

Барьерная функция систем мониторинга в увязке с системами управления движением поездов



Д. В. Ефанов,
д-р техн. наук, доцент,
зам. генерального дирек-
тора по научно-иссле-
довательской работе
ООО НТЦ «Комплексные
системы мониторинга»,
профессор Высшей школы
транспорта Института
машиностроения, ма-
териалов и транспорта
Санкт-Петербургского
политехнического универ-
ситета Петра Велико-
го, профессор кафедры
«Автоматика, телемеха-
ника и связь на железно-
дорожном транспорте»
Российского университета
транспорта (МИИТ)



Г. В. Осадчий,
зам. генерального дирек-
тора — главный инженер
ООО НТЦ «Комплексные
системы мониторинга»,
старший преподаватель
кафедры «Автоматика
и телемеханика на же-
лезных дорогах» Петер-
бургского государствен-
ного университета путей
сообщения Императора
Александра I



И. А. Аганов,
генеральный директор
ООО НТЦ «Комплексные
системы мониторинга»

Сегодня на пути дальнейшей цифровизации отрасли назрели принципиальные инновации в концептуальных подходах к роли, задачам и возможностям систем железнодорожной автоматики и телемеханики. При этом необходимо внедрение более совершенных средств технического диагностирования и мониторинга и их интеграция с системами организации, планирования и непосредственного управления движением поездов, а также изменения в соответствующей нормативно-правовой базе.

Железнодорожный транспорт — один из самых консервативных видов транспорта, и реализация на нем новых принципов организации и управления движением, современных информационных и интеллектуальных технологий является весьма сложной и трудоемкой. Этот процесс, как правило, затягивается на годы и даже десятилетия и не способствует прогрессивным скачкам в развитии отрасли.

Традиционно железнодорожный комплекс на постсоветском пространстве эксплуатируется, обслуживается и совершенствуется отдельно по направлениям и подразделениям внутри железных дорог и участков. Фактически разрозненно развиваются принципы конструирования, реализации и эксплуатации объектов искусственных сооружений, верхнего строения пути, электрификации и энергообеспечения, автоматики и телемеханики, тягового и вагонного хозяйств, движения и пр. Это приводит к асинхронности развития отдельных направлений, а в ряде случаев даже к повторению уже пройденного учеными и инженерами в смежных областях трудного пути в реализации более совершенных устройств. При этом сложно выделить даже наиболее развитый сегмент железнодорожного комплекса.

Правильным был бы путь развития железных дорог в более тесной интеграции хозяйств и эксплуатируемых ими объектов, где будет оправдан «эффект бабочки», заключающийся в том, что незначительное влияние на систему может

иметь большие и непредсказуемые последствия, в том числе в совершенно другом месте. В частности, данный эффект, например, может быть связан с тем, что отказ какого-либо объекта автоматики на некоторой станции может явиться причиной не только задержки в движении поездов, но и автоматического перестроения графика движения на станции, находящейся в сотнях километров от него, что поспособствует более эффективной организации перевозочного процесса на линии в целом.

Подобное возможно при реализации комплексного подхода к управлению и эксплуатации железнодорожного комплекса, когда каждый из объектов будет снабжен не только современными средствами управления, но и соответствующими средствами технического диагностирования и мониторинга состояния и протекающих процессов [1]. Наличие таких средств позволяет переходить к получению цифровых копий (цифровых двойников) объектов железнодорожного комплекса и к реализации концепции цифровой трансформации отрасли.

При этом понятно, что цифровая трансформация немыслима без использования синхронно развитых средств технического диагностирования и мониторинга (ТДМ). Опуская очевидные примеры недоразвитости средств ТДМ и вообще принципов построения систем диагностирования в ряде хозяйств, отметим, что в целом к настоящему времени, несмотря на очевидный колоссальный прогресс в развитии компьютерных тех-

нологий (более широко используем известный термин computing [2]), системы ТДМ на железных дорогах являются атрофированными и служат лишь средствами сбора, накопления и хранения данных для частичной автоматизации процедур по техническому обслуживанию объектов диагностирования. При этом они собирают огромные объемы диагностической информации, анализ и классификация которой затруднены из-за их низкого качества, что сказывается и на низких показателях достоверности диагноза и прогноза [3]. Об этом свидетельствуют сообщения как самих разработчиков систем ТДМ, так и эксплуатирующего персонала, а также неудачные попытки инженеров по переходу к реализации интеллектуальной обработки больших объемов данных от разнородных объектов железнодорожного комплекса.

