

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭРЛАНГА

В. А. Острейковский, А. С. Павлов

Введение

В теории безопасности сложных критически важных систем одним из критериев используют техногенный риск. Для оценки риска, как правило, используется теоретико-вероятностный метод, при котором риск R ,

$$R = H\{QC\}, \quad (1)$$

оценивается произведением двух случайных величин: Q – вероятность исходного события отказов, аварий и катастроф и C – ущерб (последствий) свершения этих исходных событий. Оператор H характеризует вид зависимости случайных величин (или случайных процессов) Q и C .

В работах [1–3] для оценки техногенного риска систематически изложено количественное оценивание риска при использовании аппроксимации распределений случайных величин Q и C законами Гаусса, Вейбула, Рэлея, Стюденса, логарифмически нормального и экспоненциального. Вместе с тем известно, что потоки исходных событий аварий и катастроф и ущерба от них сложных критически важных систем (СКВС), как правило, отличаются от простейших потоков событий, являются стохастическими зависимыми, и следовательно, возникает необходимость рассматривать потоки редких событий с ограниченным последствием. В этом случае удобной математической моделью являются потоки Эрланга.

Целью настоящей статьи является получение и анализ математических моделей оценивания техногенного риска с использованием распределения Эрланга.

1. Характеристика распределения Эрланга

Распределением Эрланга k -го порядка называется распределение, описывающее непрерывную случайную величину x , принимающую положительные значения в интервале $(0; +\infty)$ и представляющую собой сумму k независимых случайных величин, распределенных по одному и тому же экспоненциальному закону с параметром λ . Функция и плотность распределения Эрланга k -го порядка имеют вид [4, 5]:

$$f_k(x) = 1 - e^{-\lambda x} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!}, \quad (2)$$

$$f_k(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda (\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda x}, \quad (3)$$

где λ и k – положительные параметры распределения ($\lambda \geq 0$; $k = 1, 2, \dots, K$); $x \geq 0$ – непрерывная случайная величина.

Иногда используется параметр θ , который связан с параметром λ соотношением

$$\lambda = \frac{1}{\theta}.$$

Числовые характеристики распределения Эрланга:

- среднее $M = \frac{k}{\lambda}$;
- дисперсия $D = \frac{k}{\lambda^2}$.

Нормированное распределение Эрланга. Нормированное распределение Эрланга представляет собой распределение суммы k независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону с параметром $k\lambda$, зависящим от k . Другими словами, суммируются k экспоненциально распределенных случайных величин, каждая из которых имеет математическое ожидание в k раз меньшее, чем исходное математическое ожидание реального распределения, что приводит к независимости математического ожидания нормированного распределения Эрланга от параметра k . Математические выражения для функции и плотности нормированного распределения Эрланга можно получить из (2), (3), заменив параметр λ на $k\lambda$:

$$F_k(x) = 1 - e^{-R\lambda x} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k\lambda x)^i}{i!}, \quad (4)$$

$$f_k(x) = \frac{kx(k\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-R\lambda x}. \quad (5)$$

Числовые характеристики нормированного распределения Эрланга:

- среднее $M = \frac{1}{\lambda}$;
- дисперсия $D = \frac{1}{k\lambda^2}$.

Гиперэрланговское распределение. Гиперэрланговское распределение представляет собой аддитивную смесь нормированных распределений Эрланга и является наиболее общим распределением неотрицательных непрерывных случайных величин, поскольку имеет коэффициент вариации в интервале от 0 до ∞ . Составляющими гиперэрланговского распределения являются нормированные распределения Эрланга.

Плотность гиперэрланговского распределения:

$$f_R(r) = \sum_{i=1}^n q_i \frac{(k_i \lambda_i x)^{k_i-1}}{(k_i-1)!} e^{-k_i \lambda_i x}. \quad (6)$$

Числовые характеристики гиперэрланговского распределения:

- среднее $M = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\lambda_i}$;
- дисперсия $D = \sum_{i=1}^n q_i \frac{k_i+1}{k_i \lambda_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\lambda_i} \right)^2$;

$$\sum_{i=1}^n q_i = 1, \lambda_i > 0.$$

Обобщенное распределение Эрланга применяется при создании как чисто математических, так и имитационных моделей. Его удобно применять вместо нормального распределения, если модель можно свести к чисто математической задаче, применяя аппарат марковских или полумарковских процессов либо используя метод Кендалла. Однако такие модели далеко не всегда адекватны реальным процессам.

