

Система мониторинга для обеспечения функциональной безопасности ответственного технологического процесса движения поездов



Е. Н. Розенберг,
д-р техн. наук, первый
заместитель генерального
директора АО «Научно-
исследовательский
и проектно-
конструкторский
институт
информатизации,
автоматизации и связи
на железнодорожном
транспорте»
(АО «НИИАС»),



З. Б. Хакиев,
канд. физ.-мат.
наук, заместитель
начальника научно-
технического комплекса
интеллектуальных систем
контроля и управления
АО «НИИАС»,



В. С. Кузьмин,
ведущий специалист
АО «НИИАС»

В настоящее время необходимо сформировать новую стратегию обеспечения безопасности ответственного технологического процесса движения поездов и найти технические решения, способные в реальном времени всесторонне анализировать изменения характеристик инфраструктуры и окружающей среды на предмет возникновения рисков.

Современный этап развития технических средств железнодорожного транспорта характеризуется активным применением современных цифровых решений, внедрением систем радиоблокировки и комплексных систем с использованием радиоканала — «виртуальной сцепки», реализацией проектов полной автоматизации процесса ведения поезда на основе систем машинного зрения [1, 2]. При этом в рамках ответственного технологического процесса движения поездов продолжают применяться системы регулирования, способные обнаруживать ограниченный набор переменных препятствий движению подвижного состава (ПС) по заданному маршруту с максимальными скоростями, например, другой подвижной состав или излом рельса.

Между тем на уровень допустимой скорости и маршруты передвижений ПС могут влиять и иные факторы, связанные с отклонением собственных параметров задействованной стационарной инфраструктуры, подвижного состава и возимого оборудования от допустимых значений. Случаи изменения алгоритма функционирования самих систем регулирования движения поездов, а также нынешний уровень производственного травматизма требуют от разработчиков систем регулирования и управления на железнодорожном транспорте поиска и реализации новых методов обеспечения нормативного уровня безопасности ответственного технологического процес-

са движения поездов за счет обеспечения функциональной безопасности [3, 4].

Основным источником информации о внешней среде и текущем техническом состоянии железнодорожной инфраструктуры, задействованной в ответственном технологическом процессе и оказывающей влияние на уровень его безопасности, следует считать системы технической диагностики и мониторинга (СТДМ). В настоящее время они применяются для организации процесса технического обслуживания оборудования методом «по состоянию» [5–7]. Несмотря на наметившийся переход к интегрированным техническим решениям (средства контроля технического состояния все чаще объединяются непосредственно с контролируемыми объектами в рамках единого программно-аппаратного комплекса), информация от СТДМ пока не используется для формирования приказов разрешения на движение в системах регулирования и управления движением поездов [8].

Следует отметить, что ранее вопросы обеспечения функциональной безопасности для железнодорожного транспорта разрабатывались прежде всего в отношении таких объектов, как отдельные компоненты, конструктивные узлы и блоки систем автоматики и телемеханики [9]. Использование методов обеспечения функциональной безопасности по отношению к таким сложным объектам, как оборудованные средствами автоматизации железнодорожные линии или в целом сети железных дорог, ранее не рассматривалось.

Между тем такой подход представляется актуальным, поскольку оборудованные средствами автоматизации железнодорожная линия или сеть дорог представляют собой не что иное, как функционально законченное устройство, и от классических предметов рассмотрения функциональной безопасности отличаются только уровнем сложности своей структуры. По отношению к подобным объектам вполне справедливы суждения об их устойчивости и безопасности.

Учитывая это, требуется пересмотреть основные концептуальные положения теории обеспечения функциональной безопасности и перенести их на новый, полигонный уровень. Для этого первоначально следует определить потенциал применения данных, получаемых от СТДМ для обеспечения безопасной реализации технологического процесса движения поездов.

Проблема обеспечения функциональной безопасности технологического процесса движения поездов

Одной из базовых составляющих обеспечения функциональной безопасности рассматриваемого ответственного технологического процесса являются системы регулирования и управления движением поездов. Большинство из них, эксплуатируемых в настоящее время, характеризуются достаточно простыми, жесткими (закрепляемыми на весь период эксплуатации) логическими функциями безопасности, базирующимися на анализе текущей, а в ряде случаев и предшествующей поездной обстановки, а также текущего состояния элементов инфраструктуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

При синтезе таких систем всегда рассматривался весьма ограниченный набор опасных дестабилизирующих факторов. При этом предполагается, что внешняя среда — иная инфраструктура железнодорожного транспорта, техническое обслуживание, ремонт и пр. — практически не изменяется во времени и вследствие этого не оказывает влияния на функционирование систем и устройств обеспечения безопасности движения поездов. Это положение подтверждается результатами анализа современного уровня техники в данной области, изложенными в ряде работ [10–12].