Основная функция систем ТДМ — это повышение отказоустойчивости объектов диагностирования за счет своевременной фиксации зарождающихся отказов. Более глобально в охвате всей железной дороги это недопущение сбоев в графике движения поездов из-за отказов технических средств инфраструктурного комплекса и подвижного состава.

Развитие технологий мониторинга, совершенствование элементной базы технических средств диагностирования и методов распознавания и классификации состояний, прогнозирования и комплексной аналитики данных способствуют наращиванию функций, реализуемых системами ТДМ. В том числе внимание и научного сообщества, и эксплуатирующих организаций обращается на проблему использования диагностической информации непосредственно в управлении движением поездов.

Сегодня нормативная документация в отрасли исключает прямое использование результатов мониторинга при управлении движением. При этом можно лишь повлиять на объект диагностирования путем внепланового обслуживания и ремонта, но на перевозочный процесс оказать влияние автоматически невозможно. Ряд случаев на железных дорогах, приведших к авариям, крушениям поездов и даже к катастрофам, убедительно показал, что необходима увязка систем ТДМ различных хозяйств с системами управления движением поездов, отвечающими за безопасность перевозочного процесса, и реализация ими так называемой барьерной функции. Традиционно на железных дорогах конечными звенья-

ми в обеспечении безопасности движения поездов являются устройства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (или, более «ретроградно», — сигнализации, централизации и блокировки) [4]. Именно с ними и необходима увязка систем ТДМ различных хозяйств железнодорожного комплекса.

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики и их безопасность

Всем специалистам в области железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) хорошо известно, что устройства и системы автоматизации реализуются с соблюдением условий безопасности, а отказы в них должны парироваться либо приводить к переходам в защитные состояния. В действительности это предполагает снижение скоростей передвижения на железных дорогах вплоть до полной остановки при фиксации отказов каких-либо средств ЖАТ. При этом необходимо подчеркнуть последнее словосочетание, поскольку средства ЖАТ контролируют только собственные отказы, а также отказы объектов инфраструктурного комплекса, непосредственно связанных с ними, например, частично верхнего строения пути за счет применения рельсовых цепей. Отказы же остальных объектов ими не просто не контролируются, но никак не учитываются в реализации процедур по управлению движением поездов.

Устройства и системы ЖАТ реализуются таким образом, чтобы все их отказы, связанные с нарушением безопасности движения поездов (опасные отказы), были исключены. Этот принцип известен еще с первой половины прошлого столетия. Для достижения указанного свойства системы ЖАТ реализуются по технологиям, подразумевающим использование высоконадежных компонентов, элементов с несимметричной характеристикой отказов, самопроверяемых схем, принципов самоконтроля и самодиагностирования, методов кодирования, резервирования и диверситета и пр. [5]. При этом до внедрения в эксплуатацию новой техники и технологий производится обязательная процедура по сертификации и доказательству их безопасности [6–9].

Теоретические основы синтеза безопасных систем ЖАТ хорошо проработаны в трудах наших соотечественников и зарубежных ученых. Среди всего их многообразия можно отметить пионерские работы профессоров В. В. и Вл. В. Сапожниковых во второй половине прош-

лого столетия, в которых системы ЖАТ представляются как одноконтные и многоконтные автоматы (комбинационные схемы и конечные автоматы) [10, 11]. Такой подход является несомненно правильным и конструктивным: появляется универсальность в описании работы схем без привязки к постоянно меняющейся элементной базе. В работах отмеченных ученых опасный отказ определяется как ошибка II рода в работе схем — появление на выходе (или выходах) схемы ложного сигнала логической 1 (сигнала «на управление»), на основании чего определена защищенность схемы от опасных отказов и сформулированы предложения по выбору наилучшей структуры безопасных схем. Показано, что для одной схемы существуют различные реализации, при этом неодинаковые с точки зрения защищенности. Введенное понятие опасного отказа легло в основу работы [12], где была доказана теорема об отсутствии опасных отказов в конечном автомате: опасные отказы в работе конечного автомата отсутствуют тогда и только тогда, когда для всех ложных переходов $S_i \rightarrow S_j$ и для всех ложных событий k выполняется условие:

$$E_{S_i \rightarrow S_j} E_{f(k)} \cap E_{on_k} = \emptyset, \quad (1)$$

где $E_{S_i \rightarrow S_j}$ — множество слов, соответствующих ложным переходам конечного автомата из состояния S_i в состояние S_j ;

$E_{f(k)}$ — множество слов, переводящих конечный автомат из состояния S_j в состояние, представляющие ложные события из множества E_k ;

E_{on_k} — множество слов, переводящих конечный автомат в опасные состояния.

