «DDoS»-атаки на телекоммуникационную сеть железнодорожного транспорта / Г.А. Бекбаев, А.А. Привалов, Н.Б. Ачкасов, А.О. Кравцов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 420–425.

17. Математическая модель XSS-атаки / А.А. Привалов, Ю.С. Карабанов, А.О. Кравцов, С. И. Сидоров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 167–172.

18. ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.

19. Куделя В.Н., Привалов А.А. Методы математического моделирования систем и процессов связи. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 368 с.

REFERENCES

1. Kravtsov A.O., Rakk M.A. Effektivnost primeneniia tekhnologii MPLS-TP na seti peredachi dannykh [Efficiency of MPLS-TP Technology Implementation Within Data Communication Network]. *Bulleten rezultatov nauchnykh*

- issledovaniy* [Bull. of Scientific Research Results]. St. Petersburg, 2015, pp. 40–48.
2. RFC 5317 Joint Working Team (JWT) Report MPLS Architectural Considerations for a Transport Profile. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5317> (accessed: 19.02.2019).
 3. RFC 5654 Requirements of an MPLS Transport Profile. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5654> (accessed: 19.02.2019).
 4. RFC 5921 A Framework for MPLS in Transport Networks. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5921> (accessed: 19.02.2019).
 5. O bezopasnosti kriticheskoi informatsionnoi struktury Rossiiskoi Federatsii. Feder. zakon RF ot 26.07.17 No. 187-FZ [Federal Law of the Russian Federation dtd. 26 July, 2017, No. 187-FZ. On the Security of Critical Information Structure of the Russian Federation]. Available at: <https://fstec.ru/index?id=1610:federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz> (accessed: 05.10.2018).
 6. Samye gromkie kiberataki na kriticheskie infrastruktury [The Most Famous Cyberattacks on Critical Infrastructure]. *Blog kompanii Panda Security v Rossii i SNG, Antivirusnaia zashchita, IT-infrastruktura*. 30.11.2016 [Blog of the Panda Security Company in Russian and CIS. Antivirus Protection. IT-Infrastructure]. Available at: <https://habr.com/ru/company/panda/blog/316500/> (accessed: 19.02.2019).
 7. Dukhvalov A.P. Kiberataki na kriticheski vazhnye ob'ekty – veroiatnaia prichina katastrof [Cyber Attacks on Critical Infrastructure – Probable Cause of Crush]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cyber Security Issues], 2014, no. 3 (4), pp. 50–53.
 8. Rozenberg V.Ia., Prokhorov A.I. *Chto takoe teoriia massovogo obsluzhivaniia* [The Queueing Theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1962. 257 p.
 9. Privalov A.A. *Metod topologicheskogo preobrazovaniia stokhasticheskikh setei i ego ispolzovanie dlia analiza sistem svyazi VMF* [The Method of Topological Transformations of Stochastic Networks and Its Application to the Analysis of Communication Systems of the Navy]. St. Petersburg. VMA Publ., 2000. 166 p.
 10. Kravtsov A.O., Rakk M.A. Setevye zashchitnye mekhanizmy tekhnologii MPLS-TP [Network Safety Mechanism for MPLS-TP Technology]. *Biulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bull. of Scientific Research Results], 2015, pp. 30–40.
 11. Kravtsov A.O., Privalov A.A. Metodika vybora prioritnykh elementov informatsionno-telekommunikatsionnoi sistemy, funktsioniruiushchei v usloviakh primeneniia organizovannym narushitelem targetirovannykh atak [The Selection Method of Priority Elements in Informational Telecommunication System Functioning in the Conditions of Targeted Attacks Applied by Organized Violator]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2017, vol. 14, no. 1, pp. 137–148.
 12. Evglevskaia N.V. *Metodika kompleksnoi otsenki informatsionnoi bezopasnosti telekommunikatsionnoi seti edinogo dorozhnogo dispetcherskogo tsentra upravleniia perevozkami OAO 'RZhD'*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [The Method of Complex Assessment of Information Security of the Telecommunication Network of the Unified Road-Dispatching Center of Transport Management Russian Railways. Abstract of PhD Diss.]. St.Petersburg., 2016. 21 p.
 13. Pristker A.A.B., Harp W.W. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 1. *The Journal of Industrial Engineering*, May 1966.
 14. Ventsel E.S. *Teoriia veroiatnostei. 10-e izd.* [The Theory of Probability]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2006. 575 p.
 15. Privalov I.I. *Vvedenie v teoriyu funktsii kompleksnogo peremennogo. Ucheb.* [Introduction to the Theory of Functions of a Complex Variable. Textbook]. Moscow, Nauka, 1984. – 356 s.
 16. Bekbaev G.A., Privalov A.A., Achkasov N.B., Kravtsov A.O. Model protsessa DDOS-ataki na telekommunikatsionnuiu set zheleznodorozhnogo transporta [DDoS-Attack Process Model on Telecommunication Network of Railway Transport]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Petersburg State Transport University Proc.], 2017, vol. 14, no. 3, pp. 420–425.
 17. Privalov A.A., Karabanov Iu.S., Kravtsov A.O., Sidorov S.I. Matematicheskaiia model XSS-ataki [Mathematical Model of XSS-Attacks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Petersburg State Transport University Proc.], 2018, vol. 15, no. 1, pp. 167–172.
 18. GOST 15.016-2016. *Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Tekhnicheskoe zadanie. Trebovaniia k sodержaniuu i oformleniiu* [National Standard. System of Products Development and Launching into Manufacture. Technical Assignment. Requirements to Contents and Form of Presentation]. Moscow. Standartinform Publ., 2017. 11 p.
 19. Kudelia V.N., Privalov A.A. *Metody matematicheskogo modelirovaniia sistem i protsessov svyazi* [Methods of Mathematical Modeling of Communication Systems and Processes]. St. Petersburg, Izd-vo Politekhn. Univ. Publ., 2009. 368 p.