2. Аналитические зависимости для оценки показателей техногенного риска при независимых случайных величинах вероятностей исходных событий и ущерба

В [2, 5–7] показано, что функция распределения случайной величины риска R имеет вид

$$F_R(r) = P(R < r) = P(R < q, c) = \int_W f_{QC}(q, c) dq dc = \int_0^{1/r/q} \int_0 f_{QC}(q, c) dq dc, \quad (7)$$

а плотность распределения $f_R(r)$ равна

$$f_R(r) = \int_0^1 \frac{1}{q} f\left(q, \frac{r}{q}\right) dq. \quad (8)$$

Область интегрирования W подчинена условиям

$$W: \begin{cases} 0 \leq q \leq 1; \\ 0 \leq c \leq \frac{r}{q}. \end{cases}$$

Зная вид законов распределения и значения их параметров $f_Q(q)$ и $f_C(c)$, можно определить вид и значение параметров функции распределения $F_R(r)$ и плотности $f_R(r)$ техногенного риска. Формулы (7) и (8) при независимых величинах вероятности исходных событий Q и ущерба видоизменяются следующим образом:

$$F_R(r) = \int_0^{1/r/q} \int_0 f_Q(q) f_C(c) dq dc, \quad (9)$$

$$f_R(r) = \int_0^1 \frac{1}{q} f_Q(q) f_C\left(\frac{r}{q}\right) dq. \quad (10)$$

Получим аналитическое выражение для функции плотности распределения риска в случае, если вероятность исходных событий Q и ущерб имеют одинаковое распределение Эрланга. Согласно формулам (9) и (10) нетрудно получить аналитические выражения для количественного оценивания $F_R(r)$ и $f_R(r)$ для распределения Эрланга:

$$\begin{aligned} f_R(r) &= \int_0^1 \frac{1}{q} f_Q(q) f_C\left(\frac{r}{q}\right) dq = \int_0^1 \frac{1}{q} \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_c \left(\lambda_c \frac{r}{q}\right)^{k_c-1} e^{-\lambda_c \frac{r}{q}}}{(k_c-1)!} dq = \\ &= \frac{\lambda_q^{k_q} \lambda_c^{k_c}}{(k_q-1)!(k_c-1)!} \int_0^1 \frac{1}{q} q^{k_q-1} \left(\frac{r}{q}\right)^{k_c-1} e^{-\lambda_q q} e^{-\lambda_c \frac{r}{q}} dq = \frac{\lambda_q^{k_q} \lambda_c^{k_c} r^{k_c-1}}{(k_q-1)!(k_c-1)!} \int_0^1 q^{k_q-k_c-1} e^{-\lambda_q q - \lambda_c \frac{r}{q}} dq; \end{aligned} \quad (11)$$

$$F_R(r) = \int_0^1 \int_0^c \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_c (\lambda_c c)^{k_c-1} e^{-\lambda_c c}}{(k_c-1)!} dc dq = \frac{\lambda_q^{k_q} \lambda_c^{k_c}}{(k_q-1)!(k_c-1)!} \int_0^1 \int_0^c q^{k_q-1} c^{k_c-1} e^{-\lambda_q q - \lambda_c c} dc dq. \quad (12)$$

Для гиперэрланговского распределения плотность распределения риска имеет вид

$$f_R(r) = \int_0^1 \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n q_i \frac{k_{qi} \lambda_{qi} (\lambda_{qi} q)^{k_{qi}-1}}{(k_{qi}-1)!} e^{-k_{qi} \lambda_{qi} q} \sum_{i=1}^n q_i \frac{k_{ci} \lambda_{ci} \left(\lambda_{ci} \frac{r}{q}\right)^{k_{ci}-1}}{(k_{ci}-1)!} e^{-k_{ci} \lambda_{ci} \frac{r}{q}} dq. \quad (13)$$

3. Аналитические зависимости для оценки показателей техногенного риска при зависимых случайных величинах вероятностей исходных событий и ущерба

Для получения аналитических зависимостей $F_R(r)$ и $f_R(r)$ в случае зависимых между собой вероятностей исходных аварий и катастроф и ущерба от них рассмотрим два случая.

