Методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава

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

Ольга Б. Проневич

Резюме. Цель. Пожарная безопасность объекта защиты – состояние объекта защиты, характеризующее возможность предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара [1]. Одним из важнейших объектов защиты на железнодорожном транспорте является тяговый подвижной состав (ТПС). Управление пожарной безопасностью ТПС связано с наличием большого объема информации о различных видах ТПС: возможных пожароопасных состояниях, системах противопожарной защиты, параметров, реализуемых на ТПС процессах. Это значит, что в основе эффективного управления должен лежать анализ, позволяющий выявить тенденции и факторы развития пожароопасных ситуаций. Анализ должен быть построен таким образом, чтобы его результаты могли быть использованы для оценки комплексных показателей безопасности [2]. Кроме того, несомненным является прикладной характер такого анализа. В виду этого факта важно отметить, что непосредственная задача прикладных исследований – применение результатов фундаментальных исследований для решения не только познавательных, но и социально-практических проблем [3]. Цель статьи – структурирование наиболее эффективных прикладных и теоретических методов анализа и разработка структуры системного анализа пожарной безопасности ТПС. **Методы.** Множество факторов, влияющих на состояние ТПС можно разделить на две группы: качественные и количественные. При этом важным фактором является то, что невозможно изучить влияние всех элементов сложной технической системы, которую представляет из себя ТПС, на пожарную безопасность. Приходится знакомиться с частью совокупности, т.е. с выборкой, а затем с помощью вероятностно-статистических методов переносить выводы, сделанные при рассмотрении выборки, на совокупность в целом [4]. При анализе массива данных необходимо правильно определить выборку. Важнейшим критерием на этом этапе является качество информации. Перечень исходных данных определялся, исходя из полноты имеющего описания, достоверности источников. Далее были реализованы в определенной последовательности анализы данных качественными и полуколичественными методами. Первым, в условиях отсутствия возможности исследовать явные связи (из-за уничтожения опасными факторами пожара) между состояниями узлов, предшествующими пожару, был использован анализ Парето; исследования проводились с применением анализа корневых причин (диаграмма Исикавы). В дальнейшем использовался кластерный анализ пожароопасных состояний. Основная цель кластерного анализа – установление типовых последовательностей событий, приводящих к появлению пожара на ТПС. Для достижения этой цели необходимо описание возможных пожароопасных состояний тягового подвижного состава, т.е. необходимо описание множества событий и состояний. Для анализа надежности успешно используются представление информации о состояниях безопасности в образах теории множества [5]. Множества опасных пожароопасных событий ТПС представлены в виде частично-упорядоченных множеств. Обработка таких множеств, являющихся объектами нечисловой природы, не может осуществляться статистическими процедурами, основанными на операциях сложения параметрических данных. Поэтому использовался математический инструментарий, основанный на понятии типа расстояния. Часть данных, имеющих количественные характеристики, анализировалась статистическими методами. **Результаты.** Реализованные в представленной статье методы анализа данных о пожарной безопасности ТПС, включающие в себя методы обработки данных числовой и нечисловой природы, позволили сформировать форматизированный перечень факторов пожарной опасности, являющихся основой для построения практически применимой методики расчета пожарных рисков ТПС. Предложен алгоритм применения качественных и количественных методов анализа данных различной числовой природы, приведен пример применения алгоритма для анализа пожарной безопасности тепловозов. Предложенный метод может быть использован для анализа техногенной безопасности в части формирования перечня факторов, важных для оценки рисков.

Формат цитирования: Проневич О.Б. Методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава // Надежность. 2017. № 2. С. 48-55. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-2-48-55

Введение

Описание вида, структуры данных – начало любого статистического исследования. В случае анализа пожарной безопасности статистические данные – это значение некоторого признака, свойственного тяговому подвижному составу (ТПС) и влияющего на возможность инициации или распространения горения. Значения могут быть количественными или качественными. При измерении по нескольким количественным или качественным признакам в качестве статистических данных об объекте получаем вектор [6]. Однако векторные исчисления связаны с применением громоздкого математического аппарата, а также с необходимостью формировать систему координат и определять перечень операций, которые можно было бы применять при обработке разнотипных данных. В виду прикладного характера исследования целесообразно декомпозировать задачу до анализа одномерных наблюдаемых величин, определить одномерные статистические методы исследования, последовательное применение которых даст столько же информации об объекте, сколько и многомерный анализ. В соответствии с типом исходных данных все возможные методы анализа разбиваются на две части – числовую статистику и статистику объектов нечисловой природы. Последнее имеет ключевое значение по двум причинам. Во-первых, источником большей части информации о случаях пожара на ТПС являются акт о пожаре и заключение о непосредственной (технической) причине пожара, имеющие форму анкеты с открытыми вопросами. Эти документы содержат информацию в числовом и нечисловом виде. Другой причиной является характер оценки влияния состояния локомотива на возможность возникновения пожара. Основным источником такой информации является мнение эксперта, обычно выраженной в нечисловом виде.

