

Динамическая модель процесса функционирования телекоммуникационной сети ОАО «РЖД» в нестационарных условиях

Dynamic model of JSC «Russian Railways» telecommunication network functioning process in non-stationary conditions

Бекбаев / Bekbaev G.

Гамзатдин Алеуатдинович
(gamzat-86@mail.ru)
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС) Императора Александра I»,
аспирант кафедры «Электрическая связь».
г. Санкт-Петербург

Вандич / Vandich A.

Алексей Павлович
(alex_van_555@mail.ru)
кандидат технических наук.
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Ясинский / Jasinskii S.

Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЛО ЦНИИС,
научный консультант.
г. Санкт-Петербург

Привалов / Privalov A.

Андрей Андреевич
(apivalov@inbox.ru)
доктор военных наук, профессор,
действительный член Российской академии естественных наук и Российской академии военных наук.
ПГУПС Императора Александра I,
профессор кафедры «Электрическая связь».
г. Санкт-Петербург

Привалов / Privalov A.

Александр Андреевич
(a_privalov@bk.ru)
кандидат физико-математических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет»,
доцент кафедры теоретической информатики и дискретной математики.
г. Москва

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть – telecommunication network; нарушитель – offender; деструктивное воздействие – destructive impact.

В статье рассматривается модель передачи потоков управляющих сообщений от центральных пунктов управления в региональные и зональные узлы для организации перевозочного процесса с использованием телекоммуникационной сети ОАО «РЖД» в условиях возможных деструктивных воздействий нарушителя на ее элементы. При этом учитывается целевой характер технологического процесса ОАО «РЖД».

The article is devoted to control messages streams transmission model from the central control panels to the regional and areal nodes for transportation process organization using JSC «Russian Railways» telecommunication network under the conditions of possible destructive offender impacts on its elements. It also accounts for the targeted nature of JSC «Russian Railways» technological process.

Анализ особенностей функционирования железнодорожной связи показывает, что при осуществлении перевозочного процесса, особенно на высокоскоростных магистралях, происходит постоянное изменение условий функционирования сети связи. При этом наибольшую опасность представляют деструктивные воздействия на элементы телекоммуникационной сети (ТКС) и Единой системы мониторинга и администрирования (ЕСМА), являющейся основной составляющей автоматизированной системы управления ТКС ОАО «РЖД», при совершении террористических актов и при несанкционированных информационных воздействиях. Это объективно обуславливает необходимость разработки моделей, отображающих динамику функционирования ТКС ОАО «РЖД» и позволяющих принимать количественно обоснованные решения на организацию связи.

Известно [3], что нестационарность условий функционирования ТКС ОАО «РЖД» обусловлена:

– непостоянством сигнально-помеховой обстановки в районе выполнения текущей задачи перевозочного процесса;

– непостоянством множества элементов ТКС, используемых для доставки информации управления от центральных пунктов управления непосредственным исполнителям региональных и зональных уровней;

– непостоянством входящего потока сообщений, параметры которого определяются конкретной задачей перевозочного процесса;

– деструктивными воздействиями (в т.ч. и программно-аппаратными) на ТКС со стороны нарушителя;

– различием мер, реализуемых ЕСМА для восстановления работоспособности ТКС ОАО «РЖД» или ее элементов.

Кроме того, в работах [1, 3] была описана методика определения математического ожидания $M[X(T_\Phi)]$ процесса изменения вероятности своевременной доставки категориальных сообщений, как сечения поверхности распределения плоскостью, параллельной плоскости ординат и проходящей через точку T_3 , расположенной на оси абсцисс. При этом поверхность распределения была определена как [1]

$$Q_{\text{ткс}}(t, T_\Phi) = \begin{cases} 0, & t < U \\ \frac{[M_{\text{ткс}}(T_\Phi)]^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)} t^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)-1}}{\Gamma[A_{\text{ткс}}(T_\Phi)]} \exp\{-M_{\text{ткс}}(T_\Phi)t\}, & t \geq U \end{cases}, \quad (1)$$

где: $\Gamma[A_{\text{ткс}}(T_\Phi)]$ – значение гамма-функции в точке $A_{\text{ткс}}(T_\Phi)$;

$$A_{\text{ткс}}(T_\Phi) = \left[\frac{Tn_{\text{ткс}}^2(T_\Phi)}{Dn_{\text{ткс}}(T_\Phi)} \right]; \quad M_{\text{ткс}}(T_\Phi) = \left[\frac{Tn_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{Dn_{\text{ткс}}(T_\Phi)} \right];$$

$Tn_{\text{ткс}}(T_\Phi)$ – математическое ожидание времени доставки сообщения через ТКС;

$Dn_{\text{ткс}}(T_\Phi)$ – дисперсия времени доставки сообщения через ТКС;

$$Tn_{\text{ткс}}(T_\Phi) = \sum_{i=1}^N Tn_i; \quad Dn_{\text{ткс}} = \sum_{i=1}^N Dn_i;$$

Tn_i – математическое ожидание времени доставки сообщения через i -ое направление ТКС;

Dn_i – дисперсия времени доставки сообщения через i -ое направление ТКС;

$$U = \max[M_i^{-1}; i = \overline{1, N}] - \sum_{N=1} M_i^{-1};$$

N – число направлений связи в ТСК.