Введенные на основе регулярных выражений условия позволили их авторам предложить алгоритмы синтеза конечных автоматов, которые исключают их переходы в опасные состояния при любых отказах, с вероятностью которых необходимо считаться. Для исключения же опасных отказов в конечных автоматах достаточно запретить все опасные ложные переходы.

Условие (1) определяет только отсутствие опасных переходов в схемных решениях ЖАТ и является составляющим в обеспечении безопасности перевозочного процесса в целом. Безопасность перевозочного процесса на железнодорожном транспорте понимается как свойство транспортной системы не создавать опасности для сохранности перевозимого груза, технических средств, объектов окружающей среды, здоровья и жизни пассажиров, технического персонала,

населения, находящегося в зоне влияния перевозочного процесса [13]. Именно поэтому недостаточно учесть при реализации системы управления движением поездов только возможности исключения опасных отказов в их схемных решениях. Необходимо учесть состояние объектов инфраструктурного комплекса.

Приведем несколько контрпримеров, показывающих, что хоть системы ЖАТ и реализованы безопасно (внутренние отказы не приводят к инициации опасных ситуаций в движении поездов, внешние не влияют на возможности выполнения средствами ЖАТ безопасных алгоритмов), но опасные ситуации в перевозочном процессе они не исключают. Возьмем расширение колеи вследствие внешних дестабилизирующих факторов, понижение рельса в результате частичного обрушения балластной призмы, опасные искривления рельсов и т. п. Это те опасные состояния верхнего строения пути, которые не будут зафиксированы средствами ЖАТ: рельсовая цепь продолжит работу, а на светофоре, ограждающем участок пути, будет гореть разрешающее показание при наличии свободного для движения пути. Другой пример: обрушение опоры контактной сети и попадание ее в зону нарушения габарита приближения строений также не приведет к автоматическому включению запрещающего показания на светофоре, ограждающем участок (более того, такое показание невозможно в системе ЖАТ дать и вручную при обнаружении подобного дефекта, кроме как нарушив принципы их эксплуатации).

То есть система ЖАТ является безопасной «сама в себе», а вот от отказов внешних и взаимодействующих с подвижным составом объектов, непосредственно не вызывающих срабатывание устройств автоматизации, она не защищена. Барьерная функция не реализуется. Эта особенность взаимодействия средств железнодорожной инфраструктуры способна приводить к авариям. В качестве примера можно упомянуть недавнее (1 июня 2020 г.) обрушение моста через реку Кола (1436-й км Октябрьской железной дороги) [14]. Здесь система ЖАТ не выдала на локомотив сигнала тревоги и только внимательность машиниста позволила избежать катастрофы.

Таким образом, роль систем ЖАТ в исполнении функций безопасного пропуска поездов выполняется с ограничениями, которые связаны с принципами реализации технических средств

