Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта

Игорь Б. Шубинский, ЗАО «ИБТранс», Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Алексей М. Замышляев, ОАО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: A.Zamyshlyayev@vniias.ru

Ольга Б. Проневич, ОАО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: O.Pronevich@vniias.ru

Игорь Б.
Шубинский

Алексей М.
Замышляев

Ольга Б. Проневич

Цель. Безопасность производственная (БП) – состояние защищённости производственного персонала от вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда на производстве [1]. Для оценки БП на железнодорожном транспорте наиболее эффективно использовать комплексные показатели, к которым относится показатель оценки риска. Такую позицию отражает и законодательство Российской Федерации, которое устанавливает необходимость оценки пожарных, профессиональных и других видов рисков, влияющих на производственную безопасность. В соответствии с определением ГОСТ 33433-2015 [2], риск – сочетание вероятности события и его последствий. Наиболее сложной задачей при расчёте риска является выбор модели оценки вероятности появления нежелательного события. Модель должна обеспечивать практическую применимость результатов оценки для планирования мероприятий по обработке рисков. В настоящее время существует множество методов оценки вероятности, которые делятся на две крупные группы – экспертные и количественные. Экспертные методы обладают рядом известных недостатков. Количественные же методы нуждаются в формировании системы уравнений или построении аналитической модели. Для объектов железнодорожного транспорта наибольший интерес представляет построение аналитической модели оценки вероятности в виду возможности наглядной демонстрации учитываемых в модели факторов. Цель статьи – формализация аналитического метода оценки вероятности перехода объекта железнодорожного транспорта в опасное состояние (в сфере производственной безопасности). **Методы.** Нежелательные события, приводящие к нарушению производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта являются случайными, их можно представить в виде случайного процесса. Случайный процесс развития системы, в том числе перехода объектов из состояния защищённости в опасные (нежелательные) состояния, то есть изменение состояний системы во времени, может быть описан при некоторых допущениях полумарковским процессом. Построение и решение полумарковских моделей в общем виде сводится к формированию системы однородных дифференциальных уравнений. Такой путь всегда чреват математическими трудностями. В работе [3] показана возможность представления и решения полумарковских моделей с помощью связанной графовой модели. Такая модель обладает высоким уровнем наглядности, позволяет формализовать искомые состояния системы, а также пути перехода из безопасного в опасное состояние. Основной проблемой моделирования случайного процесса изменения состояний производственной безопасности является необходимость установления полного перечня опасных состояний и предшествующих им безопасных или предопасных состояний. Процессы, реализуемые на объектах железнодорожного транспорта, характеризуются множеством состояний, которые приводят к различным событиям. Понятие «состояние» обычно характеризует мгновенную фотографию, «срез» системы. Таким образом, на первом этапе построения и решения модели случайного процесса смены состояний производственной безопасности системы определяются в соответствии с известным критерием опасного состояния конечные множества безопасных и опасных состояний исследуемого объекта железнодорожного транспорта [4]. Так как процесс смены состояний производственной безопасности системы на железнодорожном транспорте с течением времени имеет случайный характер, то в данной работе функционирование системы описано моделью полумарковского случайного процесса в предположении, что дискретный процесс смены состояний описывается вложенной Марковской цепью. Множество состояний системы и связи между ними представлены в виде ориентированного графа состояний, для которого определены топологические понятия [3]. Для сформированной модели доказана теорема определения вероятности перехода системы из начального неопасного состояния в опасное состояние и приведена формула расчета этой вероятности. **Результаты.** Реализованный в представленной статье графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта, включающий в себя как правила построения графа состояний безопасности системы, так и инструмент оценки вероятности перехода системы в конкретное опасное состояние, является основой для практической методики расчета и прогнозирования рисков нарушения производственной

безопасности объектов. Доказана теорема определения вероятности перехода системы из начального неопасного состояния в опасное состояние, приведён пример применения графового метода для оценки вероятности появления пожара на стационарном объекте. Предложенный метод оценки вероятности может быть использован при планировании мероприятий по обеспечению техногенной безопасности, в части формирования новых состояний или правил перехода в смежные состояния.