Вид поверхности $Q_{\text{ткс}}(t, T_\Phi)$ показан на рис. 1.

Однако для решения задачи управления сетью связи в нестационарных условиях и прогнозирования эффективности ее функционирования знания математического ожидания $M[X(T_\Phi)]$ не является достаточным.

Поэтому для определения других характеристик случайного процесса $X(T_\Phi)$ определим преобразование Лапласа выражения (1):

$$Q_{\text{ткс}}(s, T_\Phi) = \int_0^\infty \exp(-st) d[Q_{\text{ткс}}(t, T_\Phi)] = \left(\frac{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{M_{\text{ткс}}(T_\Phi) + s} \right)^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)} \exp[sU]. \quad (2)$$

Это позволяет определить спектральную плотность моделируемого процесса путем замены в выражении (2) параметра преобразования s на $j\omega$:

$$Q_{\text{ткс}}(j\omega, T_\Phi) = \left(\frac{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{M_{\text{ткс}}(T_\Phi) + j\omega} \right)^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)} \exp[j\omega U] = \frac{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}}{(M_{\text{ткс}}(T_\Phi)^2 + \omega^2)^{\frac{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{2}}} \exp[-j(\omega U + \arctg \left(\frac{\omega}{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)} \right))], \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Первые два сомножителя формулы (3) представляют собой модуль спектральной плотности, знание которого позволяет на основании теоремы Винера-Хинчина определить корреляционную функцию моделируемого процесса:

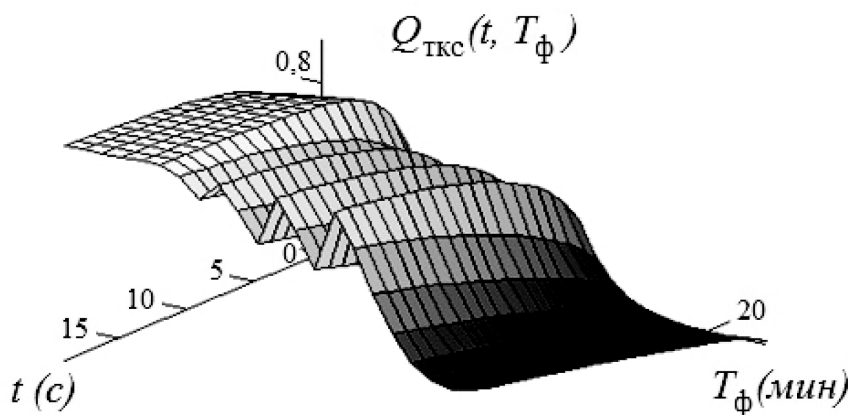


Рис. 1. График функции $Q_{\text{ткс}}(t, T_\Phi)$

$$R(\tau, T_\Phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)^{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}}{(M_{\text{ткс}}(T_\Phi)^2 + \omega^2)^{\frac{A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{2}}} \right|^2 \exp[-j\omega\tau] d\omega =$$

$$= 2^{-A_{\text{ткс}}(T_\Phi)-1/2} \frac{\sqrt{\pi}}{\pi} \Gamma[1 - A_{\text{ткс}}(T_\Phi)] \left(\frac{M_{\text{ткс}}(T_\Phi)}{\tau} \right)^{-A_{\text{ткс}}(T_\Phi)+1/2} \times$$

$$\times [H_{1/2-A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}\{\tau M_{\text{ткс}}(T_\Phi)\} - Y_{1/2-A_{\text{ткс}}(T_\Phi)}\{\tau M_{\text{ткс}}(T_\Phi)\}], \quad (4)$$

где: $\Gamma[1 - A_{\text{ткс}}(T_\Phi)]$ – значение гамма-функции в точке $[1 - A_{\text{ткс}}(T_\Phi)]$;

$H_\nu\{z\} = \frac{2}{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+3/2)} \left(\frac{z}{2}\right)^{\nu+1} {}_1F_2(1; 3/2, \nu+3/2; -z^2/4)$ – функция Струве;

$Y_\nu(z) = \frac{\cos(\nu\pi)J_\nu(z) - J_{-\nu}(z)}{\sin(\nu\pi)}$ – функция Неймана (функция Бесселя 2-го рода);

$J_\nu(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \frac{{}_0F_1(\nu+1; -z^2/2)}{\Gamma(\nu+1)}$ – функция Бесселя 1-го рода;

${}_1F_2(1; 3/2, \nu+3/2; -z^2/4)$; ${}_0F_1(\nu+1; -z^2/4)$ – обобщенная и вырожденная гипергеометрические функции, соответственно;

ν, z – параметры для определения табличных значений вышеуказанных функций.

