НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 656.25
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-6

Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 50–57

Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов

Дмитрий ЕФАНОВ

Валерий ХОРОШЕВ

Герман ОСАДЧИЙ

Дмитрий Викторович Ефанов [1–3]***, Валерий Вячеславович Хорошев*** [1]***, Герман Владимирович Осадчий*** [4, 5]

[1] *Российский университет транспорта, Москва, Россия.*
[2] *ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Транспортной и строительной безопасности», Санкт-Петербург, Россия.*
[3] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*
[4] *ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург, Россия.*
[5] *Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.*
✉ [1] *TrES-4b@yandex.ru.*

АННОТАЦИЯ

В статье анализируется проблема синтеза безопасных систем управления ответственными технологическими процессами на примере систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Показано, что современные системы управления для сложных распределённых систем, таких как железнодорожная транспортная система, реализуются не с абсолютной безопасностью. Безопасность таких систем ограничена учётом только собственных отказов, внешних отказов управляющих систем и их составляющих, а также отказов объектов инфраструктуры, непосредственно взаимодействующих с устройствами управления. Другие объекты инфраструктуры никак не учитываются при автоматическом управлении и передаче данных на бортовые средства автоматики.

Целью статьи является изложение теоретических принципов синтеза безопасных систем управления движением поездов с учётом возможностей оборудования объектов инфраструктуры высоконадёжными и безопасными средствами технического диагностирования и мониторинга.

Приведена упрощённая структура комплекса центрального управления движением поездов с учётом результатов диагностирования и мониторинга всех составляющих перевозочного процесса.

Сформулированы условия синтеза полностью безопасных систем управления движением поездов. Отмечаются сопутствующие синтезу безопасной системы управления задачи.

Комплексный учёт параметров объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава позволит выйти на качественно более высокий уровень безопасности движения поездов.

Ключевые слова: система управления движением поездов, железнодорожная автоматика и телемеханика, безопасность движения поездов, безопасный конечный автомат; опасный отказ объекта железнодорожной инфраструктуры, функциональная безопасность системы мониторинга.

Благодарности: настоящая работа является продолжением исследований заслуженных деятелей науки РФ, докторов технических наук, профессоров Валерия Владимировича и Владимира Владимировича Сапожниковых, внёсших значительный вклад в развитие теории синтеза самопроверяемых, отказоустойчивых, надёжных и безопасных систем управления ответственными технологическими процессами, в том числе, движения поездов на железных дорогах. Выражаем благодарность своим учителям и коллегам за базовые идеи и созданные возможности для развития интеллектуальных технологий синтеза безопасных систем управления.

Для цитирования: Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 50–57. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-6.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам синтеза безопасных систем управления ответственными технологическими процессами, в том числе, управления движением поездов на железнодорожном транспорте, посвящено огромное количество работ учёных, инженеров и исследователей [1–5]. При этом, как ни странно, до сих пор эта задача остаётся актуальной.

С развитием техники и технологий появляются способы повышения показателей безопасности и учёта функционирования и воздействия смежных объектов и систем. Однако к настоящему моменту они носят весьма ограниченный характер и направлены на улучшение «точечных» решений. Как пример – повышение надёжности и безопасности системы электрической централизации за счёт использования более надёжных компонентов и оборудования. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации в этой сфере, среди которых отметим работы [6–9].

Повышение безопасности системы управления движением поездов может быть достигнуто путём реализации более развитых способов самодиагностирования инфраструктурного комплекса за счёт использования внешних технических средств диагностирования и мониторинга. Из фундаментальных работ [2; 10] следует, что, к примеру, при синтезе безопасных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) до сих пор в полной мере не учитывается техническое состояние объектов железнодорожной инфраструктуры. Последние, хоть и проходят процедуру тестового и функционального диагностирования в процессе эксплуатации, но их результаты не учитываются при реализации алгоритмов управления. Они используются только для организации процедур по периодическому и внеплановому обслуживанию [11–13]. Более того, даже сами устройства автоматики в полной мере в автоматическом режиме не передают данные о своём техническом состоянии для учёта их в процессах управления [14; 15]. Это связано, прежде всего, с исторически сложившимися принципами построения систем управления на железнодорожном транспорте, со сформировавшимся институтом стандартизации, сертификации и доказательства безопасности, а также с отсутствием методик учёта данных от систем технического диагностирования и мониторинга (ТДМ) для автоматического управления процессами.

