

Индикаторный подход в управлении безопасностью объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта

Леонид А. Баранов, Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, Москва

Владимир В. Кульба, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Российская Федерация, Москва

Алексей Б. Шелков, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Российская Федерация, Москва

Дмитрий С. Сомов, ПАО Сбербанк, Российская Федерация, Москва



Леонид А. Баранов



Владимир В. Кульба



Алексей Б. Шелков



Дмитрий С. Сомов

Резюме. Целью настоящей статьи является разработка методов анализа и моделирования процессов возникновения и развития нештатных ситуаций на сложных технических объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта. Приведены результаты анализа угроз, причин и последствий возникновения внезапных чрезвычайных ситуаций на сложных технических объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта. Для решения задач обеспечения безотказного функционирования технических объектов, а также своевременной идентификации неполадок предложено использовать индикаторный подход, позволяющий осуществлять диагностирование и формальный анализ процессов возникновения и распространения неисправностей по элементам сложных технических систем. Для моделирования процессов распространения возникающих в результате технических неполадок возмущений (угроз возникновения чрезвычайных ситуаций) предложено использовать теоретико-графовый подход, предполагающий модельное и визуальное представление структуры исследуемой технической системы в виде ориентированного графа, отражающего взаимосвязи между ее элементами. Каждой вершине и дуге графа присваиваются некоторые параметры или функционалы, отражающие процессы взаимосвязанного функционирования элементов моделируемой системы. Распространение возмущений в системе моделируется импульсными процессами, запускаемыми в одной или нескольких исходных вершинах. В статье приведены разработанные формализованные модели распространения возмущений в технической системе на основе построения структурных компонент и матриц взаимосвязи. Введено понятие критического элемента технической системы, с использованием которого идентифицируется событие ее выхода из строя. Выделены два базовых критерия отказа технической системы: исключительный (система считается вышедшей из строя, если возмущение достигло любого из критических элементов) и абсолютный критерий (отказ наступает в случае, если возмущение достигло заданного подмножества критических элементов). В работе приведен аналитический пример, иллюстрирующий возможности предложенной модели распространения возмущений по структуре технической системы. Для решения задачи повышения эффективности диагностирования угроз возникновения чрезвычайных ситуаций на технических объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта предложена модель использования структурно-интегрированных индикаторов, сущность которой состоит в том, что в структуре технической системы предлагается размещать индикаторы, оперативно передающие необходимую и достаточную информацию в случае возникновения нештатной ситуации. Основная задача при этом состоит в формировании некоторого множества индикаторов, основной целью которого является снижение информационной нагрузки и фокусировка внимания диспетчеров или операторов на ключевых с точки зрения обеспечения безаварийности и безопасности процессах, происходящих в технической системе. Выделены базовые критерии формирования множества индикаторов в сложной технической системе: максимум достоверности оценки последствий возникших возмущений, максимум точности определения причин возникновения нештатной ситуации, минимум времени обнаружения нештатной ситуации, минимум единовременных или текущих затрат. Приведена модифицированная графовая модель распространения возмущений в сложной технической системе, являющаяся основой для решения многокритериальных задач оптимального размещения индикаторов в структуре технических систем по критериям полноты, точности и своевременности обнаружения отказов различного типа. Автоматизация процессов формирования множества индикаторов с применением моделей распространения возмущений в технических системах позволит использовать предложенные методы в рамках развития методологии УРРАИ в части совершенствования технологий поддержки принятия решений в процессе управления объектами инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: управление, железнодорожный транспорт, объект инфраструктуры, техническая система, нештатная ситуация, датчики, индикаторы, моделирование.

Формат цитирования: Баранов Л.А., Кульба В.В., Шелков А.Б., Сомов Д.С. Индикаторный подход в управлении безопасностью объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта // Надежность. 2019. №2. С. 33-41. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-33-41

Введение

Актуальность проблем обеспечения высокого уровня безопасности на железнодорожном транспорте в настоящее время существенно возрастает. Железные дороги, являясь важнейшей составной частью транспортного комплекса России, играют исключительно важную роль в процессах социально-экономического развития страны, поскольку данному виду транспорта по объему и структуре грузовых и пассажирских перевозок фактически отсутствует альтернатива. Ведущая роль железнодорожного транспорта определяется также характерными для нашей страны значительными расстояниями перевозок, удаленностью основных объектов добывающей промышленности и источников сырьевых ресурсов от пунктов их переработки и потребления, а также морских портов, недостаточным развитием инфраструктуры других видов транспорта в имеющих стратегическое значение для развития нашей страны регионах Сибири и Дальнего Востока. От состояния, безопасности и качества работы железнодорожного транспорта зависят не только перспективы дальнейшего социально-экономического развития, но также возможности государства эффективно выполнять такие важнейшие функции, как защита национального суверенитета и безопасности страны, обеспечение потребности граждан в перевозках, создание условий для выравнивания уровня развития регионов и т.д.