Подход, предлагаемой в данной работе, ориентирован на формирование перечня факторов пожарной опасно-

сти, относящихся к объектам числовой и нечисловой природы и формирующих наиболее полную информацию, необходимую для построения модели оценки пожарных рисков.

Выбор способов получения и анализа данных о пожарной безопасности тягового подвижного состава

При решении задачи, связанной с обработкой данных о пожарной безопасности тягового подвижного состава исследователь располагает двумя источниками информации. Первый – это результаты наблюдений за случаями пожаров на ТПС, порождающие информацию в виде выборки данных из некой генеральной совокупности. Объем такой выборки ограничен двумя факторами: периодом наблюдения и количеством наблюдаемых признаков. При этом количество наблюдаемых признаков в течение всего периода наблюдения (с 2011 по 2015 год) не было фиксированным в связи с изменением порядка регистрации и хранения данных. Второй источник – это априорная информация о конструкции ТПС и возможных нарушениях при техническом содержании и эксплуатации, приводящих к появлению пожароопасных ситуаций, накопленных к моменту начала анализа. Эти данные, в отличие от наблюдаемых признаков, имеют структурированный вид. Таким образом, при работе с источниками информации в первую очередь решалась задача извлечения данных, т.е. структурирование данных из неструктурированных или слабоструктурированных документов. В таблице 1 приведена классификация источников информации о пожарной безопасности объектов и способы извлечения данных из источников для дальнейшего анализа.

Формирование выборки осуществляется на этапе первичной обработки данных. Результатом извлечения

Таблица 1 – Анализ – классификация способов получения данных о пожарной безопасности тягового подвижного состава

Тип источника	Источник	Способ извлечения данных
Документальный	Акт служебного расследования	Ручной анализ: упорядочивание данных, систематизация данных
	Заключение о непосредственной (технической причине пожара)	
	Акт осмотра тягового подвижного состава после пожара	
	Журнал технического состояния локомотива	Ручной анализ: логический анализ, систематизация данных, экспертный анализ
	Автоматизированная система управления пожарной безопасностью	Группировка данных, первичный статистический анализ
Экспертная группа	Анализ состояния пожарной безопасности объектов и подвижного состава ОАО «РЖД»	Ручной анализ: обобщение и классификация данных
Эксперимент	(наблюдение в измененных условиях)	Ручное анализ: регистрация, логический анализ и систематизация данных

Рисунок 1 – Алгоритм выбора метода анализа данных

данных из первоисточника являются частично упорядоченная информация числового и нечислового характера. Эта информация отличается по уровню структуризации, однородности, а главное по уровню взаимосвязи данных друг с другом. Для анализа таких данных был разработан алгоритм, представленный на рисунке 1.

Качественные и полуквантитативные методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава

В ходе извлечения данных из первоисточника и группировки данных о количестве и причинах пожара установлено, что из 344 пожаров на тепловозах и электровозах за рассматриваемый период 201 пожар произошел по вине ремонтных локомотивных депо (далее – ТЧР), 31 – по вине сервисных предприятий, 35 – по вине эксплуатационных локомотивных депо (далее – ТЧЭ), 15 – по вине локомотиворемонтных заводов, 5 – по вине других сторонних организаций.

Стоит отметить, что большинство сервисных компаний, которые на данный момент не входят в структуру ОАО «РЖД», ранее были ремонтными локомотивными депо. Несмотря на реструктуризацию и перевод части ТЧР в общества с ограниченной ответственностью, не относящиеся к структурным подразделениям

ОАО «РЖД», проблема с возникновением пожара по вине ТЧР и сервисных компаний осталась актуальной. Изменилось лишь процентное соотношение. Если в 2011-2013 гг. количество пожаров по вине ТЧР составляло около 80%, по вине сервисных предприятий около 4 %, то в 2014 г. ТЧР и сервисные компании разделили вину по 46 % и 41 % соответственно, т.е. 80 % пожаров в течение 4 лет происходило по причине некачественного проведения ремонтов. Анализ Парето по виновным в случаях пожара приведен на рисунке 2.