Формат цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта // Надежность. 2017. Т. 17, № 1. С. 40-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-1-40-45

Введение

Показатели производственной безопасности делятся на два типа: фактические и расчётные (плановые) показатели. К фактическим показателям относятся: коэффициенты частоты производственного травматизма, объёмы страховых выплат, частоты пожаров, плата за негативное воздействие на окружающую среду и т. д. Фактические показатели могут быть представлены как в абсолютных, так и в относительных величинах, их значения определяются путём прямых измерений. Расчётные показатели производственной безопасности, как правило, относятся к категории комплексных или интегральных показателей. Наиболее эффективным, в соответствии с отечественным и мировым опытом, из группы расчётных показателей является комплексный показатель, сочетающий в себе количественные и качественные оценки – показатель риска. Широко используется в качестве инструмента оценки риска матрица рисков [2, 5]. Последствия реализации риска всегда носят негативный характер и для эксплуатирующихся объектов железнодорожного транспорта хорошо известны. Типовые уровни тяжести последствий для железнодорожного транспорта рекомендуются ГОСТ 33433-2015. При оценке вероятности появления нежелательного события мы сталкиваемся с проблемой выбора метода расчёта. В настоящее время существует множество методов оценки риска, которые делятся на две крупные группы – качественные и количественные. Важнейшей задачей при выборе метода оценки вероятности появления нежелательного события является обеспечение практической применимости результатов, а это означает, что модель оценки должна учитывать состояния контролируемых параметров системы. Система, позволяющая управлять вероятностью появления опасных происшествий и аварий, должна основываться на информации о процессах, реализуемых на объектах железнодорожного транспорта, и состояниях, которые сопровождаются авариями и нежелательными событиями. Подход, предлагаемый в данной работе, ориентирован на создание наглядного, хорошо формализованного метода определения вероятности перехода системы в опасное состояние.

Подмножества состояний объектов железнодорожного транспорта

Для сложной системы, которой является объект железнодорожного транспорта, характерны состояния отказа отдельных элементов и даже целых подсистем с

сохранением работоспособности системы в целом [1]. Такие состояния системы во многих случаях снижают характеристики её эффективности. Это свойство объекта железнодорожного транспорта оказывает особое влияние на постановку и решение задачи обеспечения безопасности. Например, с точки зрения обеспечения пожарной безопасности отдельными состояниями системы будут «нарушение требований Правил противопожарного режима (далее – ППР)» и «появления возгорания из-за нарушения требований ППР». Вероятностные характеристики этих состояний будут так же отличаться. При этом с точки зрения управления пожарной безопасностью объекта разумно оценивать не только вероятность появления нарушения, но и вероятность его своевременного устранения. Такой подход образует дополнительные связи между различными состояниями. Формализуем понятие «состояние безопасности» с помощью образов теории множеств:

Работоспособное состояние S_p – состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям технической документации.

Неработоспособное состояние $\bar{S}_p$ – состояние системы, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям технической документации.

Множество неопасных производственных состояний S_n – это состояния системы, при которых обеспечивается безопасность имущества, жизни, здоровья работников и третьих лиц в соответствии с нормативными документами [1]. Это множество включает множество безопасных и множество предопасных состояний системы.

Множество безопасных состояний S_b – это состояния системы, при которых обеспечиваются безопасность имущества, жизни, здоровья работников и третьих лиц в соответствии с требованиями технической, технологической документации, условиями эксплуатации.

Множество предопасных состояний $S_{\text{риск}}$ – это такие работоспособные состояния системы, при нахождении в которых система приближается к границам установленного критерия опасного состояния с такой скоростью, что может перейти в опасное состояние до проведения следующего контроля технического обслуживания или ремонта.

Множество опасных состояний $\bar{S}_n$ – состояние, которое может привести к причинению вреда имуществу, здоровью и жизни работников, а так же третьих лиц.

Рисунок 1 – Состояния безопасности системы

На рисунке 1 приведены диаграммы множеств состояний безопасности системы.

В данной статье мы акцентируем внимание на состояниях $S_{и}$, $S_{риск}$, $\bar{S}_{и}$.

Граф состояний безопасности системы

События возникновения пожаров, аварий с экологическими последствиями, события травм при проведении работ носят случайный характер. Представим исследуемую систему со сформулированными ранее множествами состояний с помощью ориентированного графа состояний $G(S, H)$, где S – конечное множество состояний системы; H – конечное множество дуг между вершинами i, j (состояниями s_i, s_j). Развитие системы можно описать следующим образом: если система находится в состоянии s_i , то с вероятностью p_{ij} она сможет перейти в состояние s_j . Критерием опасного события является переход системы во множество опасных состояний $\bar{S}_{и}$.