В 2010 г. профильными организациями и подразделениями ОАО «Российские железные дороги» развернуты и в настоящее время активно продолжаются работы по созданию и широкому внедрению комплексной системы управления надежностью, ресурсами и функциональной безопасностью на железнодорожном транспорте УРРАН («Управление ресурсами, рисками и надежностью на стадиях жизненного цикла объектов инфраструктуры и подвижного состава») [1]. Данная система фактически реализует интегрированную технологию управления надежностью, ресурсами и функциональной безопасностью на железнодорожном транспорте и по сути является развитием методологий RAMS (безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности) и LCC (стоимости жизненного цикла).

Основными стратегическими целями обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте являются [2]:

1. Повышение эффективности основной деятельности, использования пропускных и провозных способностей инфраструктуры, технической надежности и готовности основных средств;

2. Обеспечение качества продуктов, услуг и процессов;

3. Обеспечение безопасности перевозок.

Производственно-технологический комплекс железнодорожного транспорта представляет собой широкомасштабную территориально распределенную многопрофильную инфраструктуру, включающей целый комплекс различных по назначению и решаемым технологическим задачам хозяйств ОАО «РЖД» (хозяйства пути и сооружений, автоматики и телемеханики, связи, электрификации и электроснабжения; локомотивное, вагонное и пассажирское хозяйства). При этом уровень сложности входящих в состав перечисленных хозяйств технических систем непрерывно возрастает, что неизбежно приводит к увеличению количества и разнообразия рисков различного типа, сопутствующих производству, наладке, техническому обслуживанию, эксплуатации и модернизации этих систем [3].

Обеспечение безопасности и надежности становится исключительно актуальным в условиях использования «беспилотных» транспортных средств. Международной ассоциацией общественного транспорта (International Association of Public Transport) рассматривается 5 уровней автоматизации управления движением поездов (от GO A0 до GO A4). При реализации уровня GO A4 на подвижном составе нет эксплуатационного персонала. В этих условиях централизованные системы автоматического управления движением поездов метрополитенов должны содержать подсистемы, обеспечивающие полноту, точность и своевременность обнаружения отказов различного типа и превентивное принятие решения [4].

В настоящее время с развитием современных технологий фактически происходит одновременное увеличение числа задействованных элементов в технических системах (размерностная сложность), рост разнообразия структур взаимодействия элементов таких систем (структурная сложность) и повышение разнообразия форм и способов этого взаимодействия (функциональная сложность). Это существенно повышает уровень сложности постановки и решения комплекса задач обеспечения надежного функционирования сложных технических систем (СТС), входящих в состав объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта (ОИЖТ), поскольку в зависимости от их структурных и функциональных особенностей проявление рисков и характер распространения сбоев и отказов в рассматриваемых системах может быть различным [5]. При этом реализация рисков может заключаться в возможности нарушения нормального функционирования или выхода из строя как отдельного узла, так и всей системы в целом.

В настоящей работе основное внимание уделено разработке методов моделирования и анализа процессов

возникновения и развития нештатных ситуаций на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе индикаторного подхода.

1. Моделирование процессов распространения возмущений по технической системе

Обширный опыт эксплуатации СТС различного класса и назначения показывает, что возникновению сбоев и отказов различной природы, а также возникающих по этой причине происшествий и аварийных ситуаций, которые далее для краткости будем называть внезапными чрезвычайными ситуациями (ВЧС), как правило, предшествует фаза накопления каких-либо дефектов в технологическом оборудовании или отклонений в протекании того или иного технологического процесса [6]. Длительность данной фазы может очень существенно различаться (от минут до суток). При этом на первом этапе сами по себе дефекты или отклонения не представляют непосредственной угрозы возникновения ВЧС. Происходящие на практике процессы накопления подобных отклонений от нормы связаны, как правило, либо с не наблюдаемостью работы элементов и подсистем СТС из-за отсутствия эффективных средств мониторинга и диагностики, либо, что бывает гораздо чаще, с тем, что персонал привыкает к такого рода отклонениям, поскольку они далеко не всегда приводят к авариям. На следующей фазе происходит внезапное так называемое инициирующее событие, которое приводит к лавинообразному развитию неблагоприятных процессов и возникновению ВЧС, последствия которой существенно усугубляются отсутствием организационно-технических механизмов противодействия, а также недостатком времени и ресурсов для его эффективного осуществления. Очевидно, что возникающая на третьей фазе как результат быстрого развития событий ВЧС в абсолютном большинстве случаев была бы невозможной без накопления отклонений и ошибок на первой стадии.

Таким образом, одной из основных задач обеспечения безотказного функционирования СТС является своевременная идентификация неполадок, иных нарушений в работе технической системы, предаварийных (аварийных) ситуаций и передача информации об их возникновении в системы визуализации, диспетчеризации и ситуационного управления различного уровня (лицам, принимающим решения (ЛПР), диспетчерам, операторам, и т.д.). Как правило, источниками информации о возможных нештатных отклонениях (неполадках) в работе СТС или их подсистем (узлов) являются датчики – элементы системы, способные регистрировать различные параметры состояния самой системы, ее окружающей среды, параметры функционирования СТС и др.

