

УДК 681.3.01

А. А. Привалов, А. П. Вандич

Петербургский государственный университет путей сообщения

ПОДХОД К УЧЕТУ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ОАО РЖД

Рассматривается способ определения коэффициента исправного действия телекоммуникационной сети (ТКС) ОАО РЖД как функции времени с использованием элементов теории случайных импульсных потоков. Применяя указанный подход и результаты прогнозирования возникновения нештатных ситуаций, можно определить значение соответствующего коэффициента в заданный момент времени с учетом сложившейся обстановки по связи и влияющих факторов. С помощью коэффициента исправного действия можно решать задачу определения требуемого времени восстановления работоспособности ТКС ОАО РЖД в заданных условиях для выработки обоснованных организационно-технических решений по повышению эффективности управления этой сетью.

поток импульсов, независимые потоки, совпадение импульсов.

Введение

Одной из особенностей железнодорожной отрасли является то, что продукция железнодорожного транспорта – это перевозки, т. е. результат пространственного перемещения пассажиров и грузов. Эта продукция производится и потребляется одновременно. Люди и товары едут вместе со средствами транспорта. Ее нельзя заготовить впрок, чтобы реализовать в период неожиданного сбоя [1].

Поэтому внезапное возникновение нештатной ситуации, обусловленной воздействием внешних факторов, может привести к невозможности осуществления перевозочного процесса, в том числе к нарушению предоставления услуг служб электросвязи. Особенно остро данная проблема проявляется в том случае, когда из-за отказов систем связи блокируется возможность выполнения спасательных операций.

Под нестационарностью условий функционирования ТКС ОАО РЖД будем понимать нерегулируемое, внезапное изменение параметров окружающей среды, оказывающих существенное влияние на ее качественные характеристики. Следует учитывать, что возможность возникновения ситуаций, повлекших отказы в предоставлении услуг

служб электросвязи, обусловлена конечной надежностью оборудования и линий связи, а также воздействием внешних факторов. Виды, число и глубина воздействия внешних факторов определяются физико-географическими, экономическими, социальными и другими условиями. В качестве воздействий, обусловленных влиянием внешних факторов, могут быть рассмотрены землетрясения, наводнения, оползни, ураганы, пожары, техногенные катастрофы, действия злоумышленников и др.

Указанные воздействия в зависимости от реализованных на объектах связи технических мер будут оказывать на них влияние различной глубины. Поэтому в качестве модели воздействий рассматривается совокупность независимых импульсных потоков, длительность, амплитуда и период следования импульсов в которых характеризуют стойкость оборудования сети к воздействию того или иного внешнего фактора, длительность и периодичность по каждому виду воздействия. Понятно, что при полном или частичном совпадении импульсов нескольких потоков глубина воздействия будет увеличиваться, а результирующий коэффициент исправного действия $K_{и}$ – снижаться.

Такой подход к анализу воздействия на сетевые элементы позволяет определять коэффициент исправного действия как функцию времени $K_{и}(t)$, значение которой зависит от текущих условий функционирования ТКС ОАО РЖД. Кроме того, это позволит прогнозировать отказы сетевых элементов и заблаговременно предпринимать меры по обеспечению работоспособности ТКС ОАО РЖД в чрезвычайных условиях. Рассмотрение коэффициента исправного действия как функции времени позволяет формировать требования по длительности цикла управления в соответствии с условиями, в которых функционирует ТКС ОАО РЖД, и требования по качеству предоставляемых услуг и эффективности информационного обмена.

1 Модель периодического воздействия одного вида на телекоммуникационную сеть ОАО РЖД

Положим, что на функционирование ТКС ОАО РЖД оказывает влияние i -е воздействие, $i = \overline{1, N}$, где N – число видов воздействия. Данное воздействие представим потоком импульсов $X^*(t)$, являющимся математической моделью прерывных во времени физических процессов. Длительности нарастания амплитуды импульса ставится в соответствие продолжительность воздействия, а длительности ниспадения, включая нулевую амплитуду – время, в течение которого воздействие отсутствует и осуществляется восстановление поврежденных элементов. Полагается, что с течением времени деструктивное влияние воздействия возрастает. Мгновенное значение амплитуды импульса определяется вероятностью нарушения работоспособности

элементов ТКС ОАО РЖД при заданном воздействии.