Таблица 1 – Множество состояний системы

Множество	Подмножество	№	Обозначение	Описание	Нарушенный нормативный документ
S	$S_{и}$	0	S_0	Кабели/провода не повреждены	
	$S_{риск}$	1	S_1	Открыто проложенные кабели/провода (без защитных оболочек/труб/коробов) проложены в местах, где возможны механические повреждения	ПУЭ 2.1.47
		2	S_2	Крутые изгибы, микроповреждения (не видимые повреждения изоляции)	
		3	S_3	Эксплуатация кабеля/провода с видимым нарушением изоляции	ППР 42а)
	$\bar{S}_{и}$	4	S_4	Нагрев кабелей из-за роста переходного сопротивления	
		5	S_5	Короткое замыкание и оплавление изоляции, искры КЗ	

При построении графа безопасности системы должны быть учтены следующие требования:

1) Из каждого состояния множества $S_{и}$ возможен переход в состояние множества $S_{риск}$ или $\bar{S}_{и}$.

2) Из каждого состояния множества $S_{риск}$ система переходит либо в состояние $S_{и}$, либо в состояние $\bar{S}_{и}$.

Приведем пример описания состояния пожарной безопасности помещения стационарного объекта с помощью графа состояния (таблица 1):

S – полное множество состояний объектов, $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$;

$S_{и}$ – подмножество неопасных состояний, $S_{и} = \{S_0\}$;

$S_{риск}$ – подмножество предопасных состояний, $S_{риск} = \{S_1, S_2, S_3\}$;

$\bar{S}_{и}$ – подмножество опасных состояний, $\bar{S}_{и} = \{S_4, S_5\}$.

Таким образом, $S = S_{и} \cup \bar{S}_{и}$, $S_{и} = S_{риск} \cup S_{б}$.

В таблице 2 приведены значения вероятностей переходов за один шаг из i -го состояния в состояние j (p_{ij}). Эти вероятности являются априорными, они задаются экспертным путём на основе анализа случаев возникновения и развития пожаров.

Таблица 2 – Матрица переходных вероятностей

		Состояния						
		0	1	2	3	4	5	Σ
С о с т о я н и я	0	0,7	0,3	0	0	0	0	1
	1	0,5	0	0,3	0,2	0	0	1
	2	0	0	0,7	0	0,3	0	1
	3	0	0	0	0,3	0,2	0,5	1
	4	0	0	0,3	0	0,7	0	1
	5	0	0	0	0	0	1	1

На рисунке 2 приведен граф состояний.

Рисунок 2 – Граф состояний пожарной безопасности в помещении стационарного объекта

Задача состоит в определении вероятности перехода системы из конкретного неопасного состояния в любое опасное. На основании проведенных расчетов должны приниматься решения об изменении значений переходных вероятностей за счёт внедрения систем противопожарной защиты, проведения предупредительных ремонтов и других организационно-технических мероприятий.

Топологические понятия, используемые для математического моделирования:

- *путь* – цепь последовательно соединенных однонаправленных дуг с началом в состоянии i и окончанием в состоянии j , вес пути l_k^{ij} определяется выражением:

$$l_k^{ij} = \prod_{i,r,j \in S} p_{ir} \cdot p_{rj} \quad (1)$$

где p_{ir} – вероятность перехода за один шаг из состояния i в состояние r ;

p_{rj} – вероятность перехода за один шаг из состояния r в состояние j ;

- *замкнутый контур* – это цепь последовательно соединенных однонаправленных дуг, в которой выход конечной вершины в цепи соединен с начальной вершиной в цепи. Вес j -ого контура определяется выражением:

$$C_j = \prod_{i,j \in S} p_{ij} \cdot p_{ji}; \quad (2);$$

- *петля* – частный случай замкнутого контура, в ней входящие и исходящие дуги сливаются в одну дугу, вес петли $C_j = p_{ij}$;

- *разложение графа* – часть графа, не содержащая выделенных вершин и связанных с ней дуг; вес разложения ΔG_i рассчитывается с учетом исключения из графа вершины i и связанных с ней дуг; вес разложения $\Delta G_{\bar{S}_u}$ рассчитывается с учетом дополнительного исключения из графа вершин множества $\bar{S}_u$ и связанных с ними дуг; вес разложения ΔG_k^f рассчитывается с учётом исключения из графа вершины f , а так же вершин, расположенных на k -ом пути из начальной вершины в вершину i и связанных с ними дуг;

- *вес разложения (определитель)* находится по формуле Мезона:

$$\Delta G = 1 - \sum_j C_j + \sum_{rj} C_r \cdot C_j - \sum_{ijr} C_i \cdot C_r \cdot C_j + \dots \quad (3)$$

Теорема

Вероятность перехода системы из конкретного i -ого начального неопасного состояния ($i \in S_u, S_u \cap \bar{S}_u \neq \emptyset, S_u \cup \bar{S}_u = S$) в любое опасное состояние $f \in \bar{S}_u$ определяется выражением

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_u} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f}{\Delta G_{\bar{S}_u}} \quad (4)$$

где l_k^{if} – k -ый путь, ведущий из неопасного состояния графа $i \in S_u$ в опасное состояние f ;

ΔG_k^f – вес разложения графа без f -й вершины и вершин графа, расположенных на k -ом пути;

$\Delta G_{\bar{S}_u}$ – вес разложения графа без вершин множества опасных состояний.