Случай 1. Корреляция между Q и C линейна:

$$C = \alpha(q) = k_0 - k_1 q. \quad (14)$$

Подробный вывод формул для функции и плотности распределения риска для зависимых между собой Q и C приведен в [2]:

$$F_R\left(q, \frac{r}{q}\right) = \frac{1}{k_1} \int_0^{1/r/q} \int_0^1 f_Q\left(\frac{k_0 - r}{k_1} \frac{r}{q}\right) f_Q(q) d\frac{r}{q} dq, k \neq 0; \quad (15)$$

$$f_R\left(q, \frac{r}{q}\right) = \frac{1}{k_1} \int_0^1 \frac{1}{q} f_Q\left(\frac{k_0 - r}{k_1} \frac{r}{q}\right) f_Q(q) dq, k_1 \neq 0. \quad (16)$$

Получим аналитические выражения для функции и плотности распределения риска в случае, если вероятность и ущерб имеют одинаковое распределение Эрланга. Подставим выражения в формулы (7), (8), описывающие функции $F_R(r)$ и плотности распределения риска для закона распределения Эрланга, получим

$$\begin{aligned} f_R(r) &= \frac{1}{k_1} \int_0^1 \frac{1}{q} \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_q \left(\lambda_q \left(\frac{k_0 - r/q}{k_1} \right) \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q \left(\frac{k_0 - r/q}{k_1} \right)}}{(k_q-1)!} dq = \\ &= \frac{\lambda_q^{2k_q}}{k_1 (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 q^{k_q-2} \left(\frac{k_0 - r/q}{k_1} \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q \left(\frac{k_0 - r/q}{k_1} + q \right)} dq; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_R(q, c) &= \frac{1}{k_1} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_q \left(\lambda_q \left(\frac{k_0 - c}{k_1} \right) \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q \left(\frac{k_0 - c}{k_1} \right)}}{(k_q-1)!} dcdq = \\ &= \frac{\lambda_q \lambda_q \lambda_q^{k_q-1} \lambda_q^{k_q-1}}{k_1 k_1^{k_q-1} (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} q^{k_q-1} (k_0 - c)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q} e^{-\lambda_q \left(\frac{k_0 - c}{k_1} \right)} dcdq = \\ &= \frac{\lambda_q^{2k_q}}{k_1^{k_q} (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} q^{k_q-1} (k_0 - c)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q - \lambda_q \left(\frac{k_0 - c}{k_1} \right)} dcdq. \end{aligned} \quad (18)$$

Случай 2. Пусть случайные величины ущерба и вероятности исходных событий имеют экспоненциальную зависимость вида

$$c = k_0 e^{-k_1 q}; \quad c, k_0, k_1 > 0.$$

Подробный вывод формул для функции распределения и плотности распределения риска представлен в [2]:

$$F_R\left(q, \frac{r}{q}\right) = \frac{1}{k_1} \int_0^1 \int_0^{r/q} \frac{1}{r} f_Q\left(\frac{\ln k_0 - \ln \frac{r}{q}}{k_1}\right) f_Q(q) d\frac{r}{q} dq, \quad (19)$$

где $k_0, k_1 > 0$;

$$f_R\left(q, \frac{r}{q}\right) = \frac{1}{rk_1} \int_0^1 f_Q\left(\frac{\ln k_0 - \ln \frac{r}{q}}{k_1}\right) f_Q(q) dq, \quad (20)$$

где $k_0, k_1 > 0$.

Получим аналитическое выражение для функции и плотности распределения риска в случае, если вероятность Q и ущерб C имеют одинаковое распределение Эрланга. Подставим в формулы (7) (8) выражения, описывающие соответствующие функции и плотности распределения вероятности и ущерба (15) (16), и для распределения Эрланга получим

$$f_R(r) = \frac{1}{rk_1} \int_0^1 \frac{1}{q} \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_q \left(\lambda_q \frac{\ln k_0 - \ln \frac{r}{q}}{k_1} \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q \left(\frac{\ln k_0 - \ln \frac{r}{q}}{k_1} \right)}}{(k_q-1)!} dq = \frac{\lambda_q \lambda_q \lambda_q^{k_q-1} \lambda_q^{k_q-1}}{rk_1 k_1^{k_q-1} (k_q-1)! (k_q-1)!} \times$$

$$\times \int_0^1 q^{k_q-1} e^{-\lambda_q q} \left(\ln \frac{k_0 q}{r} \right)^{k_q-1} e^{-\frac{\lambda_q \ln k_0 q}{k_1} \frac{1}{r}} dq = \frac{\lambda_q^{2k_q}}{r_1 k_1^{k_q} (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 \left(q \ln \frac{k_0 q}{r} \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q - \frac{\lambda_q \ln k_0 q}{k_1} \frac{1}{r}} dq; \quad (21)$$