Будем рассматривать поток взаимно неперекрывающихся во времени импульсов, когда

$$T_i^* = t_i^* - t_{i-1}^* > \tau_{i-1}^*, \quad (1)$$

где t_i^* и τ_i^* – момент появления и длительность i -го импульса (рис. 1).

На рисунке 1 пунктиром показаны прямоугольные импульсы, соответствующие длительности i -го воздействия. Их амплитуда и длительность могут быть определены с использованием прогнозируемых данных, получаемых от ситуационного центра МЧС. Конкретная форма импульса, показанного сплошной линией, определяется с применением основных моделей [2], в соответствии с которыми задается функция распределения времени наработки на отказ в заданных условиях.

После окончания i -го воздействия производится восстановление работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД в соответствии с действующими регламентными документами [3]. Максимальная амплитуда импульсов, показанных на рисунке 1 сплошными линиями, определяется стойкостью оборудования сетевых элементов к воздействию конкретного внешнего фактора, длительностью и периодичностью по каждому виду воздействия.

Предположим, что i -е воздействие образует стационарный (в широком смысле) импульсный поток с математическим ожиданием длительности (T_i^*) интервала между моментами появления смежных импульсов

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} T \omega(T) dT \quad (2)$$

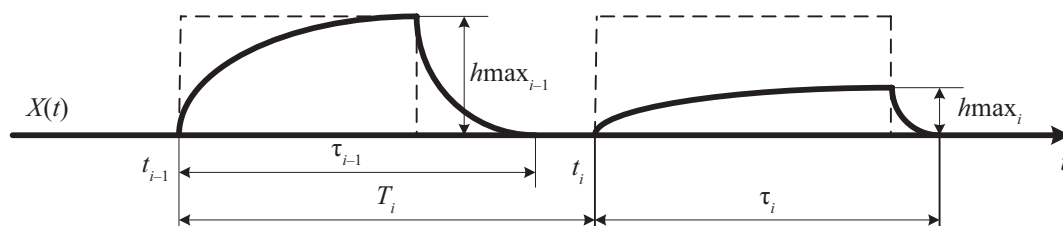


Рис. 1. Вариант реализации случайного потока i -го воздействия

и математическим ожиданием длительности (τ_i^*) импульса

$$\bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau \alpha(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\omega(T)$ – плотность вероятности случайной величины T_i^* , $\alpha(\tau)$ – плотность вероятности случайной величины τ_i^* .

При этом произвольно взятый момент времени $t \rightarrow \infty$ в пределах основания импульса находится с вероятностью

$$p = \mu \bar{\tau}, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{1}{T}$ – средняя частота следования импульсов.

Значение функции $X^*(\xi)$ в момент времени $t = \xi$ представляет собой случайную величину, плотность вероятности которой

$$W(t) = \begin{cases} (1-p)g(t) & \text{при } t = 0; \\ pg(t) & \text{при } t \neq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $g(t)$ – плотность распределения вероятностей амплитуды h_i^* импульса.

Интегрируя функцию (5) с переменным верхним пределом в предположении, что функция распределения времени наработки на отказ и восстановления после отказа описывается экспоненциальным распределением, можно определить функцию $P_i(t)$ как вероятность нарушения работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД при заданном воздействии:

$$P_i(t) = \int_0^t W(t) dt = \begin{cases} 0, & t < t_1; \\ 1 - e^{-a(t-t_1)}, & t_1 \leq t < t_2; \\ \left[\frac{1 - e^{-a(t-t_1)}}{e^{-dt_2}} \right] e^{-dt}, & t \geq t_2. \end{cases} \quad (6)$$

В выражении (6) параметр a определяет интенсивность отказа, а параметр d – интенсивность восстановления работоспособности ТКС ОАО РЖД. Фактически функция

$P_i(t)$ характеризует коэффициент простоя ТКС ОАО РЖД $K_n(t)$, который связан с коэффициентом исправного действия выражением $K_n(t) = 1 - K_n(t)$.