Докажем справедливость выражения (4). Случайный переход системы из исходного неопасного состояния i в любое опасное состояние возможен следующим образом:

- путем предварительных переходов в смежные неопасные состояния; описывается суммой произведений вероятностей переходов из исходного неопасного состояния в другие неопасные состояния на вероятности переходов системы из этих неопасных состояний в любое опасное состояние, т.е. эта вероятность равна $\sum_j p_{ij} \cdot b_{jf}$. Или в матричной форме $\mathbf{P} \cdot \mathbf{B}$, где $\mathbf{P}$ – это матрица переходных вероятностей размерности $n \times n$, а n – количество вершин в множестве неопасных состояний; $\mathbf{B}$ – вектор столбец вероятностей переходов в опасные состояния размерности $(n \times 1)$;

- непосредственным переходом за один шаг в любое опасное состояние; описывается вектором – столбцом вероятностей одношаговых переходов системы из состояния i в любое опасное состояние f : $P = (p_{if})$. Данный вектор – столбец имеет размерность $(n \times 1)$, где n – число вершин во множестве неопасных состояний.

Таким образом, вероятность случайного перехода системы из исходного неопасного состояния i в любое

опасное состояние f может быть выражена следующим матричным уравнением:

$$\mathbf{B} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{P}. \quad (5)$$

В этом уравнении неизвестными являются элементы вектора-столбца $\mathbf{B}$. После их группировки в левой части матричного уравнения получим:

$$\mathbf{B}(\mathbf{I} - \mathbf{P}) = \mathbf{P}, \quad (6)$$

где правая часть уравнения – вектор-столбец свободных членов вероятностей переходов за один шаг из вершин $i, j, \dots, z \in S_u$ в вершину $f \in \bar{S}_u$.

Затем по правилу Крамера находим $B_i = \Delta_i / \Delta$, где определитель графа в множестве неопасных состояний $\Delta = |\mathbf{I} - \mathbf{P}|$, а Δ_i – определитель, получающийся заменой i -ого столбца в матрице $\mathbf{I} - \mathbf{P}$ на вектор свободных членов $\mathbf{P}$ при условии, что Δ_i и Δ не равны 0.

Определитель Δ_i отличается от определителя Δ тем, что в столбце i элемент p_{ij} заменяют на элемент p_{if} . Согласно работе [2], воспользуемся графовой формой представления определителя и миноров, а также путей на графе, т.е.:

$$\Delta = \Delta G_{\bar{S}_u}, \Delta_i = \sum_{f \in \bar{S}_u} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f, \quad (7)$$

где $\Delta G_{\bar{S}_u}$ – вес разложения графа без множества опасных вершин;

ΔG_k^f – вес разложения графа без опасных вершин и вершин, находящихся на k -м пути;

l_k^{if} – вес k -го пути из неопасной вершины i в опасную вершину f .

Подставляя формулы (7) в формулу (6) находим, что

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_u} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f}{\Delta G_{\bar{S}_u}}.$$

Пример оценки вероятности перехода состояния кабелей на стационарном объекте в пожароопасное состояние.

Таблица 3 – Расчёт весов путей

№	Обозначение	Путь	Формула	Расчёт веса пути	Вес пути
1	l_1^{04}	$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4$	$p_{01} \cdot p_{12} \cdot p_{24}$	$0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,3$	0,027
2	l_2^{04}	$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$	$p_{01} \cdot p_{13} \cdot p_{34}$	$0,3 \cdot 0,2 \cdot 0,2$	0,012

а) Путь к опасному состоянию № 1

б) Путь к опасному состоянию № 2

Рисунок 3 – Пути перехода в опасное состояние S_4

Для приведенного выше графа опасности состояния системы рассчитаем вероятность перехода из состояния S_0 «Кабели/провода не повреждены» в состояние S_4 «Нагрев кабелей из-за роста переходного сопротивления». На рисунке 3 показаны пути перехода в опасное состояние S_4 .

В соответствии с теоремой оценки вероятности перехода системы из начального не опасного состояния в опасное состояние, вероятность перехода системы из S_0 в S_4 определяется выражением:

$$b_{04} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_u} \sum_k l_k^{04} \Delta G_k^4}{\Delta G_{\bar{S}_u}}.$$

Как видно из рисунка 3, количество путей перехода из S_0 в S_4 $k = 2$.