$$F_R(q, c) = \frac{1}{k_1} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} \frac{1}{c} \frac{\lambda_q (\lambda_q q)^{k_q-1} e^{-\lambda_q q}}{(k_q-1)!} \frac{\lambda_q \left(\lambda_q \left(\frac{\ln(k_0/c)}{k_1} \right) \right)^{k_q-1} e^{-\lambda_q \left(\frac{\ln(k_0/c)}{k_1} \right)}}{(k_q-1)!} dcdq =$$

$$= \frac{\lambda_q^{2k_q}}{k_1^{k_q} (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} \frac{1}{c} q^{k_q-1} (\ln(k_0/c))^{k_q-1} e^{-\lambda_q q} e^{-\lambda_q \left(\frac{\ln(k_0/c)}{k_1} \right)} dcdq =$$

$$= \frac{\lambda_q^{2k_q}}{k_1^{k_q} (k_q-1)! (k_q-1)!} \int_0^1 \int_0^{\alpha(q)} \frac{1}{c} q^{k_q-1} (\ln(k_0/c))^{k_q-1} e^{-\lambda_q q - \lambda_q \left(\frac{\ln(k_0/c)}{k_1} \right)} dcdq. \quad (22)$$

Таким образом, получены новые аналитические зависимости функций и плотностей распределения техногенного риска для законов распределения Эрланга C и Q при линейной и экспоненциальной зависимости между этими величинами.

4. Математическое моделирование функций плотности распределения техногенного риска

Для выполнения численного эксперимента были выбраны сочетания параметров закона распределения Эрланга и гиперэрланга случайных величин Q и C , представленные в табл. 1. Конкретные значения параметров распределений выбранных законов взяты на основании большого числа статистических исследований, выполненных авторами данной статьи на кафедре информатики и вычислительной техники Сургутского государственного университета и на кафедре АСУ Обнинского института атомной энергетики Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института применительно к надежности и безопасности оборудования систем посадки самолетов Сургутского аэропорта.

Таблица 1

План численного эксперимента

№ функции	Распределение случайных величин		Значения параметров распределения			
	Q	C	Q		C	
1	Эрланга	Эрланга	$k_q = 2$	$\lambda_q = 0,5$	$k_c = 2$	$\lambda_c = 0,5$
2	Эрланга	Эрланга	$k_q = 2$	$\lambda_q = 2$	$k_c = 2$	$\lambda_c = 2$
3	Эрланга	Эрланга	$k_q = 7$	$\lambda_q = 2$	$k_c = 7$	$\lambda_c = 2$
9	Гиперэрланга	Гиперэрланга	$k_{q1} = 5$	$k_{q2} = 5$	$k_{c1} = 5$	$k_{c2} = 5$
			$\lambda_{q1} = 0,5$	$\lambda_{q2} = 0,5$	$\lambda_{c1} = 0,5$	$\lambda_{c2} = 0,5$
			$q = 0,5$		$q = 0,5$	

Для более наглядного представления результатов моделирования были построены графики полученных функций плотности распределения риска $f_R(r)$ (рис. 1–3) при использовании закона распределения случайных величин исходных событий аварий и катастроф и ущерба от типа Эрланга.

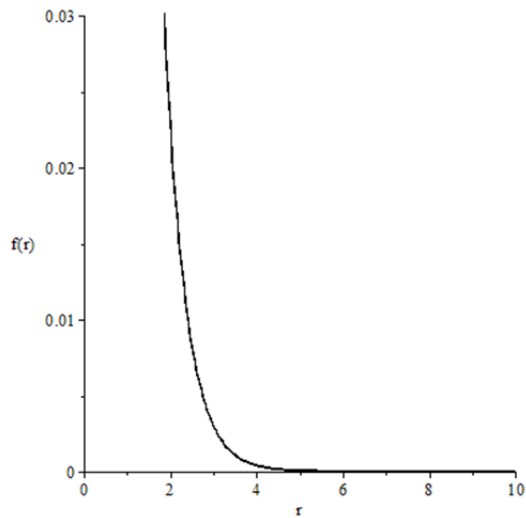


Рис. 1. Зависимость $f_R(r)$ для закона распределения Эрланга случайных величин Q и C с параметрами $k_q = 2$; $\lambda_q = 2$; $k_c = 2$; $\lambda_c = 2$