Задача синтеза безопасной системы управления решается за счёт исключения влияния тех событий, которые приводят к некорректной реализации алгоритмов управления и к возникновению опасных отказов. Такие отказы не просто влияют на технологический процесс в виде его остановок, а создают условия возникновения катастрофических нарушений, влекущих за собой повреждения, аварии и крушения. Поэтому при синтезе безопасных систем управления используется целый комплекс мер по защите и парированию опасных отказов: использование контролепригодных структур устройств, применение самоконтролируемых, самопроверяемых и отказоустойчивых логических схем, использование элементов с несимметричной характеристикой отказа, применение избыточного кодирования, внесение структурной, информационной и временно́й избыточности, реализация безопасных устройств сопряжения и пр. [1–5; 10; 16–20].

Целью настоящей работы является изложение теоретических основ синтеза безопасных систем сигнализации и управления движением поездов на железных дорогах. В отличие от предыдущих исследований предложено учитывать не только безопасность функционирования самих средств ЖАТ, но и объектов инфраструктуры и подвижного состава, непосредственно с ними не взаимодействующих. Такой учёт возможен за счёт использования систем ТДМ, которые, однако, должны реализовываться по вполне определённым принципам, являться высоконадёжными и давать информацию с высокой, наперёд заданной, достоверностью [21–23].

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Безопасность системы управления движением поездов

В современной парадигме организации движения поездов можно утверждать, что технические средства обеспечения движения поездов находятся в частичном отрыве друг от друга и в своём большинстве напрямую не связаны [5]. Так, система ЖАТ находится практически в полном отрыве от устройств контактной подвески, частично в отрыве от объектов верхнего строения пути и искусственных сооружений, частично в отрыве от состояния подвижного состава. Например, событие искривления рельсового пути и на-