Полагаем, что такой подход не совсем корректен. Условия окружающей среды, в которой эксплуатируются системы ре-

гулирования и управления движением поездов, существенно изменяются за срок их эксплуатации. В частности, меняется уровень квалификации персонала, возникают риски вмешательства в работу оборудования с целью перевода технологического процесса движения поездов в опасное состояние, появляются новые виды рисков, которые ранее не учитывались при создании систем обеспечения безопасности движения поездов.

При этом частота выявления новых рисков постоянно увеличивается, поэтому можно утверждать, что используемые функции безопасности должны непрерывно совершенствоваться, учитывая факторы, связанные с окружающей по отношению к системам регулирования и управления движением поездов средой.

Влияние новых рисков разработчики стремятся компенсировать развитием системы терминалов для сбора и обработки информации о текущем состоянии объектов инфраструктуры. При этом наиболее перспективным направлением работ выглядит развертывание систем технического зрения на тяговом подвижном составе [13, 14].

Однако размещение систем технического зрения на движущемся ПС может быть неэффективным для контроля отсутствия зажатия человека автоматическими дверями вагона или его падения на пути и другие, о которых часто упоминают специалисты при решении задач синтеза систем регулирования движения поездов, используемых преимущественно в пассажирском сообщении [15, 16]. С учетом этого разработчики параллельно создают технические решения, связанные с использованием стационарных видеокамер [17].

Несмотря на возможность контролировать на некотором расстоянии нахождение в границах габарита приближения строений объектов, представляющих угрозу безопасности движения поездов, или, наоборот, для которых движущийся подвижной состав представляет угрозу наезда, данное направление не позволяет учитывать и прогнозировать возникновение иных видов препятствий, связанных с изменением технического состояния объектов инфраструктуры: технического состояния мостов, тоннелей и иных сложных конструкций.

При синтезе системы терминалов для сбора и обработки информации зачастую не учитывается влияние уровня транспортной безопасности на техноло-

гический процесс движения поездов, не рассматривается контроль нахождения и перемещения персонала в зоне движения поездов.

В качестве источника информации о таких препятствиях могут рассматриваться уже упомянутые СТДМ. При этом в рамках настоящей работы под ними следует понимать не только привычные нам системы диагностики и мониторинга аппаратных и программных средств объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, но и системы мониторинга транспортной безопасности, обнаружения признаков асоциального поведения пассажиров и иные системы, позволяющие обнаруживать потенциальные источники дестабилизирующих в отношении штатного протекания ответственного технологического процесса движения поездов факторов.

Существующие СТДМ применяются преимущественно для контроля технического состояния оборудования при организации его обслуживания и ремонта «по состоянию». Как правило, речь идет о стационарной инфраструктуре железных дорог [18]. Реже системы мониторинга используются для контроля полноты и правильности процесса технического обслуживания и ремонта сложных систем и устройств [19].

Анализ тенденций развития СТДМ указывает на расширение перечня контролируемых ими параметров. Реализуются программно-аппаратные комплексы для прогнозирования технического состояния объектов инфраструктуры [20]. Создаются комплексные системы, контролирующие несколько разнородных объектов, принимающих участие в процессе движения поездов [21, 22].

Взаимосвязь между полнотой контроля технического состояния транспортного комплекса и вероятностью возникновения опасного внештатного состояния технологического процесса движения поездов

Одной из основных характеристик системы контроля и мониторинга является полнота (глубина) контроля [23]. Полнота контроля g определяется согласно выражению

$$g = \frac{1 - P_K(t)}{1 - P_O(t)}, \quad (1)$$

где $P_K(t)$ — вероятность безотказной работы контролируемой части системы или устройства; $P_O(t)$ — вероятность безотказной работы объекта контроля.

Очевидно, что чем выше полнота контроля, тем оперативнее (за счет существенного сокращения времени на поиск) устраняется отказ и тем меньше вероятность возникновения опасного нештатного состояния технологического процесса, вызванного таким скрытым отказом.

Чтобы показать влияние полноты контроля инфраструктуры и подвижного состава на функциональную безопасность соответствующего транспортного комплекса и реализуемого в его рамках технологического процесса, разработана марковская модель, граф состояний для которой приведен на *рис. 1* [24].