Диаграмма Парето позволяет сделать вывод, что главной причиной возникновения пожара на ТПС является некачественное проведение технических осмотров и ремонтов. Это означает, что дальнейший анализ должен быть посвящен детализации и структуризации данных о конкретных состояниях локомотива, приводящих к появлению пожаров или действий работников, эксплуатирующих и ремонтирующих его. Однако прежде чем перейти к такому анализу важно учесть фактор различия конструкций локомотивов различных серий. На рисунке 3 представлено количество пожаров за рассматриваемый период по сериям тепловоза. Из рисунка 3 видно, что 37,6 % всех пожаров на тепловозах

Рисунок 2 – Диаграмма Парето по виновным по пожарам на тепловозах и электровозах за рассматриваемый период

Рисунок 3 – Количество пожаров за 2011-2015 гг. по сериям тепловозов

за рассматриваемый период приходится на серию 2(3) ТЭ10М, 19 % – серия 2(3)ТЭ116, 12,4 % – серия 2(3) ТЭ10В, 10,1 % – серия 2(3)ТЭ10МК. Это можно объяснить тем, что большую часть (63 %) эксплуатационного парка тепловозов по всей сети ОАО «РЖД» составляют серии 2ТЭ10 и 2ТЭ116. Они являются наиболее часто эксплуатируемыми, что также является фактором высокой статистики пожара по данным сериям. Оставшиеся 37 % эксплуатационного парка тепловозов по всей сети ОАО «РЖД» составляют серии, для которых нет статистических данных или пожары редки.

Из диаграммы Парето, представленной на рисунке 3, можно сделать вывод, что наибольшее количество пожаров приходится на серии тепловозов 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК. В ходе изучения материалов разбора пожаров установлена причинно-следственная связь возникновения пожара по причинам технических неисправ-

ностей. На рисунке 4 представлена диаграмма Исикавы, отображающая причинно-следственные связи между пожаром на локомотивах и факторами, влияющими на него. По правилам построения диаграммы Исикавы, факторы, которые усугубляют проблему, отражают стрелками, покосившимися к основной стрелке вправо, а те, которые нейтрализуют проблему – с наклоном влево. К нейтрализующим факторам относятся элементы системы противопожарной защиты (далее – СППЗ): установки пожарной сигнализации (УПС); установки пожаротушения (УПТ); огнетушащие вещества (ОГН) отражены как нейтрализующие факторы. Таким образом, видно, что на возникновение пожара на тяговом подвижном составе может влиять как отдельно взятый показатель, так и совокупность показателей различных факторов. На диаграмме Исикавы (рисунок 4) цветом выделены показатели факторов, которые в большинстве

Рисунок 4 – Причинно-следственные связи пожаров на тепловозах и электровозах и факторов, влияющих на возникновение пожара

случаев являлись причиной возникновения пожара на данных тепловозах серий 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК.

Поскольку наиболее часто горят тепловозы определенных серий, рассмотрим подробно, какие именно узлы данных серий являются пожароопасными. На рисунке 5 представлен анализ пожаров на тепловозах серий 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК за рассма-

триваемый период по узлам возникновения пожара.

Из диаграммы Парето, представленной на рисунке 5, видно, что наибольшую часть пожарной опасности (80 %) для данных серий представляет следующее множество узлов: электрические цепи управления, силовые электрические цепи, тяговый электродвигатель, масляная система, топливная система, турбокомпрессор, дизель, выхлопная система, вспомогательные электрические машины, главный генератор, высоковольтная камера, механическое вспомогательное оборудование их приводы, статические преобразователи, выпрямители, система охлаждения ТЭД и выпрямительных установок, аккумуляторные батареи, фильтры непрерывного действия.

Рисунок 5 – Количество пожаров по пожароопасным узлам тепловозов

ческие машины. Т.е. на данном этапе анализа можно говорить о формировании выборки пожароопасных узлов, оценка пожарной опасности которых будет характеризовать основную часть пожарной безопасности ТПС в целом.

При этом каждый из пожароопасных узлов имеет определенные сборочные единицы и детали, которые являются инициаторами пожара. Так, например, для электрических цепей это изоляция и жилы. У тяговых электродвигателей это более обширный список – от якоря до подводящих кабелей. На условия возникновения пожара также оказывают влияние и пожароопасные события, которые приводят к пожару в определенной детали узла. Рассмотрим их более подробно. При разборе материалов расследования пожаров на тепловозах чаще всего встречались события короткого замыкания, приводящие к появлению искры и дальнейшему возгоранию жил кабелей и проводов. Перечень пожароопасных событий для тепловозов: электрическая дуга, искры, искры короткого замыкания из-за замыкания проводов друг на друга, на корпус, искры короткого замыкания из-за межвиткового замыкания, круговой огонь, горение легко воспламеняющихся веществ, нагрев, раскаленные газы, другое. Т.к. эти описанные характеристики тепловоза, влияющие на его пожарную безопасность, являются не числовыми, то в соответствии с алгоритмом выбора метода анализа данных (рисунок 1) дальнейший метод анализа таких данных – кластерный анализ.