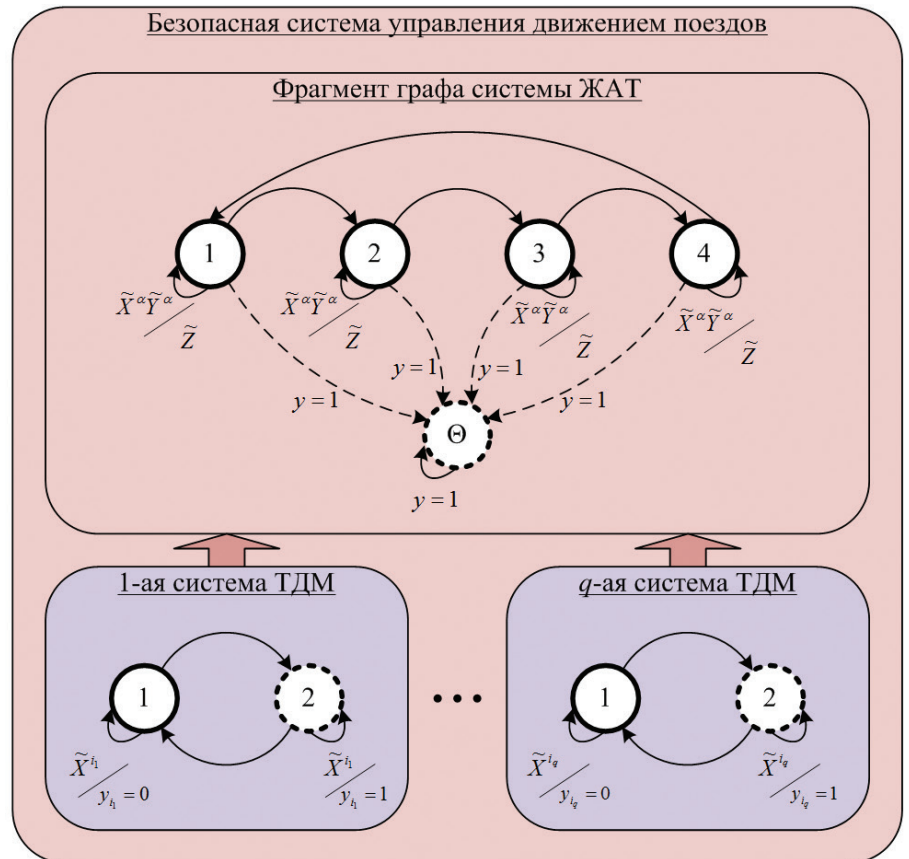


Рис. 1. Принципы увязки систем ТДМ и систем управления движением поездов

автоматизации: они попросту не предназначены для фиксации технических состояний объектов железнодорожной инфраструктуры. Системы ЖАТ обеспечивают и контролируют пространственное разделение поездов, самих средств автоматизации и частично состояние железнодорожного пути. Для учета технического состояния объектов инфраструктурного комплекса они не приспособлены.

Вернемся к выражению (1) и рассмотрим его применительно к железнодорожной транспортной системе. В нем множество $E_{онк}$ не включает в себя каких-либо слов, переводящих в опасные состояния объекты железнодорожной инфраструктуры, а сама формула (1) не дает условий перехода во множество защищенных состояний транспортной системы. Опасные отказы в работе средств железнодорожной инфраструктуры будут отсутствовать тогда, когда любой их переход во множество ($E_{онк}$) опасных состояний будет приводить к переходу в защищенное состояние системы управления движением поездов:

$$E_{S_i \rightarrow S_f} E_{f(k)} \cap E_{он_i} = E_{з_j}, \quad (2)$$

где $E_{з_j}$ — множество слов, соответствующих защищенным состояниям.

Здесь защищенное состояние может трактоваться как снижение скорости проследования до определенного значения, вплоть до полной остановки (аналог светофора с различной градацией скоростей).

Приведем два примера защищенных состояний. Пусть вследствие отказа конструкции моста испытывают ненормативную нагрузку, зафиксированную автоматически техническими средствами ТДМ, при которой следует ограничить скорость движения, но не само движение. Тогда эта информация может быть донесена поезвному диспетчеру и машинисту автоматически. Если же конструкции моста обрушились, то должен поступить немедленный сигнал об остановке движения (аналог запрещающего показания светофора).

Еще раз подчеркнем, что защищенное состояние должно присутствовать именно в системе ЖАТ, так как она отвечает за выработку управляющего сигнала для движения.

Концепция реализации безопасной системы управления движением поездов

На рис. 1 условно в виде подграфов конечных автоматов представлена без-

опасная система управления движением поездов. Для системы ЖАТ выбран фрагмент реализации одной из функций управления напольными технологическими объектами. Для систем ТДМ показано два состояния: 1 — параметры в норме, 2 — опасное состояние объекта диагностирования.

В общем случае на участке железнодорожной линии могут быть установлены q систем ТДМ, каждая из которых должна не только собирать диагностические данные по каждому из измеряемых параметров, но и вырабатывать «сигнал тревоги» $y_j = 1, j \in i_1, i_2, \dots, i_{q-1}, i_q$, при достижении критических значений и фиксации катастрофического события. Подобные системы или правильнее сказать, их «высокоуровневые прототипы», уже частично используются на железных дорогах, но к настоящему времени автоматически интегрального сигнала тревоги не выдают не только в систему управления движением поездов, но даже дежурным по станциям и поездным диспетчерам [15–22].