Зависимости модуля спектральной плотности и коэффициента корреляции, определяемого как

$$r(\tau, T_\Phi) = \frac{R(\tau, T_\Phi)}{R(0, T_\Phi)}, \quad (5)$$

от времени функционирования сети связи в течение технологического процесса представлены на рис. 2, 3.

В свою очередь, интегрирование формулы (5) по τ с бесконечным верхним пределом позволяет определить зависимость интервала корреляции случайного процесса от времени T_Φ , т.е.

$$\tau(T_\Phi) = \frac{1}{R(0, T_\Phi)} \int_0^\infty R(\tau, T_\Phi) d\tau, \quad (6)$$

а среднеквадратичное отклонение случайного процесса доставки сообщений до адресатов в моменты времени T_Φ определяется значениями функции корреляции в нуле

$$\sigma(T_\Phi) = \sqrt{D[X(T_\Phi)]} = \sqrt{R(0, T_\Phi)}, \quad (7)$$

где $D[X(T_\Phi)]$ – дисперсия процесса изменения вероятности своевременной доставки категоричных сообщений.

Таким образом, нам известны: математическое ожидание, дисперсия, спектральная плотность, корреляционная функция и интервал корреляции исследуемого процесса, который является нормальным (гауссовым) [1]. А значит с использованием найденных параметров можно определить и двухмерную плотность распределения этого процесса

$$\vartheta(p_1, p_2, \tau, T_\Phi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2(T_\Phi)\sqrt{1-r^2(\tau, T_\Phi)}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{[p_1 - Q_{\text{ткс}}(T_\Phi^*, T_\Phi)]^2 - r(\tau, T_\Phi)[p_1 - Q_{\text{ткс}}(T_\Phi^*, T_\Phi)][p_2 - Q_{\text{ткс}}(T_\Phi^*, T_\Phi)]}{2\sigma(T_\Phi)[1-r(\tau, T_\Phi)]} + \right.$$

$$\left. + \frac{[p_2 - Q_{\text{ткс}}(T_\Phi^*, T_\Phi)]^2}{2\sigma(T_\Phi)[1-r(\tau, T_\Phi)]} \right\}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) позволяет определить и характеристики случайной величины интервалов времени, в течение которых процесс доведения сообщений в ТКС будет соответствовать предъявляемым требованиям:

1. Вероятность того, что в любой момент времени значение обобщенного показателя эффективности функционирования ТКС будет соответствовать предъявляемым на уровне P_3 требованиям, равна

$$P[X(T_\Phi) \geq P_3] = \Phi \left\{ \frac{Q_{\text{ткс}}[T_\Phi, T_\Phi] - P_3}{\sqrt{R(0, T_\Phi)}} \right\} \quad (9)$$

2. Средняя длительность интервала времени, в течение которого процесс передачи сообщений по ТКС будет соответствовать требованиям

$$\overline{T_{\text{и}}} = \pi \frac{P[X(T_\Phi) \geq P_3]}{\sqrt{R''(0, T_\Phi)} \exp \left\{ -\frac{[Q_{\text{ткс}}(T_\Phi, T_\Phi) - P_3]^2}{2\sqrt{R(0, T_\Phi)}} \right\}}. \quad (10)$$

Понятно, что указанные расчеты производятся на этапе планирования связи для каждого из видов технологического процесса управления перевозками. Это обеспечивает получение математического ожидания процесса изменения обобщенного показателя и возможность предварительной оценки эффективности функционирования ТКС.

С началом деструктивных воздействий нарушителя осуществляется привязка полученных результатов к конкретному моменту времени, контроль сроков доведения информации управления, прогнозирование значений обобщенного показателя в следующий момент времени, а также уточняются структура ТКС в соответствии с изменяющейся обстановкой.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В условиях деструктивного воздействия нарушителя на ТКС путем проведения теракта и преднамеренными помехами процесс доставки сообщений является непрерывным нестационарным гауссовым процессом. Его непрерывность обуславливается непрерывностью корреляционной функции