Возникающую в результате появления неполадок опасность возникновения сбоя, отказа, аварии, ВЧС или иного нарушения нормального функционирования

СТС, которое было зарегистрировано датчиком, будем называть угрозой. При этом будем предполагать, что возникновение некоторой угрозы приводит к возникновению процессов распространения возмущения по структурным элементам СТС в соответствии со схемой их взаимодействия. Поскольку угрозы в соответствии с приведенным выше определением могут иметь различную природу (тип, характер возникновения и проявления и т.п.), то и элементы СТС могут взаимодействовать между собой в процессе распространения возмущений различным образом. Как следствие, для каждого типа угрозы взаимодействие элементов системы будет происходить по различным схемам. Соответственно, по различным путям будет происходить и распространение возмущения по элементам СТС.

Технические системы высокой структурной, размерной и функциональной сложности обычно наделяются достаточно большим количеством датчиков, что существенно затрудняет осуществление качественного контроля их показаний, диагностирование возникающих нештатных ситуаций, а главное – своевременное принятие точных управляющих решений в случае отклонения их показаний от нормы и особенно – появления угрозы возникновения ВЧС. Таким образом, возникает задача выбора структуры информационной системы диспетчерского или ситуационного управления, позволяющей снизить нагрузку на оператора с целью увеличения скорости его реакции на возникающие нештатные ситуации без существенной потери уровня информированности о протекании наиболее существенных с точки зрения обеспечения безопасности процессов в СТС [5, 7–8].

При моделировании распространения возмущений, вызванного угрозой, будем использовать теоретико-графовый подход. Представление структуры исследуемой системы в виде графа в настоящее время достаточно широко используется в качестве одного из подходов к визуальному и модельному представлению связей между элементами различных, в том числе технических, систем. При этом в общем случае структура системы в зависимости от моделируемого процесса или явления может быть как жестко фиксированной, так и претерпевать определенные регулярные изменения (что характерно для динамических систем).

Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что структура системы и взаимодействие ее элементов в процессе эксплуатации представляются в виде ориентированного графа. Каждой вершине и дуге графа присваиваются некоторые параметры и функционалы, адекватно описывающие процессы функционирования элементов моделируемой системы. Начальный импульс (возмущение), приложенный к одной или группе вершин, распространяется по всему графу, изменяя параметры вершин. При этом в общем случае может меняться и величина самого импульса в соответствии с функционалами, присвоенными дугам графа. В процессе моделирования используется дискретное время с фиксированным шагом Δt . Данный подход в моделиро-

вании динамических систем в настоящее время нашел применение в целом ряде предметных областей [9].

Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество элементов модели, где n – их число. В каждый момент времени любой элемент модели может принимать значения 0 или 1. Единица соответствует активированному состоянию (до элемента дошло возмущение), ноль соответствует неактивному состоянию. Состояние элемента a_i в момент времени t будем обозначать $a_i(t)$, а через $\bar{A}(t)$ будем обозначать вектор–строку $(a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t))$ состояний элементов модели. Множество датчиков образует подмножество элементов модели $A \supseteq D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_D}\}$, где n_D – количество датчиков.

Назовем матрицей смежности M квадратную бинарную матрицу $n \times n$, проиндексированную по обоим осям множеством элементов модели. В позиции (i, j) , $i, j \in \bar{1}, n$ матрицы смежности содержится запись 1 тогда и только тогда, когда между собой элементы a_i и a_j модели связаны отношением R_1 таким, что если в момент времени t_1 элемент a_i активен, то из этого следует, что в момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$ элемент a_j тоже будет активным. Иными словами, отношение R_1 задает пути распространения возмущения по системе. Отношение R_1 будем называть отношением смежности или отношением достижимости глубины 1. Наличие отношения смежности между элементами модели a_i и a_j будем обозначать $a_i R_1 a_j$, а отсутствие – $a_i \bar{R}_1 a_j$. В случае, если между элементами a_i и a_j отсутствует отношение смежности R_1 , в позиции (i, j) матрицы смежности M стоит 0. Будем считать, что отношение смежности обладает свойством рефлексивности, т.е. $\forall a \in A \quad a R_1 a$. В рамках модели это означает, что однажды активированный элемент остается активированным в течение всего времени моделирования. Для каждого выделенного типа угрозы может быть выделено свое отношение смежности R_1^1, R_1^2, R_1^3 , и т.д. Соответственно, каждому типу угрозы соответствует своя матрица смежности. Матрице смежности M соответствует оргграф причинно-следственных взаимосвязей элементов модели $G(A, R_1)$, вершинами которого является множество элементов модели, а дуга (a_i, a_j) соответствует единице в позиции (i, j) матрицы. Данный граф будем называть оргграфом взаимосвязи.

Активация элементов модели задается булевым уравнением $\bar{A}(t_{i+1}) = \bar{A}(t_i) \times M$. Другими словами, на последующих шагах активируются все элементы модели, соединенные дугами с уже активными элементами. При этом, поскольку диагональные элементы матрицы смежности равны 1, однажды активированные элементы остаются активированными в течение всего моделирования.

Среди множества элементов модели выбрано подмножество датчиков $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_D}\}$. Датчики регистрируют заданные параметры СТС и сигнализируют о возникновении угрозы. Возмущение, вызванное данной угрозой, распространяется от датчиков к другим элементам системы по дугам графа взаимосвязи $G(A, R_1)$. Множество элементов модели, матрица взаимосвязи и

подмножество датчиков определяются совместно с проектировщиком системы по результатам анализа схемы функционирования системы на этапе ее разработки. Также среди элементов модели выделяется подмножество критических элементов $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_K}\}$, определяющих критерий выхода системы из строя. Для каждого типа угрозы (раскраски ребер) можно рассматривать различные наборы критических элементов.