Каждая из систем ТДМ измеряет ряд параметров $\tilde{X}^{ij} = \tilde{x}_1^{ij} \tilde{x}_2^{ij} \dots \tilde{x}_{n_{ij}}^{ij} \tilde{x}_{n_{ij}}^{ij}$, $j \in i_1, i_2, \dots, i_{q-1}, i_q$ и формирует информационные сообщения своим пользователям. Кроме того, она должна вычислять некоторый показатель (назовем его индексом «живучести» объекта диагностирования $I_L \in [0; 1]$) и определять значение сигнала тревоги $y_j = 1, j \in i_1, i_2, \dots, i_{q-1}, i_q$. Условие перехода из какого-либо функционального состояния S_f системы управления движением поездов в защищенное состояние S_Θ системы управления движением поездов может быть записано в виде:

$$S_f \rightarrow S_\Theta : y_{i_1} \vee y_{i_2} \vee \dots \vee y_{i_{q-1}} \vee y_{i_q} = 1. \quad (3)$$

Под функциональным состоянием S_f здесь понимается любое из предусмотренных состояний системы ЖАТ (исправное, работоспособное или неработоспособное защитное [23]), учтенных при ее реализации.

Строго говоря, сигналы $y_j, j \in i_1, i_2, \dots, i_{q-1}, i_q$ различных систем ТДМ должны быть «заведены» в группы сигналов системы ЖАТ при ее совершенствовании. Условия перехода системы ЖАТ из состояния в состояние определяются исходя из значений входных воздействий системы $\tilde{X}^\alpha = \tilde{x}_1^\alpha \tilde{x}_2^\alpha \dots \tilde{x}_{n_\alpha}^\alpha \tilde{x}_{n_\alpha}^\alpha$ и сформированного вектора сигналов тревоги $\tilde{Y}^\alpha = y_{i_1} y_{i_2} \dots y_{i_{q-1}} y_{i_q}$. Другими словами, переходы осуществляются при воздействиях на входы $\tilde{X}^\alpha \tilde{Y}^\alpha = (\tilde{x}_1^\alpha \tilde{x}_2^\alpha \dots \tilde{x}_{n_\alpha}^\alpha \tilde{x}_{n_\alpha}^\alpha) \times y_{i_1} y_{i_2} \dots y_{i_{q-1}} y_{i_q}$, вызывая выходные

значения системы $\tilde{Z} = \tilde{z}_1 \tilde{z}_2 \dots \tilde{z}_{p-1} \tilde{z}_p$, где p — множество выходов систем ЖАТ. Также может быть использован один сигнал тревоги $y = y_{i_1} \vee y_{i_2} \vee \dots \vee y_{i_{q-1}} \vee y_{i_q}$, формируемый программным средством (или подсистемой) с высокой надежностью функционирования для выявления опасного состояния объекта диагностирования и мониторинга с заданной достоверностью $D \in [0; 1]: D > D_{\text{lim}}, D_{\text{lim}}$ — некоторое заданное предельное значение достоверности, близкое к 1. Эта величина на практике должна нормироваться и стандартизироваться.

Из приведенных рассуждений следует, что средства ЖАТ являются конечными звеньями, которые должны не только обеспечивать свое безопасное функционирование при непосредственном контакте с объектами инфраструктуры, но и реализовывать барьерную функцию при фиксации отказов объектов всей железнодорожной инфраструктуры. И именно следование такой парадигме при их реализации позволит повысить безопасность движения поездов и снизить риски от отказов объектов железнодорожной инфраструктуры.

Поскольку системы ЖАТ в этой парадигме в настоящее время не реализуются, может быть использовано их «наращивание» в следующих смыслах.

1. С использованием риск-ориентированного подхода определяется множество наиболее вероятных опасных состояний объектов железнодорожной инфраструктуры.

2. С применением математических методов моделирования и технической диагностики для каждого из опасных состояний определяются контрольные измерительные точки, периоды диагностирования и условия возникновения событий.

3. Реализуются высоконадежные системы ТДМ, фиксирующие ключевые диагностические параметры и позволяющие фиксировать опасные события при совпадении условий для каждого из инцидентов.

4. Реализуется подсистема фиксации опасных событий и вычисления интегральных сигналов тревоги.