Транспортная система, представляющая собой обособленный участок железнодорожной линии, в границах которого находится некоторое фиксированное число единиц подвижного состава, в каждый момент времени может пребывать только в одном из следующих состояний:

1 — транспортный комплекс (инфраструктура, подвижной состав и система технической диагностики и мониторинга) на рассматриваемом участке полностью работоспособны;

2 — обнаружен отказ инфраструктуры или подвижного состава, система технической диагностики и мониторинга исправна;

3 – инфраструктура или подвижной состав имеют скрытый отказ, система технической диагностики и мониторинга исправна;

4 — инфраструктура и подвижной состав выведены из эксплуатации и находятся на профилактике, предшествующее состояние — полная работоспособность транспортного комплекса;

5 — в транспортном комплексе имеется скрытый отказ инфраструктуры или подвижного состава, а также отказ системы технической диагностики и мониторинга;

6 — в транспортном комплексе имеется отказ системы технической диагностики;

7 — транспортный комплекс находится в опасном состоянии: произошел сход или столкновение подвижного состава;

8 — обнаружен отказ системы технической диагностики и мониторинга; скрытый отказ инфраструктуры или подвижного состава не обнаружен;

9 – обнаружен отказ системы технической диагностики и мониторинга, инфраструктура и подвижной состав исправны;

10 — инфраструктура и подвижной

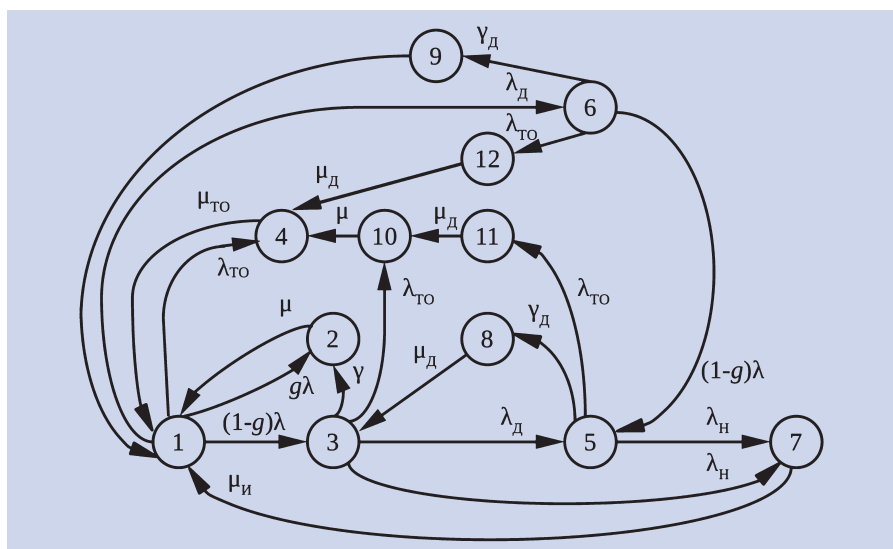


Рис. 1. Граф состояний участка железнодорожной линии

состав имеют скрытый отказ, выведены из эксплуатации и находятся на профилактике;

11 – инфраструктура и подвижной состав имеют скрытый отказ, выведены из эксплуатации и находятся на профилактике, система технической диагностики и мониторинга имеет отказ;

12 — инфраструктура и подвижной состав выведены из эксплуатации и находятся на профилактике, обнаружен отказ системы технической диагностики и мониторинга.

На рис. 1 приняты следующие сокращения:

g — полнота контроля; доля контролируемых отказов инфраструктуры и железнодорожного подвижного состава (при необходимости может также использоваться как показатель достоверности, а именно как доля достоверно обнаруживаемых отказов инфраструктуры и подвижного состава);

λ — интенсивность возникновения отказов инфраструктуры и подвижного состава;

$\lambda_{\text{ТО}}$ — интенсивность постановки инфраструктуры и подвижного состава на профилактику;

$\lambda_{\text{н}}$ — интенсивность возникновения опасного состояния транспортного комплекса (реализуемого в его рамках ответственного технологического процесса движения поездов) — схода или столкновения подвижного состава;

λ_d — интенсивность возникновения отказов системы технической диагностики и мониторинга;

μ — интенсивность устранения отказов инфраструктуры и подвижного состава;

$\mu_{\text{то}}$ — интенсивность проведения профилактики инфраструктуры и подвижного состава;

$\mu_{и}$ — интенсивность восстановления инфраструктуры и подвижного состава после схода или столкновения;

μ_d — интенсивность восстановления системы технической диагностики и мониторинга;

γ — интенсивность обнаружения скрытых отказов инфраструктуры и подвижного состава;

γ_d — интенсивность обнаружения отказов системы технической диагностики и мониторинга.