Моделирование начинается с момента t_0 активации первого датчика и продолжается либо до момента стабилизации (прекращения изменения состояния элементов модели), либо до выхода системы из строя в соответствии с выбранным критерием отказа системы.

Момент выхода системы из строя будем обозначать t_s . Критерий выхода системы из строя определяется критическими элементами. В зависимости от особенностей рассматриваемой системы или узла, а также других особенностей решаемой задачи можно выбирать различные критерии оценки выхода системы из строя. Среди них можно выделить два базовых критерия.

1. *Исключительный критерий выхода системы из строя.* Система считается вышедшей из строя, если возмущение достигло любого из критических элементов: $t_s = \min(t : \exists k \in K : k(t) = 1)$.

2. *Абсолютный критерий выхода системы из строя.* Система считается вышедшей из строя, если возмущение достигло заданного подмножества $K^* \subseteq K$ (в вырожденном случае – всех) критических элементов: $t_s = \min(t : \forall k \in K^* : k(t) = 1)$.

Можно также рассматривать и иные критерии, например, связанные с количеством, взаимным расположением и другими параметрами множества критических элементов, до которых дошло возмущение.

Для иллюстрации возможностей предложенной модели распространения возмущений по структуре СТС кратко рассмотрим условный упрощенный пример. Пусть структура системы включает 12 элементов, $n=12$, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{12}\}$. Элементы a_1 и a_2 являются датчиками, $d_1 = a_1$, $d_2 = a_2$, $D = \{d_1, d_2\} = \{a_1, a_2\}$, $n_D=2$. Элементы a_{11} и a_{12} являются критическими элементами, $k_1 = a_{11}$, $k_2 = a_{12}$, $K = \{k_1, k_2\} = \{a_{11}, a_{12}\}$, $n_K=2$. Задана матрица смежности M :

$$M = \begin{array}{c|cccccccccccc} & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Отношение R_1 , задаваемое матрицей M , формирует оргграф взаимосвязи $G(A, R_1)$, представленный на рисунке 1, где датчики обозначены символом окружности \bigcirc , а критические элементы – квадратом \blacksquare . Будем считать, что тип угрозы только один, соответственно, задано одно множество критических элементов, одно отношение смежности и один граф взаимосвязи.

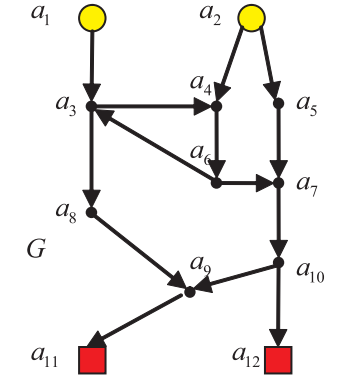


Рисунок 1 – Граф взаимосвязи G

Предположим, что в момент времени $t = t_0$ датчик $d_1 = a_1$ регистрирует угрозу. $a_1(t_0) = 1, a_{i \neq 1}(t_0) = 0, \bar{A}(t_0) = (1, 0, 0, \dots, 0)$.

Тогда, состояния элементов модели в момент времени $t = t_1 = t_0 + \Delta t$ вычисляются следующим образом:

$$\bar{A}(t_1) = \bar{A}(t_0) \times M = (1, 0, 1, 0, 0, \dots, 0).$$

На рисунке 2 изображен процесс распространения возмущений по дугам графа взаимосвязи G от активных элементов (выделены дополнительной окружностью) к неактивным, а также состояния соответствующих элементов модели в различные моменты времени. Возмущение распространяется по дугам графа от активных элементов к неактивным, преодолевая за один шаг времени одну дугу. Состояние элементов в произвольный момент времени определяется булевой формулой $\bar{A}(t_i) = \bar{A}(t_0) \times M^i$.

Строки состояний элементов для различных моментов времени имеют следующий вид:

$$\bar{A}(t_0) = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\bar{A}(t_1) = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\bar{A}(t_2) = (1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0);$$

$$\bar{A}(t_3) = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0);$$

$$\bar{A}(t_4) = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0);$$

$$\bar{A}(t_5) = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0);$$

$$\bar{A}(t_6) = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1).$$

Как видно из рассмотренного примера, в момент времени $t = t_4$ активируется первый критический элемент.