5. Реализуется подсистема безопасной увязки с объектами ЖАТ.

Таким образом, п. 5 подразумевает наличие обратной связи для учета результатов мониторинга в процессе регулирования движения поездов (рис. 2). О необходимости такой увязки соавторы статьи неоднократно говорили в своих работах, например в [3, 24].

Использование технических средств мониторинга позволяет фактически осуществлять управление рисками от отказов объекта диагностирования и от несвоевременного технического обслуживания и ремонтов (ТОиР). Здесь необходимо отметить и функцию возможности управления процессами ТОиР — например, обособованного и своевременного профпрогрева элементов железнодорожной контактной подвески при фиксации средствами мониторинга условий гололедообразования. Фактически реализуется возможность управления энергией и повышения энергоэффективности объектов инфраструктуры [25].

В первом случае создается возможность влияния на величину интенсивности отказов λ_F , что при постоянстве значений потерь Π_F от воздействия отказа на технологический процесс способствует снижению риска от отказа:

$$R_F = \Pi_F \lambda_F. \quad (4)$$

Во втором случае создается возможность влияния на величину интенсивности ТОиР λ_M , что при постоянстве значений потерь Π_M от снижения скорости протекания технологического процесса способствует снижению риска от ТОиР:

$$R_M = \Pi_M \lambda_M. \quad (5)$$

Уменьшение величины λ_F возможно за счет раннего диагностирования развивающихся неисправностей и выявления катастрофических (предельных, предотказных) состояний. Уменьшение величины λ_M возможно за счет формирования прогнозных времен обслуживания устройства и повышения срока эксплуатации объекта диагностирования.

Таким образом, работа систем ТДМ направлена на минимизацию риска потерь от эксплуатации инфраструктуры железных дорог:

$$\begin{cases} R_F(\tilde{\lambda}_F) \rightarrow \min_{\tilde{\lambda}_F \in \Lambda_F} \\ R_M(\tilde{\lambda}_M) \rightarrow \min_{\tilde{\lambda}_M \in \Lambda_M} \end{cases} \quad (6)$$

Снижение рисков (6) способствует и снижению опасных отказов в работе объектов инфраструктуры железнодорожного комплекса.

На рис. 2 в прямоугольных блоках показаны элементы аппаратно-программных средств управления, а в блоках со скругленными краями — процессы, сообщения, действия. Реализация систем ТДМ должна позволить перейти от автоматизации процедур измерения к формированию дорожных карт по обслуживанию объектов диагностирования, управлению рисками от отказов