Амплитудно-временные параметры потока $X^*(t)$ в общем случае могут быть зависимыми. В соответствии с этим поток $X^*(t)$ задан, если задана функция n -мерного распределения $W(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ системы случайных величин $Y_k^* = X_k^*(\xi_k)$, отсчитанных в моменты времени ξ_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$). В зависимости от условий конкретной задачи число n может быть сколь угодно большим. Кроме того, поток $X^*(t)$ можно задать плотностью вероятности $W(t_1, t_2, \dots, t_n, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, h_1, h_2, \dots, h_n)$ моментов времени появления (t_i^*), длительностей (τ_i^*) и амплитуд (h_i^*) импульсов (см. рис. 1). Данная форма задания потока по его амплитудно-временным параметрам иногда оказывается более удобной для производства практических расчетов.

2 Модель периодического воздействия нескольких видов на телекоммуникационную сеть ОАО РЖД

Первая работа, посвященная проблеме совпадений, появилась в 1953 г., где и была сформулирована задача о совпадении импульсов заданного числа потоков [4]. При этом рассматривались потоки прямоугольных импульсов с амплитудой, равной 1.

В отличие от [4], рассмотрим процесс совпадения импульсов ряда стационарных (в широком смысле) и независимых потоков $X_s^*(t)$ ($s = 1, 2, 3, \dots, n$) (рис. 2). Каждый поток характеризует воздействие на элементы ТКС ОАО РЖД одного из дестабилизирующих факторов (пожар, техногенная катастрофа, действия злоумышленников и пр.). Потоки удовлетворяют требованию (1). Мгновенное значение амплитуды каждого из импульсов потоков определяется вероятностью нарушения работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД при заданном воздействии. Максимальная амплитуда импульса равна 1.

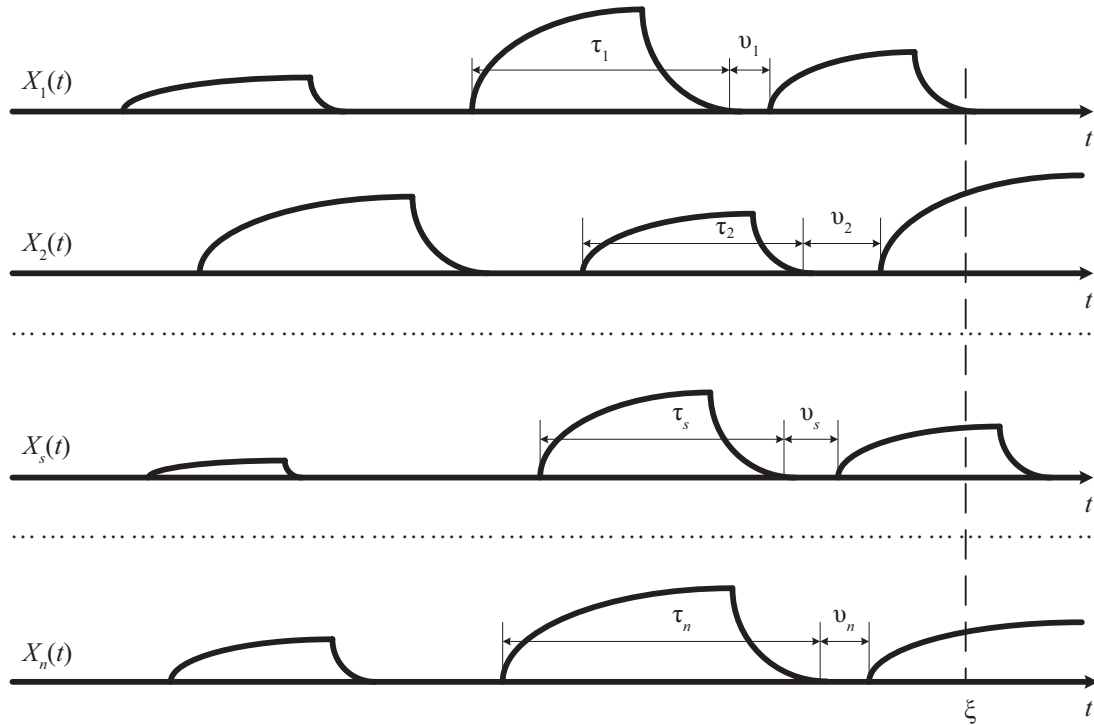


Рис. 2. Совпадение импульсов ряда потоков

При этом мы будем полагать, что математические ожидания длительностей импульсов и пауз каждого потока существуют и равны соответственно