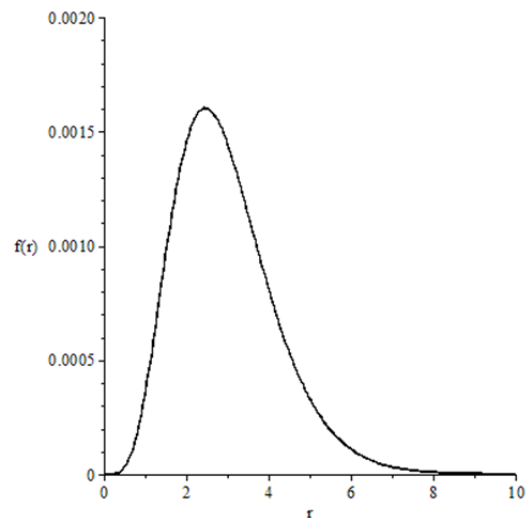


Рис. 2. Зависимость $f_R(r)$ для закона распределения Эрланга случайных величин Q и C с параметрами $k_q = 7$; $\lambda_q = 2$; $k_c = 7$; $\lambda_c = 2$

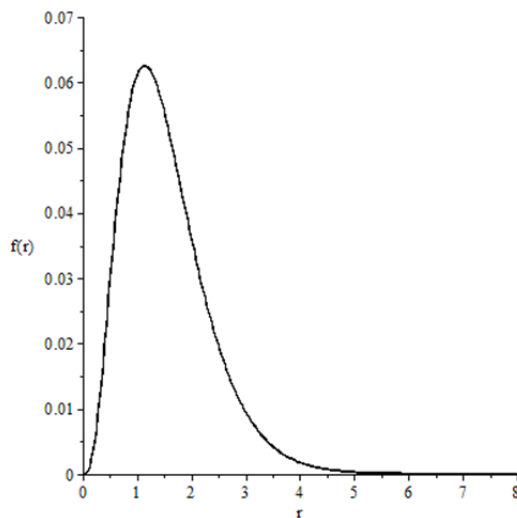


Рис. 3. Зависимость $f_R(r)$ для закона распределения Эрланга случайных величин Q и C с параметрами $k_{q1} = 5$; $k_{q2} = 5$; $\lambda_{q1} = 0,5$; $\lambda_{q2} = 0,5$; $k_{c1} = 5$; $k_{c2} = 5$; $\lambda_{c1} = 0,5$; $\lambda_{c2} = 0,5$; $q = 0,5$

Заключение

1. В практике анализа надежности и безопасности сложных систем применение простейших потоков событий, как правило, приводит к занижению значений количественных показателей. Естественно, что наличие в СКВС разнородных по физическим принципам работы и разнообразных по функционированию узлов, блоков и подсистем приводит при их применении по назначению к появлению большого количества опасных ситуаций. Учитывая при этом воздействие большого спектра внешних факторов и наличие в контуре управления человека, допущение об экспоненциальном законе распределения времени между опасными ситуациями вызывает серьезные сомнения. Указанные замечания требуют использования при количественной оценке и анализе показателей техногенной безопасности СКВС потоков событий с ограниченным последствием либо вообще с последствием (не простейших потоков событий). Необходимо помнить, что экспоненциальные модели распределения времени между опасными ситуациями занижают вероятность наступления чрезвычайного события. Это особенно существенно при больших интервалах времени: «если ЧС не произошло до сих пор, то скорее всего вот-вот произойдет» [5].

Поэтому в данной статье сделан выбор законов распределения опасных событий во времени эрланговского типа, описывающих «просеянные» потоки опасных явлений.

2. В практике оценки значений параметров техногенного риска распределение Эрланга встречается до сих пор сравнительно с другими известным в математической статистике распределениями редко. Поэтому в данной статье впервые получены значения показателей риска с использованием этого распределения.

3. Получены новые аналитические выражения для функции и плотности распределения техногенного риска для нескольких случаев: 1) когда вероятности исходных чрезвычайных событий и ущерба от них независимы; 2) при зависимых между собой вероятностями исходных событий и ущербом, описываемых распределениями Эрланга при линейной и экспоненциальной формах связи.