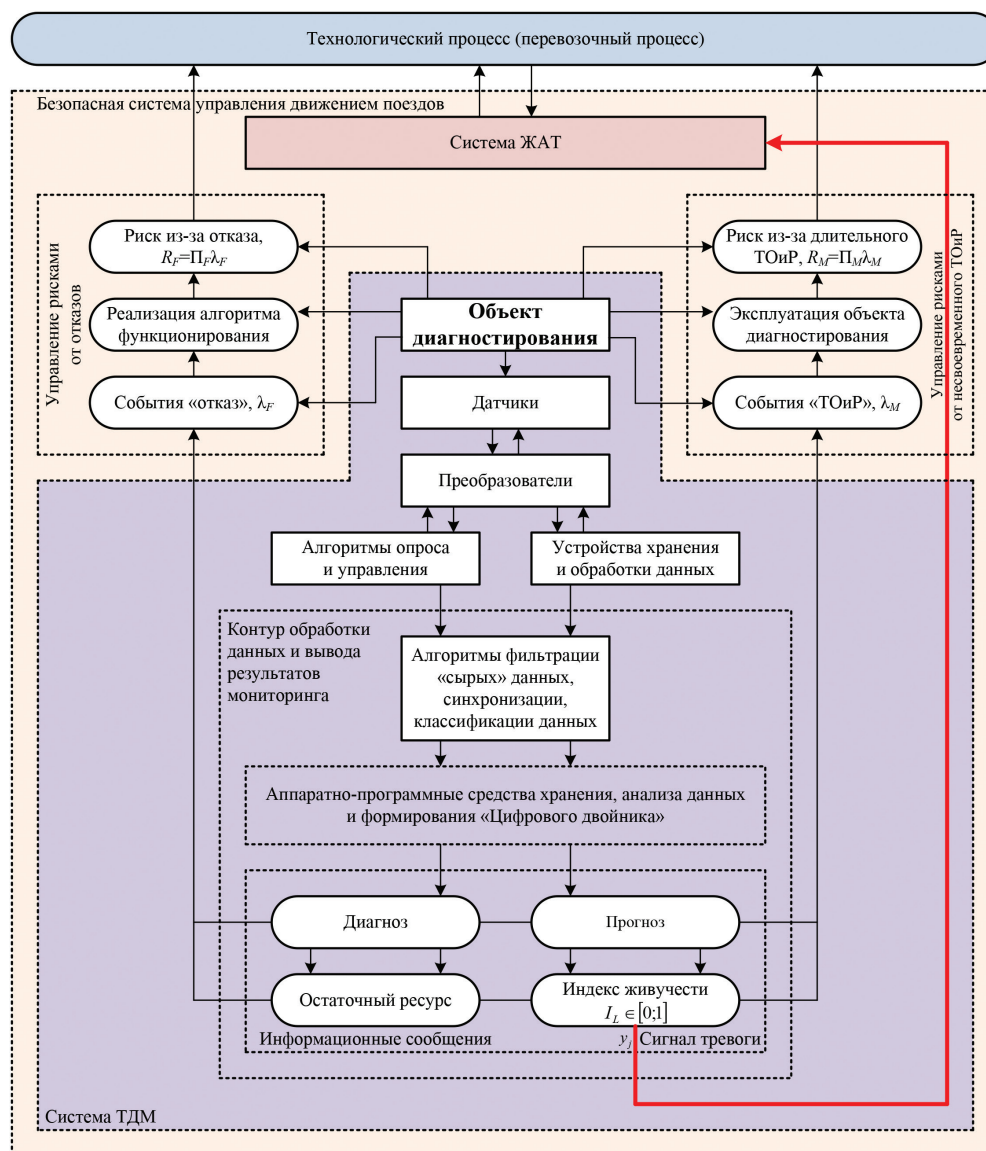


Рис. 2. Структура безопасной системы управления движением поездов

и несвоевременного ТОиР, а также к формированию сигнала тревоги — реализации барьерной функции. Системы хранения и обработки данных, а также организация ETL-процессов для такой системы требуют тщательной проработки еще на этапе проектирования и разработки.

Отметим, однако, что к настоящему моменту не существует технических решений, которые позволили бы увязать систему ТДМ с системой управления движением поездов. Но прежде всего это не определяется нормативными документами, а на саму систему ТДМ не накладываются требования по соответствию какому-либо из уровней полноты безопасности.

Авторы статьи предлагают на первом этапе осуществлять увязку с системами ЖАТ в некотором косвенном виде: передавать сигнал тревоги от средств ТДМ в систему диспетчерского контроля устройств ЖАТ [19]. Далее эта информация воспри-

нимается дежурным по станции и поездным диспетчером, что позволит отреагировать хоть и не автоматически, но гораздо оперативнее, чем при возникновении опасного события с непосредственным участием подвижных единиц. Кроме того, целесообразно осуществлять увязку также с системами оповещения работников на пути и машинистов через аппаратуру речевого информирования. Необходимо отметить, что в будущем (весьма недалеком) возможна увязка систем мониторинга с заградительными сигналами и с подсистемами кодирования, передающими сигналы по рельсам на локомотив автоматически. Также существует вариант добавления в обиход нового сигнала (естественно, с изменением инструкции по сигнализации) — светофора системы мониторинга (аналогично используемому в настоящее время сигналу о состоянии буксовых узлов подвижного состава). Но это возможно только при совершен-

ствовании нормативной базы и самих систем ТДМ до такого уровня, который позволит с высокой достоверностью ставить диагноз и прогнозировать изменения состояния и параметров объектов диагностирования.

Таким образом, современные системы управления движением поездов безопасны с позиции реализации алгоритмов передачи информации для оперативного персонала подразделений движения и тяги, но никак не учитывают возможные состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, что полностью дается на откуп персоналу соответствующих служб. Цифровая трансформация отрасли направлена в том числе на ликвидацию и этого недостатка.