Кластерный анализ нечисловых статистических данных

На основе информации материалов расследований и данных из автоматизированной системы пожарной безопасности были сформированы классификаторы пожароопасных событий и классификаторы пожароопасных узлов. В результате анализа данных по пожарам с помощью классификаторов событий и узлов были построены цепи пожароопасных событий, каждому из которых соответствовали определенные узлы.

Дальнейший анализ посвящен построению типовых цепей событий. Под цепью событий понимается последовательность с конечным или счётным бесконечным числом событий, характеризующаяся тем свойством, что, говоря нестрого, состояние, которое встречается перед или после функционирования ТПС, соответствует определённому набору параметров, которые не зависят от состояния локомотива до формирования цепи событий.

Объект анализа – цепь событий – частично упорядоченное множество. *Задача анализа* – выработать правила поиска общих признаков в цепях событий и формирование цепей с общим признаком сценариев типовых событий. Для осуществления задачи анализа будет оцениваться близость цепей событий кластерным анализом.

Формализуем ряд понятий:

Z – частично упорядоченное множество всех цепей событий.

A_i – частично упорядоченное подмножество (далее – ЧУП) множества Z i -ого типа.

B_j – ЧУП множества Z .

Каждое подмножество B_j можно заменить на универсальное подмножество, характеризующее множество i -ого типа (A_i подмножество).

Расстояние между двумя подмножествами B_k и B_l , характеризующее близость подмножеств, рассчитывается по формуле (1.1):

$$d_{lk} = \sum_{i=1}^5 r_i \quad (1.1)$$

Где

$$r_i = \begin{cases} 0, & x_{ki} = x_{li} \\ 1, & x_{ki} \neq x_{li} \end{cases}$$

x_{ki} – событие на i -ом месте в подмножестве B_k ;

x_{li} – событие на i -ом месте в подмножестве B_l .

Объединив подмножества B_j по признаку d_{lk} , получим кластер. В таблице 2 представлено соответствие значения признака d_{lk} и уровня схожести.

Таблица 2 – Расстояние между подмножествами и уровень схожести.

	d				
	1	2	3	4	5
Уровень схожести	Сильная	Заметная	Незначительная	Слабая	Нет

Для формирования цепочек с общим признаком сценариев типовых событий подмножества брались с уровнем схожести «сильная» и «заметная».

Результат формирования кластеров событий представлен в таблице 3. Мощность кластера – количество входящих и совпадающих цепочек событий. ПС – пожароопасное событие.

Аналогичным образом формировались типовые группы узлов пожаров. Для построения типовых сценариев развития пожара на тепловозах был проведен анализ соответствий типовых групп узлов пожарам из кластера событий. Если пожарам из типовых групп узлов соответствуют пожары из кластера событий, значит, из них можно сформировать сценарий. Часто реализуемые сценарии формируются при соответствии хотя бы 4 пожаров. Число соответствующих пожаров – мощность сценария. В таблице 4 приведены примеры сформированных сценариев пожара на тепловозах.

Результатом анализа нечисловых данных являются сценарии пожара, включающие узлы и последовательности событий, приводящих к пожару. При оценке пожарного риска по фактическому состоянию ТПС должны учитываться те состояния, которые влияют на вероятность появления описанных сценариев пожара.

Таблица 3 – Пример объединенных в кластеры событий

Кластер №	Мощность	Года/месяцы		ПС1	ПС2	ПС3	ПС4	ПС5
1	8	2014 октябрь	Центр кластера	Разрушение, излом	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2013 март	Элементы кластера	Отсутствие (детали)	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2013 май		Повреждение	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2014 апрель		Применение нетиповых деталей	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2013 май		Применение нетиповых деталей	Искрение	Попадание искр	Попадание искр	Искра
		2014 март		Неисправность	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2014 апрель		Повреждение	Искрение	Попадание искр	0	Искра
		2013 июль		Разрушение, излом	Искрение	Попадание искр	0	Искра

Таблица 4 – Сформированные сценарии пожаров на тепловозах с уровнем мощности 5.