При этом граф состояний построен при следующих допущениях:

- любой обнаруженный отказ инфраструктуры или подвижного состава не влияет на уровень безопасности движения поездов (иными словами, любой обнаруженный отказ принимается во внимание при проверке условий по безопасности, сопутствующей формированию приказа разрешения на движение, изменить правила проверки условий по безопасности, равно как и исказить или подменить информацию о техническом состоянии, невозможно);

- информация, получаемая от исправной системы технической диагностики, является абсолютно достоверной, вероятность пропуска отказа равна нулю;

- отказ системы технической диагностики и мониторинга сам по себе не приводит к опасному состоянию движения поездов на рассматриваемом участке;

- профилактика инфраструктуры и всего обращающегося по ней подвижного состава осуществляется одновременно;

• опасное нештатное состояние технологического процесса движения поездов возможно только при наличии скрытого отказа инфраструктуры или подвижного состава (опасные ошибки оператора полностью парируются техническими средствами).

Для определения влияния полноты контроля отказов инфраструктуры на вероятность схода или столкновения подвижного состава для ранее приведенного графа состояний (рис. 1) может быть составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова. Для сокращения числа вычислений (все состояния, кроме 1 и 7, не представляют интереса для решаемой в настоящей работе задачи) из графа состояний на основе элементарных преобразований был получен новый граф (рис. 2). Здесь приняты следующие обозначения:

$$a = \frac{A_7(1 - A_4) + A_2A_5}{(1 - A_1)(1 - A_4)}, \quad (2)$$

$$b = \frac{A_6(1 - A_1)(1 - A_4)}{(1 - A_1)(1 - A_4) - A_2A_3}, \quad (3)$$

где $A_1 = \lambda\mu[g + (1 - g)\gamma] + \lambda_d\mu_d\gamma_d + \lambda_{то}\mu_{то}[1 + \lambda_d\mu_d + (1 - g)\lambda\mu]$;

$A_2 = 2(1 - g)\lambda\lambda_d$;

$A_3 = \mu\mu_d[\gamma\gamma_d + \lambda_{то}\mu_{то}(1 + \gamma_d)]$;

$A_4 = \lambda_d\mu_d\gamma_d$;

$A_5 = \lambda_{н}[1 + \gamma_d\mu_d]$;

$A_6 = \mu_{н}$;

$A_7 = \lambda_{н}(1 - g)\lambda$.

На основе полученного графа состояний (рис. 2) при заданных начальных условиях

$$\begin{cases} p_1(t=0) = 1, \\ p_9(t=0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

и уравнении нормировки

$$p_1(t) + p_9(t) = 1 \quad (5)$$

может быть получено решение системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -ap_1(t) + bp_9(t), \\ \frac{dp_9(t)}{dt} = ap_1(t) - bp_9(t) \end{cases} \quad (6)$$

в виде

$$\begin{cases} p_1(t) = \frac{b}{a+b} + \frac{a}{a+b} \cdot \exp\{-[a+b]t\}, \\ p_9(t) = \frac{a}{a+b} - \frac{a}{a+b} \cdot \exp\{-[a+b]t\}. \end{cases} \quad (7)$$

На основе полученного выражения для $p_9(t)$ были построены серии графиков зависимостей вероятности возникновения опасного состояния от времени при различных показателях полноты контроля g . Соответствующие графики приведены на рис. 3.

Результаты моделирования указывают на то, что увеличение полноты контроля справедливо приводят к сокраще-

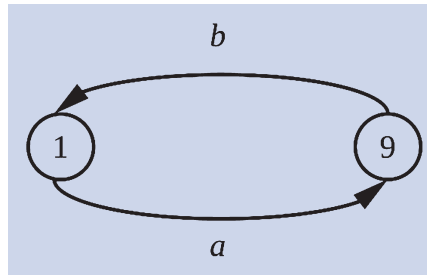


Рис. 2. Преобразованный граф состояний участка железнодорожной линии

нию вероятности возникновения опасного отказа — столкновения или схода подвижного состава.

С учетом этого далее необходимо проанализировать применимость информации, формируемой СТДМ, для обеспечения функциональной безопасности технологического процесса движения поездов, а также определить перспективный облик соответствующей системы управления.

Применимость информации, формируемой СТДМ, для обеспечения функциональной безопасности технологического процесса движения поездов

На основе анализа материалов, изложенных в открытых источниках, можно выделить следующие основные СТДМ, эксплуатируемые и (или) планируемые к применению на железнодорожном транспорте, обеспечивающие контроль состояния объектов инфраструктуры, состояния подвижного состава, возимых технических средств автоматики и связи (рис. 4).