Увязка более совершенных систем ТДМ с системами организации и управления движением поездов открывает пути не только к повышению безопасности движения, но и к переходу на ком-

плексные системы интеллектуального управления движением поездов с учетом множества факторов. К таковым можно отнести энергоэффективность и экологичность перевозочного процесса, возможность гибкого перестроения графиков движения поездов за счет учета отказов объектов инфраструктуры, прогнозирование и оценку остаточного ресурса всех составляющих перевозочного процесса, повышение информативности потребителей услуг железнодорожного транспорта и др.

Настоящая работа, по нашему мнению, призвана развить дискуссию об изменении принципов реализации современных ТДМ, их более тесной интеграции как между собой, так и с системами организации, планирования и непосредственного управления движением поездов. При этом очевидно, что должны меняться и концептуальные подходы к построению ТДМ, а архитектура составляющих, устройств и подсистем должна реализовываться с учетом принципов контролепригодности и самопроверяемости, что само по себе способствует повышению достоверности результатов мониторинга. Назрела необходимость модернизации как нормативной документации в сфере технической диагностики и мониторинга устройств и систем на железнодорожном транспорте, так и в совершенствовании самих технологичных мониторинга. ■

Литература

1. Ефанов, Д. В. Радицентрализация с распределенными вычислительными ресурсами и развитыми функциями самодиагностирования / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 1–2. – С. 40–45.
2. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York : Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p.
3. Ефанов, Д. В. Интеграция систем управления и мониторинга // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 146–157.
4. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking. – Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. – 552 p.
5. Сапожников, В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов [и др.] – Москва : Транспорт, 1995. – 272 с.
6. Белишкина, Т. А. Особенности подтверждения соответствия требованиям безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики в переходный период после принятия технических регламентов Таможенного союза // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 208–227.
7. Белишкина, Т. А. Нормативная база как инструмент для обеспечения надежности и безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. А. Белишкина, О. А. Абрамов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 540–560.
8. Markov D. S., Vasilenko M. N., Nasedkin O. A., Kotenko A. G., Manakov A. D., Belozherov V. L. Method for Assessing Probabilistic Reliability Estimation and Safety of Railway Automation Systems Redundant Structures // Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020). – Varna, 2020. – P. 356–361.
9. Рязанов, В. Ю. Анализ подтверждения соответствия, обеспечение качества и безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 435–465.
10. Сапожников, Вл. В. Исследование принципов построения электрической централизации малых станций с исключением опасных отказов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ленинград, 1969. – 200 с.
11. Сапожников, В. В. О защищенности одноконтурных схем управления от опасных отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Железнодорожные системы автоматики и телемеханики с применением бесконтактных элементов : сб. трудов. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1971. – С. 37–47.
12. Сапожников, В. В. О синтезе конечных автоматов с исключением опасных отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 8. – С. 93–99.
13. Лисенков, В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. – Москва : ВНИИТИ РАН, 1999. – 322 с.
14. Железнодорожный мост обрушился под Мурманском [Электронный ресурс] : https://www.dp.ru/a/2020/06/01/Zheleznodorozhnij_most_obru (дата обращения: 01.06.2021 г.).
15. Park Y., Cho Y. H., Lee K., Jung H., Kim H., Kwon S., Park H. Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application // 8th World Congress on Railway Research, COEX, Seoul, Korea, 2008.
16. Yu J., Wu M. Development of a Detection System for the Catenary Vibration Monitoring // International Conference of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences, 2011. – Nanjing, Jiangsu, China. – Vol. 1. – P. 76–79.
17. Барч, Д. В. Совершенствование системы обслуживания устройств энергоснабжения на основе мониторинга и диагностики // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 3. – С. 103–110.
18. Asada T. Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines // University of Birmingham, UK, 2013. – 149 p.
19. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
20. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance // Signal+Draht. – 2018 (110). – № 9. – P. 70–75.
21. Kassa E., Skavhaug A., Kaynia A. M. Monitoring of Switches & Crossing (Tornouts) and Tracks. – Decision Support Tool for Rail Infrastructure, EU Project. – № 636285. – 41 p.
22. Efanov D. V., Osadchy G. V., Barch D. V., Belyi A. Permanent Monitoring Systems of the Contact-Wire of Railroad Catenary: the Main Tasks of Implementation // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, 2019. – P. 484–487.
23. Сапожников, В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 588 с.
24. Ефанов, Д. В. Интеграция систем непрерывного мониторинга и управления движением на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4. – С. 62–65.
25. Ефанов, Д. В. Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоимунных транспортных систем / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников [и др.] // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 5. – С. 20–26.