4. Приведены результаты моделирования знаний функций плотности распределения риска с применением распределения Эрланга по конкретным значениям параметров законов распределения отказов оборудования систем посадки Сургутского аэропорта.

5. Как видно из приведенных аналитических зависимостей, выражения для функций плотности риска $f_R(r)$ зависят от параметров соответствующих законов распределений, что является преимуществом с точки зрения простоты определения функций распределений риска $F_R(r)$. Определения параметров законов плотностей $f_Q(q)$ и $f_C(c)$ можно получить двумя путями: первый путь – по статистическим данным реальной эксплуатации конкретного объекта или его аналога, второй – методами математического моделирования ЭВМ.

6. Чтобы получить близкую к истинной оценку риска, необходимо выполнить следующий алгоритм:

1) на основе эксперимента или известной функциональной зависимости определить связь между случайными величинами вероятности исходных событий Q ущерба от них C ;

2) экспериментально или на основе априорных знаний определить распределения Q и C и по формуле (25) определить функции распределения риска;

3) на основе требований к уровню безопасности системы (объекта) определить максимально допустимые отклонения ущерба $A_C = \sigma_C / m_C$ и $A_Q = \sigma_Q / m_Q$ вероятностей исходных событий.

Поскольку среди параметров законов распределений Q и C , как правило, есть известные величины, то требования к отклонениям параметров Q и C могут быть преобразованы в требования для отклонений конкретных штатных контролируемых параметров объектов и, таким образом, к обеспечению безопасности объекта.

7. Полученные аналитические зависимости для распределения риска чрезвычайных событий рассмотренных видов закона Эрланга могут использоваться специалистами по безопасности, как на стадии проектирования высокоответственных сложных критических систем, так и при их применении по назначению [8–10].

Работа поддержана РФФИ (проект 14-01-00230).

Список литературы

1. Кобзарь, А. М. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
2. Острейковский, В. А. Математические модели теории техногенного риска : моногр. / В. А. Острейковский ; Сургут. гос. ун-т ХМАО-Югры. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2012. – 253 с.
3. Острейковский, В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели : моногр. / В. А. Острейковский ; Сургут. гос. ун-т ХМАО-Югры. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2013. – 320 с.
4. Острейковский, В. А. Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко, В. С. Мишкина // Итоги науки : избр. тр. междунар. симп. по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М. : РАН, 2013. – Т. 1. – С. 12–31.
5. Вишняков, Я. Д. Общая теория риска : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Я. Д. Вишняков. – 2-е изд. – М. : Академия, 2008. – 368 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 7-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2001. – 575 с.
7. Острейковский, В. А. Математическое моделирование техногенного риска / В. А. Острейковский, А. О. Генюш, Е. Н. Шевченко ; Сургут. гос. ун-т ХМАО-Югры. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2010. – 83 с.
8. Острейковский, В. А. Анализ моделей распределения характеристик техногенного риска по статистическим данным аварий и катастроф сложных критически важных объектов / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 3–12.
9. Острейковский, В. А. О некоторых классах моделей количественной оценки риска в теории техногенной безопасности / В. А. Острейковский // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 46–49.
10. Муравьев, И. И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 24–27.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivt.surgu.ru

Павлов Алексей Сергеевич

аспирант,
Обнинский институт атомной энергетики –
филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»
(249040, Россия, г. Обнинск, Студгородок, 1)

Аннотация. В статье рассматриваются методы оценки техногенного риска. Получены новые аналитические зависимости для функции и плотности распределения риска для случаев независимых и зависимых случайных величин вероятности исходных событий и ущерба сложных систем применительно к законам распределения Эрланга, гиперэрланга.

Ключевые слова: риск, вероятность, ущерб, математическая модель, функция распределения, плотность распределения, закон распределения.

Ostreykovskiy Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Pavlov Aleksey Sergeevich

postgraduate student,
Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering –
branch of National Research Nuclear University
«MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute)
(249040, 1 Studgorodok, Obninsk, Russia)

Abstract. The article deals with method of measuring anthropogenic risks. New analytical relations for function and density of distribution of risk are received: with independent and dependent random variable of probability of initial events and damages in relation to various the Erlfng distribution, heper-Erlang distribution laws.

Key words: risk, probability, damage, mathematical model, distribution function, density of distribution, distribution law.

УДК 519.87

Острейковский, В. А.

Математические модели оценки техногенного риска сложных систем на основе распределения Эрланга / В. А. Острейковский, А. С. Павлов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 99–106.