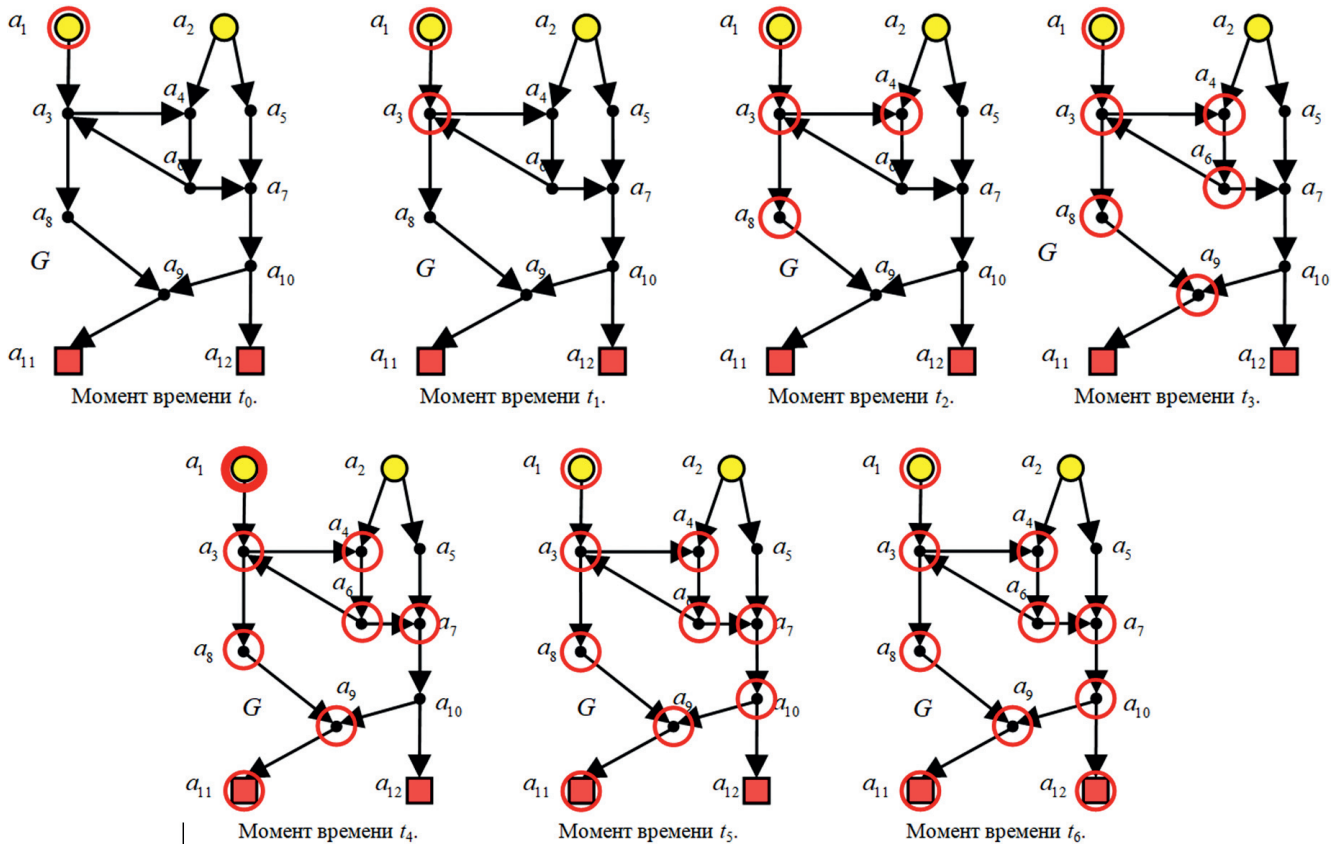


Рисунок 2 – Процесс распространения возмущений по системе

Если в системе используется исключительный критерий выхода системы из строя, то в момент времени t_4 система вышла бы из строя. При абсолютном критерии система выходит из строя в момент времени $t=t_6$.

2. Модели использования индикаторного подхода

Для решения задачи повышения эффективности диагностирования угроз возникновения ВЧС рассмотрим модель использования структурно-интегрированных индикаторов на технических ОИЖТ. Сущность индикаторного подхода состоит в том, что помимо датчиков в структуре технической системы предлагается размещать индикаторы, оперативно передающие необходимую и достаточную информацию в случае возникновения нештатной ситуации в СТС (угрозы возникновения ВЧС) в соответствующие системы визуализации, диспетчеризации или ситуационного управления с целью сигнализации ЛПП (оператору, диспетчеру и т.п.) о необходимости повышенного внимания к сложившейся ситуации или прямого вмешательства.

Основная задача в рамках данного подхода состоит в формировании некоторого множества индикаторов (здесь допустимо использование и общепринятого в организационном управлении и менеджменте понятия «панели индикаторов» [10]), основной целью которого является снижение информационной нагрузки и фокусировка внимания ЛПП (диспетчеров, операторов и т.д.) на ключевых с точки зрения целей задач обеспечения безаварийности и безопасности процессах, происходящих в СТС.

Индикаторы должны выбираться в структуре СТС таким образом, чтобы на основе значений отражаемых ими показателей (параметров) можно было достоверно судить о возникших отклонениях от штатного режима функционирования системы. Таким образом, рассматриваемый подход прежде всего должен в рамках систем контроля, диспетчеризации или ситуационного управления обеспечить оперативное предоставление ЛПП необходимой и достаточной информации о состоянии СТС в наглядной форме, а также возможности оперативного (в том числе сценарного) анализа альтернативных путей развития нештатной ситуации на заданном временном горизонте в управляемой технической системе, что в конечном итоге должно повысить эффективность принимаемых управленческих решений по обеспечению транспортной безопасности.