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau}_s &= \int_0^{\infty} \tau \alpha_s(\tau) d\tau \\ \bar{\vartheta}_s &= \int_0^{\infty} \vartheta \beta_s(\vartheta) d\vartheta \end{aligned} \right\}, \quad s = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

где $\alpha_s(\tau)$ и $\beta_s(\vartheta)$ – плотности вероятностей длительностей импульса и пауз s -го потока.

В соответствии с этим средняя частота следования импульсов стационарного потока $X^*(t)$

$$\bar{\mu}_s = \frac{1}{\bar{\tau}_s + \bar{\vartheta}_s}. \quad (8)$$

Так как потоки $X_s^*(t)$ независимы, то совместное распределение случайных величин $X_s^* = X_s^*(t_s)$ согласно (5) удовлетворяет соотношению

$$W_n(t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{s=1}^n \omega_s(t_s), \quad (9)$$

где

$$\omega_s(t) = \begin{cases} (1 - \bar{\mu}_s \bar{\tau}_s) g(t) & \text{при } t = 0; \\ \bar{\mu}_s \bar{\tau}_s g(t-1) & \text{при } t = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Интегрируя $\omega_s(t)$ с переменным верхним пределом, можно для каждого из потоков определить вероятность нарушения работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД при заданном воздействии:

$$P_s(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt. \quad (11)$$

Совпадение двух и более импульсов условимся считать состоявшимся, если их длительности перекрываются хотя бы частично. Импульс, образованный в результате перекрытия во времени заданного числа импульсов, будем называть импульсом совпадения.

Ввиду рассмотрения независимых потоков амплитуда импульса совпадения определяется как вероятность одновременного наступления n независимых событий по числу совпавших импульсов. При этом каждому событию, характеризующему возникнове-

ние нештатной ситуации, ставится в соответствие вероятность $P_s(t)$ нарушения работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД. Для n событий соответствующая вероятность определяется выражением [5]:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P_i(t)P_j(t) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n P_i(t)P_j(t)P_k(t) - \dots + (-1)^{n-1} \cdot P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t). \quad (12)$$

Процесс совпадения импульсов характеризуется временными параметрами. Если поток $X_s^*(t)$ является стационарным и удовлетворяет требованию (1), то в произвольно взятый момент времени ξ при $t \rightarrow \infty$ равенство $X_s(\xi^*) \neq 0$ выполняется с вероятностью

$$p_s = \bar{\mu}_s \bar{\tau}_s, \quad (13)$$

где $\bar{\mu}_s$ и $\bar{\tau}_s$ – средняя частота следования и математическое ожидание длительности импульсов s -го потока.

Следует учитывать, что возможно порождение одного потока импульсов другим. Если происходит крупная авария или стихийное бедствие, это может привести к возникновению дополнительных деструктивных факторов (пожара, взрыва и др.). В этом случае для нахождения $P(t)$ необходимо применять теорему гипотез [6].

Положим, что на ТКС ОАО РЖД оказывают влияние три вида воздействия: действия злоумышленника (поток 1), возникновение оползня (поток 2), воздействие повышенной температуры в летний период (поток 3).

Максимальные интенсивности отказов и восстановлений для каждого потока известны и указаны в таблице. Полагая, что функция распределения времени наработки на отказ и восстановления после отказа описывается экспоненциальным распределением с параметрами, приведенными в таблице, зададим функцию $P_i(t)$ для каждого вида воздействия с использованием формулы (6). Функцию $P(t)$, как вероятность нарушения работоспособности элементов ТКС ОАО РЖД при трех заданных видах воздействия, определим с использованием выражения (12) для случая $n = 3$. При этом функция $P(t)$, характеризующая коэффициент простоя ТКС ОАО РЖД, связана с коэффициентом исправного действия выражением $K_{и}(t) = 1 - P(t)$.