В таблице 3 приведены расчёты весов путей из состояния S_0 в состояние S_4 . В таблице 4 приведены расчёты весов контуров.

Для рассматриваемого случая вес разложения графа без вершин множества опасных состояний будет равен:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\bar{S}_u} &= 1 - (0,7 + 0,15 + 0,7 + 0,3) + \\ &+ (0,105 + 0,045 + 0,49 + 0,21 + 0,21) - \\ &- (0,0315 + 0,147) = 0,0315. \end{aligned}$$

Тогда вероятность перехода из состояния S_0 (провода и кабели не повреждены) в состояние S_4 (нагрев из-за роста переходного сопротивления):

$$\begin{aligned} b_{04} &= \frac{\sum_{f \in \bar{S}_u} \sum_k l_k^{04} \Delta G_k^4}{\Delta G_{\bar{S}_u}} = \\ &= \frac{0,027 \cdot 0,7 + 0,012 \cdot 0,3}{0,0315} = \frac{0,0225}{0,0315} = 0,71. \end{aligned}$$

Аналогичным образом рассчитывается вероятность перехода из состояния S_0 (провода и кабели не

Таблица 4 – Расчёт весов контуров

№	Код контура	Вершины	Вид	Формула	Вес контура, C_i	Контур с опасными состояниями
1	C_1	$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$		$p_{01} \cdot p_{10} = 0,5 \cdot 0,3$	0,15	
2	C_0	$S_0 \rightarrow S_0$		$p_{00} = 0,7$	0,7	
3	C_2	$S_2 \rightarrow S_2$		$p_{22} = 0,7$	0,7	
4	C_4	$S_2 \rightarrow S_4$		$p_{24} \cdot p_{42} = 0,3 \cdot 0,3$	0,09	V
5	C_3	$S_3 \rightarrow S_3$		$p_{33} = 0,3$	0,3	
6	$C_{4,4}$	$S_4 \rightarrow S_4$		$p_{44} = 0,7$	0,7	V
7	C_5	$S_5 \rightarrow S_5$		$p_{55} = 1$	1	V

повреждены) в состояние S_5 (короткое замыкание и оплавление изоляции, искры вследствие короткого замыкания):

$$P_{05} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_p} \sum_k I_k^{05} \Delta G_k^5}{\Delta G_{\bar{S}_p}} = \frac{0,03 \cdot 0,3}{0,0315} = \frac{0,009}{0,0315} = 0,29.$$

Заключение

Показано, что события возникновения пожаров, аварий с экологическими последствиями, события травм при проведении работ, носящие случайный характер, могут оцениваться с помощью модели полумарковского случайного процесса в предположении, что переходы между состояниями системы описываются дискретной вложенной марковской цепью. Продемонстрирована графовая модель анализа пожарной безопасности системы, включающая в себя состояния множеств опасных, предопасных и неопасных состояний.

Разработан инструмент оценки риска нарушения производственной безопасности с помощью графовой модели анализа безопасности. Доказана теорема определения вероятности перехода системы из конкретного начального неопасного или предопасного состояния в искомое опасное состояние, позволяющая устанавливать аналитическое или численное значение вероятности попадания объекта железнодорожного транспорта в опасное состояние. Показано практическое ее применение.

Библиографический список

1. Электронный словарь терминов МЧС [электронный ресурс] <http://www.mchs.gov.ru/dop/terms/item/88773/>
2. ГОСТ 33433-2015 Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте.
3. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза/ И.Б. Шубинский – М: Журнал Надежность, 2016. – 544 с.
4. Шубинский И.Б. Топологический метод и алгоритм определения стационарных показателей надежности технических систем/ И.Б. Шубинский // Надежность и контроль качества – 1984. – № 5. – С. 3.
5. Новожилов Е.О. Принципы построения матрицы рисков/Е.О. Новожилов // Надежность. 2015 г. – № 3(54), – С. 73-86.

Сведения об авторах

Игорь Б. Шубинский – доктор технических наук, профессор, директор ЗАО «ИБТранс». Россия, Москва, ул. Нижегородская, д. 32, стр. 15, офис 310, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора ОАО «НИИАС». Россия, Москва, ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Zamyshlyaev@vniias.ru

Ольга Б. Проневич – начальник отдела ОАО «НИИАС». Россия, Москва, ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, тел. (495) 967-77-05, доб. 516, e-mail: O.Pronevich@vniias.ru

Поступила: 28.12.2016