Для обеспечения функциональной безопасности движения поездов следу-

ет стремиться к созданию такой системы управления, которая обеспечивала бы формирование изменяющихся (с учетом выявляемых во времени рисков) функций безопасности, учитывающих различные риски, связанные с организацией движения поездов. При этом риски, связанные с эксплуатацией сложных технических объектов железнодорожной инфраструктуры, должны обнаруживаться заранее, т.е. до перехода объекта инфраструктуры в опасное состояние.

Единое информационное пространство как основа принятия решений при обеспечении функциональной безопасности движения поездов

Для реализации перспективной системы управления движением поездов предлагается интегрировать в них подсистему технической диагностики и мониторинга.

Диаграмма потоков данных, отражающая перспективные информационные потоки, показана на рис. 5, а архитектура перспективной системы управления движением поездов с разделением блоков по уровням — на рис. 6. Блоки, выделенные серой заливкой, а также стрелки серого цвета в настоящее время в системах регулирования и управления движением поездов не используются.

В качестве внешней автоматической системы принятия решений может применяться любая комплексная система автоматизации управления процессом движения поездов, в частности комплексная система автоматизации управления сортировочным процессом [25]. Так как аналогичные решения для организации

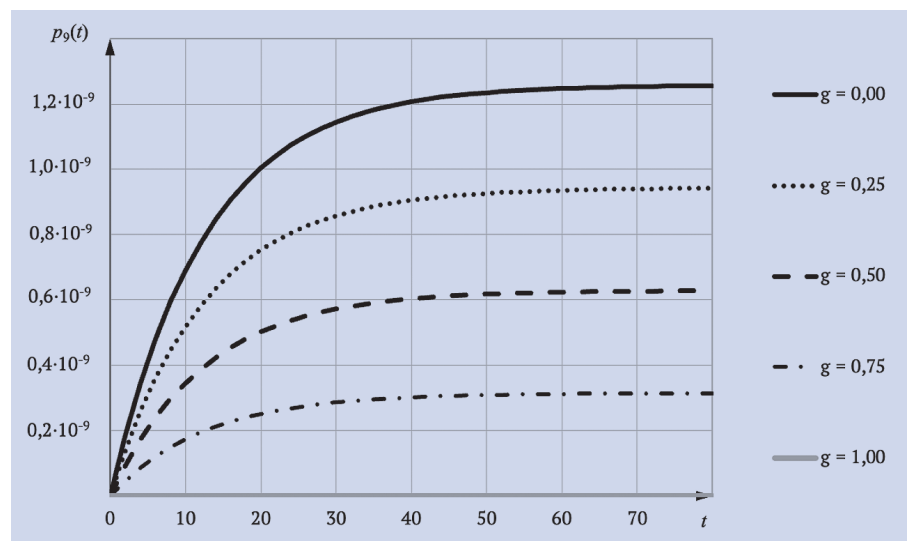


Рис. 3. Зависимость вероятности опасного отказа в транспортной системе при различных показателях полноты контроля



Рис. 4. СТДМ, эксплуатируемые и планируемые к применению на железнодорожном транспорте