С помощью определенного таким образом коэффициента исправного действия $K_{и}(t)$ можно вычислить требуемое время восстановления работоспособного состояния ТКС ОАО РЖД $T_{тв}$ как функцию времени, определяемую в зависимости от условий функционирования [7]:

$$T_{тв}(t) = (T_{\text{средн}} - \bar{t}_{\text{пер}}) \cdot \frac{K_{и}(t)}{1 - K_{и}(t)} - \bar{t}_{\text{пер}}, \quad (14)$$

при $\bar{t}_{\text{пер}} < T_{\text{средн}} \cdot K_{и}(t)$, $t \geq 0$,

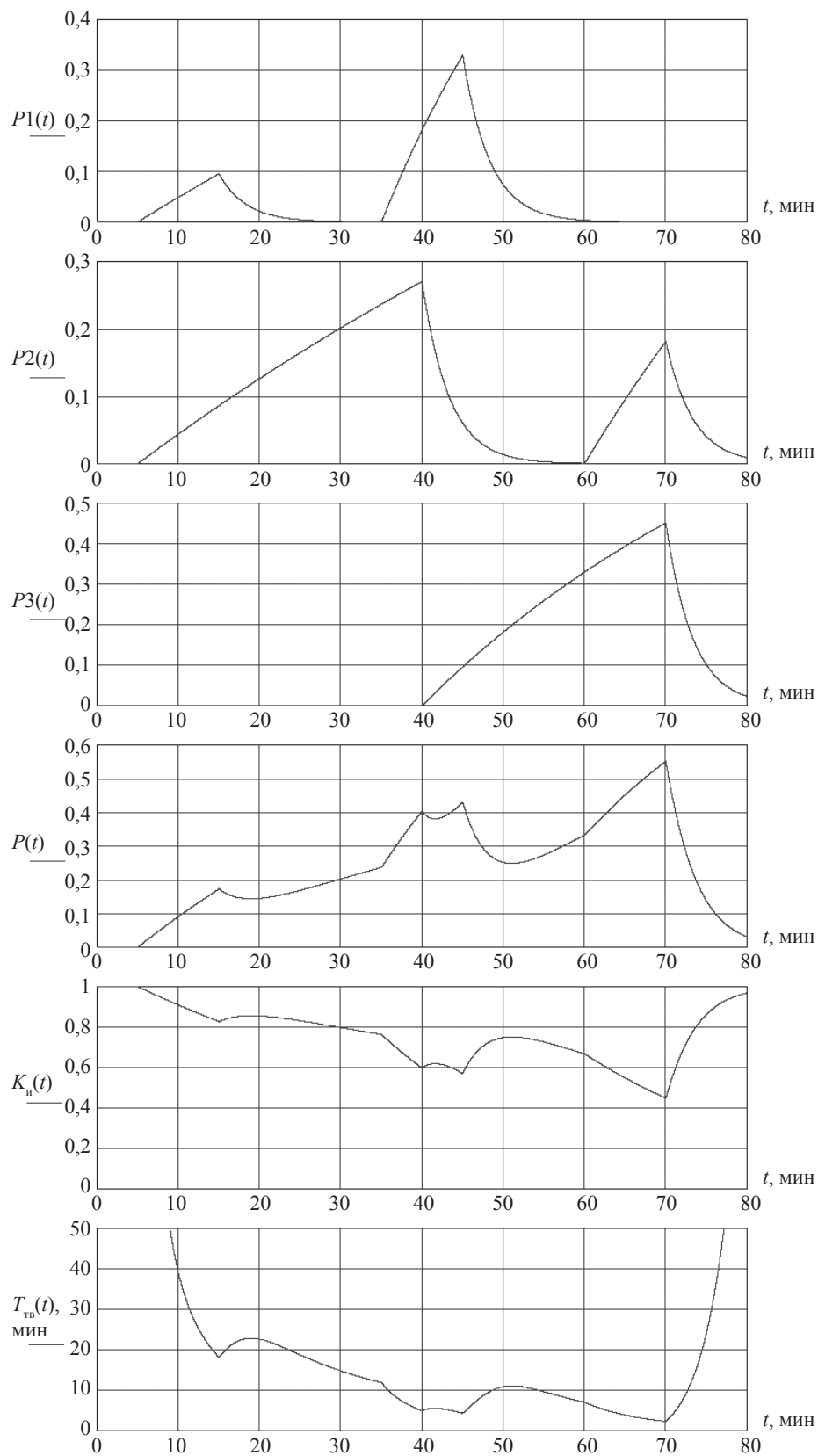
где $T_{\text{средн}}$ – заданное время доставки сообщения с учетом сложившейся обстановки по связи; $\bar{t}_{\text{пер}}$ – время передачи сообщения, определяемое отношением объема сообщения к скорости передачи.