Для достижения указанных выше целей индикаторы должны быть расположены в структуре СТС таким образом, чтобы сигнализировать ЛПП о возникновении и развитии потенциально опасных ситуаций как можно раньше. Одновременно с этим необходимо отметить, что на ранних стадиях развития ситуации далеко не всегда до конца ясен возможный (наиболее вероятный, пессимистический, оптимистический и т.д.) сценарий развития нештатной ситуации, и, как следствие,

множество последствий может оказаться слишком широким, что не позволит достоверно спрогнозировать последствия и выработать правильное решение. В данном случае требуется оперативный и детальный мониторинг потенциально предаварийного состояния СТС с целью сбора дополнительной информации для ее последующего анализа и выработки соответствующей реакции на возникшие отклонения и угрозы возникновения ВЧС.

Безусловно, не менее важным критерием выбора определенного размещения индикаторов является и стоимость такого размещения. В зависимости от конкретной задачи необходимо учитывать не только количество индикаторов, но и их вес, объем, физическое расстояние между индикаторами, датчиками и т.д. Очевидно, что выбирая множество индикаторов нужно стремиться снизить их общее число, обеспечивая при этом минимально возможное снижение точности и информативности выдаваемых ими данных в системы визуализации, диспетчеризации или ситуационного управления.

На содержательном уровне можно выделить следующие основные критерии формирования множества индикаторов в сложной технической системе.

Достоверность оценки последствий. Набор индикаторов должен быть выбран таким образом, чтобы по их показаниям можно было судить о характере развития ситуации и возможных последствиях с максимальной точностью.

Точность определения причин. Показания индикаторов должны давать возможность не только оперативной идентификации и оценки последствий нештатных ситуаций, но и выявления причин их возникновения. Например, по показаниям индикаторов необходимо обеспечивать возможность определения, с какого узла (элемента) СТС началось распространение негативного воздействия, была ли причина возникших отклонений внешней или внутренней и т.д.

Время обнаружения нештатной ситуации. Индикаторы должны быть выбраны и расположены в структуре СТС таким образом, чтобы выявлять развивающиеся отклонения от нормального функционирования системы на как можно более ранних стадиях для максимизации резерва времени, необходимого на принятие решения оператором системы.

Объем затрат. Выбор и размещение индикаторов в структуре СТС должно быть осуществлено таким образом, чтобы минимизировать единовременные и текущие затраты.

Предложенные критерии в определенном смысле противоречивы, поскольку, например, для максимально точного определения причины возникновения нештатной ситуации, строго говоря, необходимо разместить индикаторы во всех элементах системы, но это приведет к росту стоимости и увеличению информационной нагрузки на ЛПП, росту затрат необходимого ЛПП времени на обнаружение нештатной ситуации и т.п.

Для решения задачи синтеза набора индикаторов модифицируем рассмотренную выше графовую модель распространения возмущений в СТС. Введем понятие времени прохождения дуги, под которым будем понимать положительное число, сопоставленное дуге графа взаимосвязи и означающее время, за которое возмущение перейдет из элемента модели, стоящего в начале дуги, в элемент, стоящий в конце дуги. Для записи времени прохождения дуг будем использовать матрицу временных взаимосвязей M_p , представляющую собой квадратную матрицу $n \times n$, проиндексированную по обеим осям элементами модели. При этом в позиции (i, j) , $i, j \in 1, n$ матрицы временных взаимосвязей размещено время прохождения дуги (a_i, a_j) , если такая дуга существует, и знак бесконечности ∞ , если такая дуга отсутствует.

Назовем матрицей временных расстояний N квадратную матрицу $n \times n$, проиндексированную по обеим осям элементами модели. При этом в позиции (i, j) , $i, j \in 1, n$ данной матрицы стоит временное расстояние между вершинами a_i и a_j графа. Матрица временных расстояний является результатом применения алгоритма нахождения кратчайших расстояний между вершинами Флойда-Уоршелла к матрице временных взаимосвязей [11].

Введем ряд определений, позволяющих сформулировать оптимизационную задачу размещения индикаторов в технической системе. Подмножество индикаторов будем обозначать $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}$. Назовем множеством предшествования времени t вершины a множество всех элементов модели $Bef_t(a)$ таких, что элемент a достижим из них за время, не превышающее времени t . Множеством последствия времени t элемента a назовем множество всех элементов модели $Aft_t(a)$, достижимых из элемента a за время, не превышающее времени t .

Под индикаторным покрытием предшествования времени t будем понимать набор множеств предшествования времени t для всех индикаторов:

$$I_t^{Bef} = \{Bef_t(i_1), Bef_t(i_2), \dots, Bef_t(i_{n_i})\}.$$

Индикаторным множеством покрытия предшествования времени t будем называть объединение множеств элементов модели, входящих в индикаторное покрытие предшествования времени t , или, что то же самое, объединение множеств предшествования времени t всех индикаторов:

$$\overline{I_t^{Bef}} = \bigcup_{j \in n_i} Bef_t(i_j).$$

Аналогично под индикаторным покрытием последствия времени t будем понимать набор множеств последствия времени t для всех индикаторов:

$$I_t^{Aft} = \{Aft_t(i_1), Aft_t(i_2), \dots, Aft_t(i_{n_i})\}.$$

Индикаторным множеством покрытия последствия времени t будем называть объединение множеств элементов модели, входящих в индикаторное покрытие