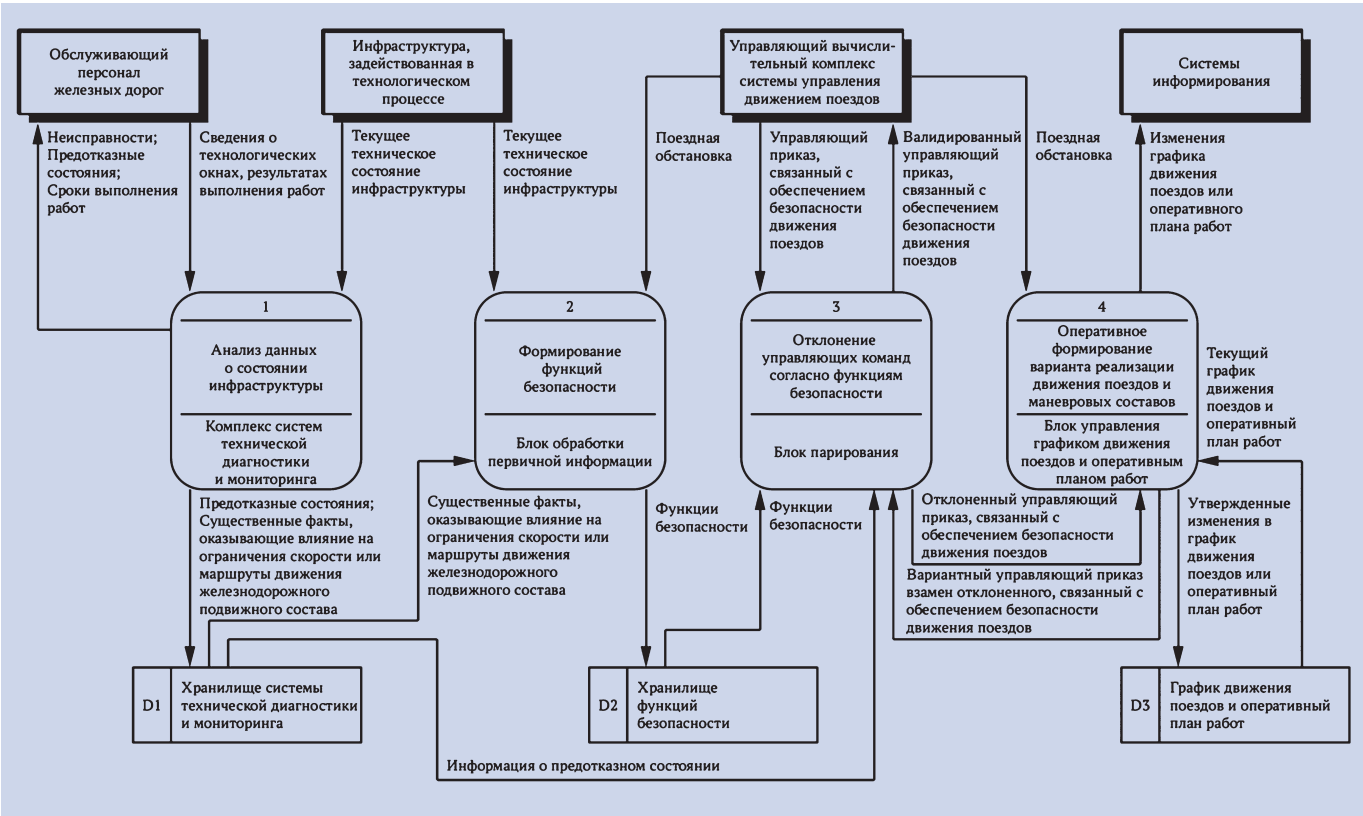


Рис. 5. Диаграмма потоков данных перспективной системы управления движением поездов