$$\lim_{t \rightarrow 0} |R[\tau - t, T_\Phi] - R[\tau, T_\Phi]| = 0.$$

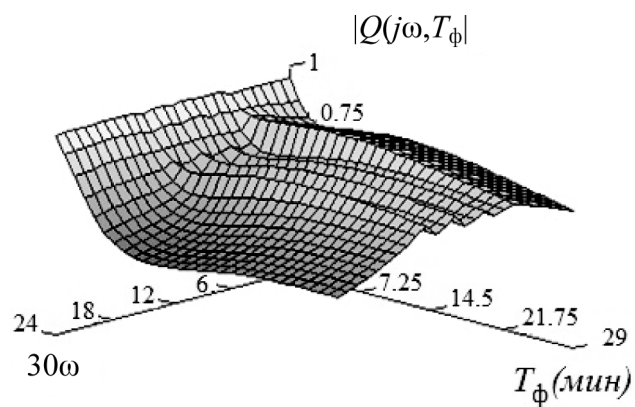


Рис. 2. График зависимости $|Q(j\omega, T_\phi)|$

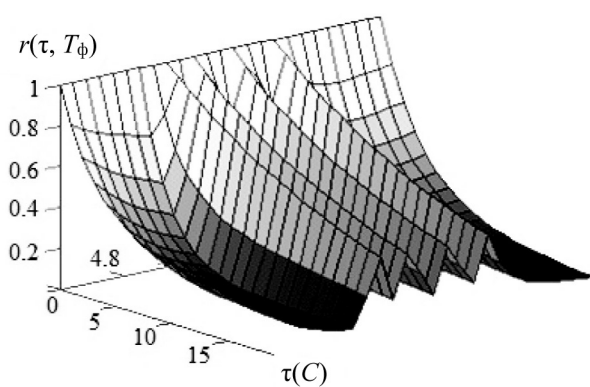


Рис. 3. График зависимости $r(\tau, T_\phi)$

2. Модуль спектральной плотности процесса доставки сообщений по ТКС, функционирующей в условиях воздействия нарушителя на частотах смены состояний, равных

$$f(T_{\phi}) = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{t_{\text{рвн}}(T_{\phi}) + Tn_{\text{ткс}}(T_{\phi})}{2\pi Tn_{\text{ткс}}^2(T_{\phi})},$$

где $t_{\text{рвн}}(T_{\phi})$ – среднее время реакции нарушителя по оказанию воздействия, имеет локальный максимум. Так, например, при $T_{\phi} = 15$ мин. частота локального максимума $\omega_{\text{л}}$ примерно соответствует 0,403 рад/с (рис. 2). При этом под состоянием ТКС понимается достигаемая вероятность успешной доставки сообщений. Максимальное значение вероятности успешной доставки сообщений ограничивается живучестью элементов ТКС.

3. Вид нормированной функции корреляции (коэффициента корреляции) изменяется в течение периода воздействия нарушителя и имеет ярко выраженную неравномерность с началом воздействия нарушителя на ТКС. Первый всплеск коэффициента корреляции соответствует времени начала конфликта с нарушителем.

4. Дисперсия случайного процесса доставки сообщений также неравномерна и принимает максимальные значения с началом ведения конфликта. Интересным является тот факт, что при отсутствии воздействия и при функционировании в условиях преднамеренных помех (без реализации мер защиты) значения дисперсии изменяются по закону, близкому к линейному. При этом до начала конфликта значение σ^2 медленно возрастает, что связано с неопределенностью времени начала воздействия, а при исчерпывании защитного ресурса σ^2 уменьшается. Это объясняется снижением степени неопределенности условий функционирования фрагмента ТКС, а значит, и в реализации отдельных подпроцессов единого процесса доставки. Линейность изменения дисперсии указывает на наличие линейной зависимости между соседними значениями обобщенного показателя эффективности. Следовательно, имеется возможность выявления интервалов квазистационарности процесса доставки сообщений.

5. Мерой для расчета интервала квазистационарности могут служить минимальные значения интервала корреляции, составляющие, согласно результатам проведенных расчетов, единицы секунд. Это позволит решать задачи прогнозирования значений процесса доставки сообщений в следующий момент времени (через интервал корреляции) и расчета устойчивости ТКС.

6. Разработанная для определения характеристик случайного процесса $X(T_{\phi})$ модель позволяет проследить динамику ведения конфликта ТКС или ее элемента с системой деструктивного воздействия нарушителя, чувствительна к изменению исходных данных, позволяет получать непротиворечивые логике результаты и работоспособна. Для использования модели в процессе

функционирования ТКС необходима корректировка значений входных параметров в соответствии с накопленными на текущий момент времени статистическими данными и выявленным сценарием воздействия нарушителя.

Литература

1. Привалов, А. А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ / А.А. Привалов. – СПб: ВМА, 2000 г. – 166 с.
2. Чернецкий, В. И. Математическое моделирование стохастических систем / В.И. Чернецкий. – Петрозаводск: ПГУ, 1994 г. – 488 с.
3. Привалов, А. А. Подход к учету нестационарности условий функционирования телекоммуникационной сети ОАО «РЖД» / А.А. Привалов, А.П. Вандич. – Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 3 (36). – С. 55–61.