На рисунке 3 приведен пример построения функций $P(t)$, $K_{и}(t)$ и $T_{тв}(t)$ при $T_{\text{средн}} = 5$ мин, $\bar{t}_{\text{пер}} = 1$ мин.

Найденное в текущий момент времени значение $T_{тв}$ позволяет вырабатывать обоснованные организационно-технические ре-

ТАБЛИЦА. Интенсивности отказов и восстановлений

Вид воздействия	Интенсивность отказа, мин ⁻¹	Интенсивность восстановления, мин ⁻¹
Поток 1	0,04	0,3
Поток 2	0,02	0,3
Поток 3	0,02	0,3

Рис. 3. Построение функций $P(t)$, $K_n(t)$, $T_{тв}(t)$

шения по обеспечению заданной эффективности функционирования ТКС ОАО РЖД в реальных условиях.

Заключение

Предлагаемый подход к учету нестационарности условий функционирования ТКС ОАО РЖД требует знания вероятностно-временных характеристик рассматриваемых импульсных потоков. Временные параметры потоков могут быть определены с помощью прогноза. Вопросами прогнозирования наступления нештатных ситуаций, влияющих на работу ТКС ОАО РЖД и реализацию перевозочного процесса в целом, занимается ситуационный центр МЧС, кроме того, он осуществляет выработку решений по устранению возникших ЧС. Для каждой нештатной ситуации можно определить также вероятность сохранения работоспособного состояния радиоэлектронных систем с помощью методик, указанных в ГОСТах (по виброустойчивости, влагостойкости, огнестойкости и др.).

Существующая в ОАО РЖД единая система мониторинга и администрирования (ЕСМА) хозяйства связи не имеет непосредственного взаимодействия с ситуационным центром МЧС, что затрудняет определение требуемого значения длительности цикла управления ТКС ОАО РЖД в текущий момент времени на основе данных о коэффициенте исправного действия $K_{\text{и}}(t)$ [7]. Это, в свою очередь, усложняет принятие обоснованных организационно-технических решений, направленных на сокращение длительности цикла управления ТКС ОАО РЖД при возникновении нештатной ситуации. Таким образом, организация взаимодействия ЕСМА с ситуационным центром МЧС по-

зволит оперативно использовать данные об изменении условий функционирования ТКС ОАО РЖД в зависимости от внешних факторов и осуществлять оптимальные управляющие воздействия на ТКС ОАО РЖД.

Библиографический список

1. **Значение** железнодорожного транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://scbist.com/wiki/8764-znachenie-zheleznodorozhnogo-transporta.html> (дата обращения 17.05.2013).
2. **Надежность** технических систем : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; ред. И. А. Ушаков. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с., ил.
3. **ОАО РЖД**. Регламент работы центра управления технологической сетью связи, центров технического управления и центров технического обслуживания (ЦУТСС – ЦТУ – ЦТО). Т. II. «Стратегия 1: управление инцидентами». Версия 1.2 от 9 апреля 2009 г.
4. **Элементы** теории случайных импульсных потоков / Н. М. Седакин. – М. : Советское радио, 1965. – 264 с.
5. **Справочник** по вероятностным расчетам / Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. – М. : Воениздат, 1966. – 408 с.
6. **Теория** вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с., ил.
7. **Об оценке** длительности цикла управления телекоммуникационной сетью ОАО РЖД / А. А. Привалов, А. П. Вандич, Д. А. Полторацкий // Материалы конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов». НПК «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций». 29 ноября 2012 года, Санкт-Петербург. – СПб. : ООО «Pif.com», 2012. – С. 92–95.