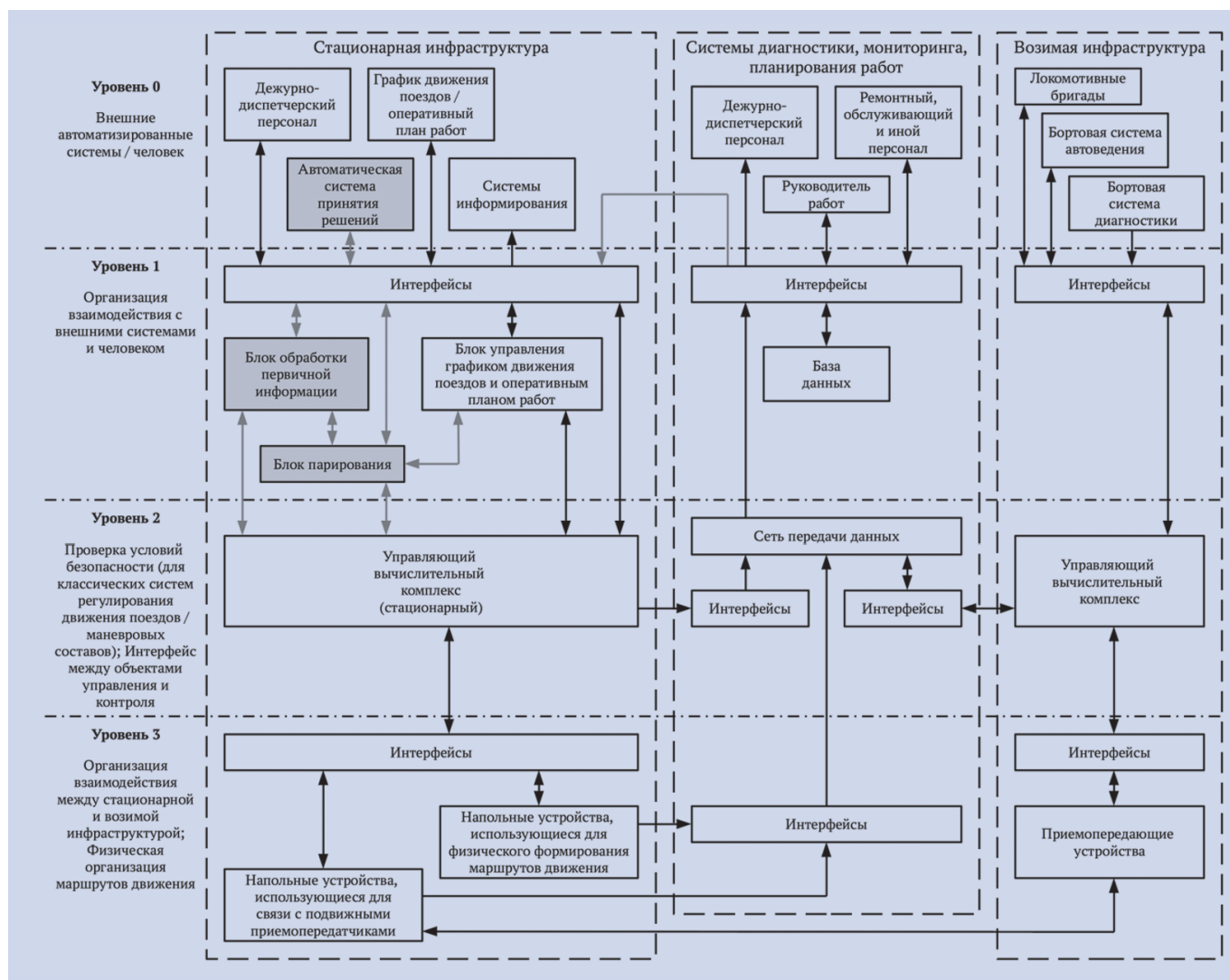


Рис. 6. Архитектура перспективной системы управления движением поездов

маневровой и поездной работы еще не получили широкого распространения, на схеме данный блок также выделен заливкой.

Основным достоинством предлагаемой системы является раннее выявление с использованием данных от комплекса СТДМ таких состояний инфраструктуры, которые могут в последующем привести к переходу ответственного технологического процесса движения поездов в опасное состояние. Комплекс СТДМ включает в себя системы, показанные на рис. 4, но не ограничивается ими.

Перспективная система управления движением поездов (рис. 5, 6) функционирует следующим образом. Как и ранее, СТДМ является источником информации для управления инфраструктурой, задействованной в технологическом процессе движения поездов, «по состоянию». При этом информация о существенных фактах (состояниях объектов инфраструктуры), способных влиять на уровень безопасности движения поездов, передается из СТДМ в блок обработки

первичной информации — программный комплекс, направленный на формирование барьерных функций безопасности с учетом анализа текущего состояния инфраструктуры и поездной обстановки. Программный комплекс непрерывно ведет поиск и ранжирование рисков, связанных с реализацией процесса движения поездов. С учетом этого функции безопасности, используемые в системе, постоянно совершенствуются.

Функции безопасности используются в работе блока парирования. На вход поступают управляющие приказы, формируемые управляющим вычислительным комплексом, и связанные с обеспечением безопасности движения поездов. Они формируются исходя из анализа состояния элементов инфраструктуры существующих систем регулирования и управления движением поездов, т.е. рисков столкновения с другим подвижным составом или схода из-за излома рельса. Если все условия безопасности выполняются, приказ считается валидированным и возвращается в управ-

ляющий вычислительный комплекс для последующей передачи исполнительному устройству — путевому устройству ЖАТ или локомотивному устройству безопасности.

Если приказ отклоняется как не соответствующий условиям безопасности, он отправляется в блок управления графиком движения поездов для анализа на предмет реализации вариантов графика для обеспечения эксплуатационной эффективности предлагаемой системы. В качестве варианта может рассматриваться пропуск поезда по другому пути, назначение дополнительной или отмена существующей остановки и т.п.

Реализация предложенной структуры позволит обеспечить, с одной стороны, более высокий уровень функциональной безопасности системы регулирования движения поездов за счет организации парирования приказов разрешения на движение, которые могут приводить к нештатному состоянию ответственного технологического процесса движения поездов ввиду фактического состояния

инфраструктуры, а с другой стороны, повышение эксплуатационных характеристик перевозочного процесса за счет более гибкого подхода к организации графика движения поездов и оперативного плана работ.

Заключение

Анализ полученных результатов показал возможность использования информации, формируемой системами технической диагностики и мониторинга инфраструктуры ответственного технологического процесса движения поездов для регулирования и управления движением поездов с учетом выполнения требований к безопасности и обеспечению потребных показателей эксплуатационной эффективности.

Анализ потенциальных угроз позволяет существенно снизить влияние последствий нештатных, в первую очередь опасных состояний технологического процесса движения поездов.

Предложенный концептуальный облик системы интервального регулирования движения поездов, подразумевающий введение трех дополнительных программных блоков: обработки первичной информации, парирования и управления графиком движения — позволит повысить уровень функциональной безопасности движения поездов и эксплуатационную эффективность систем регулирования и управления.