последствия времени t , или, что то же самое, объединение множеств последствия времени t всех индикаторов:

$$\overline{I_t^{Aft}} = \bigcup_{j \in n_i} Aft_t(i_j).$$

Будем называть общим множеством покрытия предшествования набор множеств предшествования для всех индикаторов заданного для каждого индикатора времени:

$$I_T^{Bef} = \{Bef_{t_1}(i_1), Bef_{t_2}(i_2), \dots, Bef_{t_{n_i}}(i_{n_i})\},$$

где $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_i}\}$ – набор времен множеств предшествования. Аналогично вводится понятие общего индикаторного покрытия последствия:

$$I_T^{Aft} = \{Aft_{t_1}(i_1), Aft_{t_2}(i_2), \dots, Aft_{t_{n_i}}(i_{n_i})\}.$$

Назовем диаметром общего покрытия максимум по всем временам набора

$$T : D(I_T^{Bef}) = D(I_T^{Aft}) = \max_{j \in n_i} (t_j).$$

Аналогично покрытиям времени введем понятие индикаторного множества общего индикаторного покрытия предшествования и последствия:

$$\overline{I_t^{Bef}} = \bigcup_{j \in n_i} Bef_t(i_j), \quad \overline{I_t^{Aft}} = \bigcup_{j \in n_i} Aft_t(i_j).$$

Будем считать, что решением задачи размещения индикаторов является некоторое подмножество элементов модели $I \subseteq A$. Введем ограничения на множество решений и получим, таким образом, множество допустимых решений.

Количество индикаторов должно быть ограничено. Это ограничение следует из требования снизить информационную нагрузку на оператора. Математически данное ограничение можно записать следующим образом: $|I| = n_i \leq N_i$, где N_i – некоторая константа, заданная при формулировании конкретной задачи.

Набор индикаторов должен покрывать все возможные угрозы, известные на этапе проектирования системы. Другими словами, в терминах рассматриваемой модели, не должно быть ситуаций, при которой возмущение, вызванное датчиком, достигнет критического элемента раньше, чем оно достигнет индикатора. Математическую интерпретацию данного ограничения можно записать следующим образом: $\forall d \in D : Alf(d) \cap K \neq \emptyset \exists i \in I : i \in Aft_s(d)$.

Таким образом, область допустимых решений должна удовлетворять следующим требованиям:

$$I \subseteq A,$$

$$|I| = n_i \leq N_i,$$

$$\forall d \in D : Alf(d) \cap K \neq \emptyset \exists i \in I : i \in Aft_s(d).$$

Сформулируем оптимизационные критерии для поиска оптимального решения среди допустимых решений.

1. *Критерий максимизации допустимого времени на принятие решения.* С точки зрения безопасности функционирования системы и предупреждения выхода ее из строя необходима как можно более ранняя сигнализация об угрозе. Данный критерий состоит в максимизации времени, прошедшего с момента активации критического элемента до наступления критического события и в терминах и обозначениях модели записывается следующим образом:

$$\min_{d \in D, k \in K} \left(\max_{i \in I \cap \text{Alf}(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \right) \rightarrow \max.$$

2. *Полнота покрытия.* Для каждого набора индикаторов определено покрытие множествами предшествования и последствия. Для того чтобы иметь возможность судить как можно более полно о возможных причинах и последствиях текущей ситуации в системе необходимо выбрать индикаторы таким образом, чтобы множество покрытия предшествования и последствия охватывало как можно большую часть элементов модели. Математически это можно записать следующим образом:

$$|I^{Alt}| \rightarrow \max; |I^{Bef}| \rightarrow \max.$$

3. *Точность покрытия.* В предыдущем критерии используется покрытие без учета времени. Но для точного определения развивающейся ситуации необходимо, чтобы индикаторы находились «близко» по времени от возмущения, движущегося по системе. Для этого необходимо, чтобы минимальный диаметр покрытия предшествования или последствия, множество которого покрывает все множество покрытия предшествования I^{Bef} или последствия I^{Alt} был минимальным:

$$\min_{T: I_T^{Alt} = I^{Alt}} (D(I_T^{Alt})) \rightarrow \min; \min_{T: I_T^{Bef} = I^{Bef}} (D(I_T^{Bef})) \rightarrow \min.$$

Сформулируем задачу оптимизации размещения индикаторов.

Пусть задана модель распространения возмущения по технической системе: множество элементов модели $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, подмножество датчиков $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{np}\}$, подмножество критических элементов $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{nk}\}$. Элементы модели связаны в граф взаимосвязей G , времена прохождения дуг заданы матрицей временных взаимосвязей M .