Сценарий	Узлы	События				Мощность
1	Выхлопная система дизеля	Отсутствие (детали)	Повреждение	Применение нетиповых деталей	Разрушение, излом	4
	система охлаждения	Искрение	Попадание искр			
2	Топливная система	Отсутствие (детали)	Неправильный монтаж	Повреждение / износ (старение)	Излом	4
	Выхлопная система, дренажная система	Нагревание легковоспламеняющихся материалов и веществ, их попадание на горячие части локомотива				
3	Электрооборудование	Нарушение изоляции / перетираание, пробой	КЗ проводов	КЗ на корпус	Нагрев	8

Определение характера наблюдаемых данных

К числовым характеристикам пожарной безопасности ТПС относится количество пожаров за период наблюдения с 2011 по 2015 год. Интервал наблюдения – месяц. Перед тем, как подвергнуть результаты наблюдений соответствующей статистической обработке, необходимо убедиться в том, что они действительно образуют случайную выборку, т.е. являются стохастически независимыми (альтернативами могут быть зависимость результатов наблюдения от порядкового номера, времени наблюдения, наличие смещение циклического или монотонного характера) [7]. Для этого наблюдаемый ряд выборочных данных проанализируем с помощью критерия «восходящих» и «нисходящих» серий. Это критерий выбран, т.к. он «улавливает» постепенное смещения (по ходу выборочного обследования) среднего значения в исследуемом распределении периодического характера. Исходной последовательности (количество пожаров в месяц) ставится в соответствие последовательность плюсов и минусов. На i -ом месте последовательности ставится плюс, если $x_{i+1} - x_i > 0$, минус, если $x_{i+1} - x_i < 0$. Если два или несколько следующих друг за другом наблюдений равны между собой, то во внимание принимается только одно из них, другие исключаются из последовательности.

Критерий серий основан на утверждении: если выборка случайна, то в образованной ею последовательности знаков общее число серий ($v(n)$) не может быть слишком малым, а их протяженность ($t(n)$) – слишком большой. В количественном выражении это правило имеет вид:

$$v(n) > \left[\frac{1}{3}(2n-1) - U(\alpha) \sqrt{\frac{16n-29}{90}} \right]$$

$$t(n) < t_0(n)$$

Величина $t_0(n)$ в зависимости от величины последовательности (n) определяется следующим образом: при $n \leq 26$ $t_0(n) = 5$; при $26 < n \leq 153$ $t_0(n) = 6$; при $153 < n \leq 1170$ $t_0(n) = 7$.

Анализ временного ряда пожаров показал, что последовательность количества пожаров – случайная выборка. Это означает, что дальнейший анализ должен осуществляться методами прикладной статистики, в т.ч. для прогнозирования случаев пожара должны быть оценены верхние и нижние границы вероятности этого события. Особенности оценки вероятности возникновения пожаров на тепловозах различных серий подробно изложены в статье [8] и подробно рассматриваться в рамках этой статьи не будет. Результаты оценок вероятности появления пожара используются как один из ключевых факторов при построении модели оценки рисков.

Заключение

Показана необходимость разработки алгоритма для выбора метода анализа неструктурированных данных об объекте при наличии нескольких источников информации. Определены основные методы анализа с учётом наличия данных числового и не числового характера. Продemonстрировано последовательное применение методов качественного и полуквантитативного анализа данных без явных связей с группировкой и классификацией полученных результатов. Применен метод кластерного анализа нечисловой статистики для формирования типовых сценариев появления пожара.

Системный подход к применению различных видов анализа позволяет определить перечень параметров ТПС, которые будут учитываться при оценке рисков, установить шкалу измерений и характер наблюдаемых величин.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ
2. Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта/Надежность. 2017 г. – №1, -С 40-45.
3. Герцог, Г.А. Основы научного исследования: методология, методика, практика [Текст]: учебное пособие /

Г.А. Герцог. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2013. – 208 с.

4. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Часть 3: Статистические методы анализа данных./ А.И. Орлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 623 с.

5. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза [Текст]/ И.Б. Шубинский – М: Журнал Надежность, 2016 – 544 с.

6. Орлов А.И. Эконометрика; учебник для вузов / А.И. Орлов Изд. 4-е, дополн. и перераб. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 572 с.

7. Айвазян С. А. и др. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 471 с.

8. Шубинский И.Б., Проневич О.Б., Данилова А.Д. Особенности оценки вероятности возникновения пожаров на тепловозах различных серий // Надежность. 2016. № 4 С. 24-29.

Сведения об авторах

Ольга Б. Проневич – начальник отдела ОАО «НИИ-АС», Москва, Россия, тел. (495) 967-77-05, доб. 516, e-mail: O.Pronevich@vniias.ru

Поступила 17.04.2017