Источники

1. Румянцев С.В. Вождение поездов в системе интервального регулирования по технологии «виртуальная сцепка» // Локомотив. 2019. № 12 (756). С. 2–3.
2. Попов П.А., Кудряшов С.В. Переход к беспилотным поездам. Текущие вызовы и пути решения // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 11. С. 18–20.
3. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2020 г. Производственная безопасность и охрана труда. URL: <https://ar2020.rzd.ru/ru/sustainable-development/health-safety>.
4. Информационное письмо по случаю транспортного происшествия, допущенного 03.08.2021 на перегоне Алер — Бушулей Забайкальской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». URL: <https://uugzdn.tu.rostransnadzor.gov.ru/%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8/novostiural/document/70920> (дата обращения 23.02.2024).
5. Меньшиков Н.А., Лебедев А.Е., Москвина Е.А., Иванов А.А. Обслуживание

- устройств ЖАТ по состоянию с применением систем диагностики // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 9. С. 35–37.
6. Волчков А.А., Смирнов А.Н. Обслуживание по состоянию с использованием систем диагностики // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 4. С. 39–42.
7. Лыков А.А., Ефанов Д.В., Власенко С.В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт РФ. 2012. № 5 (42). С. 67–72.
8. Ефанов Д.В. Интеллектуальный транспорт: интеграция средств мониторинга и управления // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 7. С. 40–41.
9. Лисенков В.М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов. М.: Транспорт, 1992. 191 с.
10. Дугаржапова Д.Д., Онищенко А.А. Анализ систем интервального регулирования движения поездов в России и перспектив их модернизации // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 160–164.
11. Зорин В.И. Развитие систем обеспечения безопасности и интервального регулирования движения поездов с применением спутниковой навигации и цифрового радиоканала // Вестн. ИПЕМ: Техника железных дорог. 2009. № 3 (7). С. 90–91.
12. Розенберг Е.Н. Технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности управления перевозочным процессом // Вестн. ИПЕМ: Техника железных дорог. 2016. № 3 (35). С. 66–72.
13. Ким Н.В., Иванов Ю.А. Автоматическая система предотвращения столкновений локомотива, основанная на техническом зрении // Вестн. ИПЕМ: Техника железных дорог. 2013. № 1 (21). С. 67–70.
14. Охотников А.Л., Чернин М.А. Разработка систем для автономного подвижного состава // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 11. С. 21–24.
15. Кузнецов С.В., Зименков О.А. Синтез и реализация оптимальной структуры комплекса автоматики, сигнализации, связи и безопасности линии метрополитена. СПб.: Ассоциация вузиздат, 2018. 476 с.
16. Кузнецов С.В., Зименков О.А. Синтез перспективного комплекса обеспечения безопасности и управления движением поездов линии метрополитена и общие технические требо-

- вания к его компонентам СПб.: Ассоциация вузиздат, 2021. 487 с. DOI 10.52565/9785911551230.
17. Охотников А.Л. Виды систем технического зрения, применяемые на железнодорожном транспорте // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4, № 4 (16). С. 77–87.
18. Долгов М.В., Веселов А.А., Бороудля В.О. Мониторинг технического состояния устройств ЖАТ // Транспорт РФ. 2006. № 5 (5). С. 88–89.
19. Шарко А.В. Автоматизация организации работ повысит эффективность // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 2. С. 34–38.
20. Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А. К вопросу мониторинга и прогнозирования поведения транспортных тоннелей при обеспечении их безопасности // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: тр. всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, Иркутск, 15–17 мая 2008 г. Иркутск: ИрГУПС, 2009. С. 159–164.
21. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Каляев И.А. и др. Система непрерывного мониторинга технического состояния элементов подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры: программно-математическое обеспечение и аппаратная реализация // ВКИТ. 2014. № 1 (115). С. 25–33. DOI 10.14489/vkit.2014.01.pp.025-033.
22. Хатламаджиян А.Е., Шаповалов В.В., Кудюкин В.В. и др. Комплексные системы диагностирования грузового подвижного состава // Тр. АО «НИИАС»: Сб. ст. М.: Т8 Издательские технологии, 2021. С. 108–117.
23. Кудрицкий В.Д., Сеница М.А., Чинаев П.И. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры / под ред. П.И.Чинаева. М.: Сов. радио, 1977. 256 с.
24. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. Ульяновск: Печатный двор, 2012. 216 с.
25. Пат. № 2737815 С1 Российская Федерация, МПК В61В 1/00, В61Л 17/00. Комплексная система автоматизации управления сортировочным процессом (КАСУ СП): № 2020118726: заявл. 05.06.2020: опубл. 03.12.2020 / А.И.Даньшин, Ю.Ф.Золотарев, В.Р.Одикадзе [и др.]; заявитель АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». 13 с.