Требуется найти такое подмножество элементов модели (множество индикаторов) $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{ni}\}$, чтобы выполнялись условия:

$$|I| = n_i \leq N_i,$$

$$\forall d \in D: \text{Alf}(d) \cap K \neq \emptyset \exists i \in I: i \in \text{Alf}_s(d).$$

$$\min_{d \in D, k \in K} \left(\max_{i \in I \cap \text{Alf}(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \right) \rightarrow \max,$$

$$|I^{Alt}| \rightarrow \max; |I^{Bef}| \rightarrow \max,$$

$$\min_{T: I_T^{Alt} = I^{Alt}} (D(I_T^{Alt})) \rightarrow \min; \min_{T: I_T^{Bef} = I^{Bef}} (D(I_T^{Bef})) \rightarrow \min.$$

В виду ориентированности на системы высокой структурной, функциональной и размерностной сложности, а также учитывая противонаправленность сформулированных выше критериев, точные алгоритмы решения рассматриваемой задачи будут иметь слишком высокую вычислительную сложность. В силу этого решение данной задачи предложено осуществлять с использованием комбинации различных приближенных алгоритмов, строящих решения по отдельным критериям, либо модифицирующих некоторое заранее заданное по иным критериям эффективности размещение индикаторов [5, 12]. Существенная особенность практического применения алгоритмов решения рассматриваемой задачи заключается в том, что оно должно осуществляться с использованием интерактивных процедур взаимодействия с экспертами или специалистами в заданной предметной области. Такой подход позволяет значительно улучшить качество результатов решения поставленной задачи (вариантов размещения индикаторов) с точки зрения достижения поставленных целей.

Заключение

Основной целью предложенного индикаторного подхода является повышение надежности эксплуатируемых СТС и предотвращение ВЧС за счет раннего диагностирования отклонений от нормального функционирования технических систем. Индикаторный подход обеспечивает возможность снижения информационной нагрузки на ЛПР (диспетчера или оператора), одновременно с этим фокусируя его внимание на наиболее существенных с точки зрения обеспечения безопасности процессах на объекте управления. Рассматриваемый подход также, что не менее важно, позволяет локализовывать с необходимой точностью источники возникновения нештатных ситуаций.

Предложенные модели распространения возмущений в СТС являются основой для постановки и разработки формализованных методов решения задач своевременного выявления нештатных ситуаций в процессе эксплуатации СТС и предотвращения ВЧС. Разработанный индикаторный подход включает комплекс моделей и технологий анализа процессов воздействия угроз и распространения возмущений в сложных технических системах, а также методов решения многокритериальных задач оптимального размещения индикаторов в структуре СТС по критериям полноты, точности и своевременности обнаружения отказов различного типа.

Автоматизация процессов формирования множества индикаторов, а также обработки, визуализации и анализа

их показаний позволит использовать предложенные методы в рамках развития методологии УРРАН в части совершенствования технологий поддержки принятия решений в процессе управления ОИЖТ.

Библиографический список

1. Гапанович В.А. Развитие и внедрение технологии УРРАН на железнодорожном транспорте [Текст] / В.А. Гапанович // Надежность. – 2013. – № 4. – С. 3-17.
2. Гапанович В.А. Система адаптивного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта (проект УРРАН) [Текст] / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг, А.М. Замышляев // Надежность. – 2015. – № 2. – С. 4-22.
3. Кульба В.В. Методология исследования проблем обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте [Текст] / В.В. Кульба, С.А. Косяченко, А.Б. Шелков // Управление большими системами. – 2012. – Специальный выпуск 38 «Проблемы управления на железнодорожном транспорте». – С. 5-19.
4. Баранов Л.А. Автоматическое управление движением поездов отечественных метрополитенов [Текст] / Л.А. Баранов // Мир транспорта. – 2018. – №3. – С. 156-165.
5. Кульба В.В. Использование сценарного и индикаторного подходов для управления живучестью, стойкостью и безопасностью сложных технических систем [Текст]: Научное издание / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.А. Кочкаров, Д.С. Сомов. – М.: ИПУ РАН, 2011. – 116 с.
6. Быков А.А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы [Текст] / А.А. Быков // Проблемы анализа риска. – 2012. – Том 9. – № 3. – С. 4-7.
7. Шульц В.Л. Управление техногенной безопасностью на основе сценарного и индикаторного подходов [Текст]: Научное издание / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков И.В. Чернов, Д.С. Сомов. – М.: ИПУ РАН, 2013. – 116 с.
8. Шульц В.Л. Методология управления техногенной безопасностью объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе индикаторного подхода [Текст] / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков, И.В. Чернов // Тренды и управление. – 2013. – № 3. – С. 4-23.
9. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем [Текст]: в 2-х кн. / Под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы. – М.: Наука, 2012. Кн. 1: –304 с. Кн. 2: – 358 с.
10. Эккерсон У. Панели индикаторов как инструмент управления. Ключевые показатели эффективности, мониторинг деятельности, оценка результатов [Текст] / У. Эккерсон. – М.: Изд-во Альпина Бизнес Букс, 2007. – 396 с.
11. Кормен Т. Алгоритмы. Построение и анализ [Текст]: 3-е издание / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Изд-во Вильямс, 2013. – 1324 с.
12. Кульба В.В. Применение структурно-интегрированных индикаторов в мониторинге сложных технических систем [Текст] / В.В. Кульба, Д.С. Сомов, А.А. Кочкаров. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – № 3(116). – С. 52-65.

Сведения об авторах

Леонид А. Баранов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, Москва, e-mail: baranov.miit@gmail.com

Владимир В. Кульба – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Российская Федерация, Москва, e-mail: kulba@ipu.ru

Алексей Б. Шелков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Российская Федерация, Москва, e-mail: abshelkov@gmail.com

Дмитрий С. Сомов – главный аналитик, ПАО Сбербанк, Российская Федерация, Москва, e-mail: somov.dmitry@gmail.com

Поступила: 27.02.2019