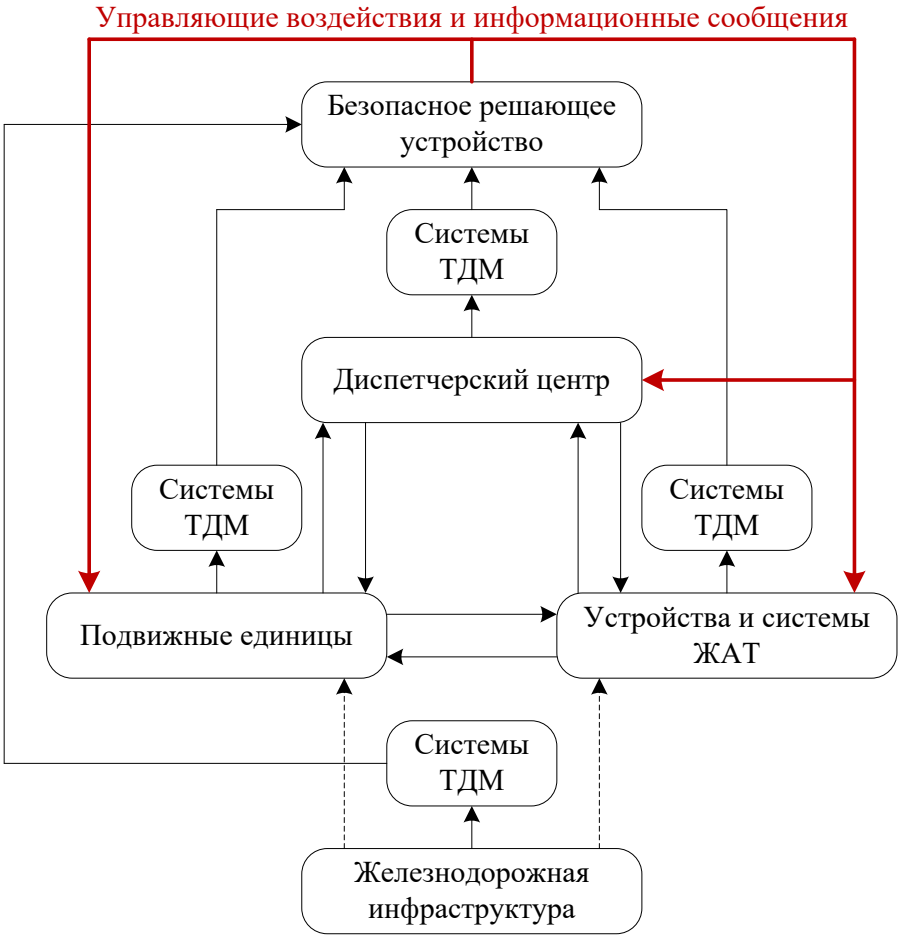

Рис. 1. Концептуальная организационная структура управления движением поездов [выполнено авторами].

рушения ширины колеи (выброс пути) при сохранении в целостности рельса никак не повлияет на систему ЖАТ: на светофоре, ограждающем въезд на участок с дефектом пути, будет гореть разрешающее показание. Более того, дать запрещающее показание в системе ЖАТ даже в таком случае искусственно, без нарушения правил эксплуатации средств автоматики невозможно.

Таким образом, рассуждения о безопасности устройств и систем ЖАТ становятся не вполне состоятельными в смысле безопасности перевозочного процесса в условиях отсутствия учёта безопасности инфраструктурного комплекса и подвижного состава в целом. Многолетний опыт эксплуатации и разработки систем ЖАТ, а также анализ научно-технической литературы по данному направлению показали, что в реальности при рассмотрении безопасности устройств ЖАТ можно говорить о некотором свойстве ограниченной безопасности. Учитывается полностью внутренняя безопасность и частично внешняя.

Определение 1. Под внутренней безопасностью понимается свойство невозможности влияния неисправностей и ошибок в вычислениях на исполнение алгоритмов в части исключения переходов в опасные состояния.

Определение 2. Под внешней частичной безопасностью понимается свойство возможности парирования только тех внешних дестабилизирующих факторов, которые могут быть зафиксированы объектом автоматики.

Реализация устройств и систем ЖАТ в такой парадигме позволила построить безопасные управляющие комплексы, однако не позволила достичь абсолютной безопасности в движении поездов, так как состояния объектов инфраструктуры и подвижного состава учитываются в управляющих комплексах только частично.

Технический объект железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава характеризуется следующими множествами:

$<X, Z, A, P, S>$, (1)

где X – множество входов;

Z – множество выходов;

A – множество реализуемых алгоритмов;

P – множество рабочих параметров;

S – множество состояний.

Для построения полностью безопасной системы автоматики требуется решать задачу получения информации о состоянии объекта, вовлечённого в перевозочный процесс (или его обеспечивающего), с заданной достоверностью $D \in [0,1]$. На практике эта величина должна нормироваться и стандартизироваться. Безопасная система управления должна реализовываться за счёт применения технических средств встраиваемого и надстраиваемого тестирования и функционального диагностирования. Процедуры тестирования и функционального диагностирования должны производиться автоматически, в заранее выбранных и научно обоснованных контрольных точках и с заранее установленными и обоснованными периодами, реализуя определённую стратегию мониторинга [21–23].

При решении задачи диагностирования и мониторинга может контролироваться некоторое подмножество каждого из представленных выше множеств $X^* \subseteq X$, $Z^* \subseteq Z$, $A^* \subseteq A$, $P^* \subseteq P$, $S^* \subseteq S$. Это позволяет получать некоторое подмножество корректных и некорректных состояний каждого из объектов диагностирования. Для каждого из таких объектов выделяется множество корректных состояний S_g и множество некорректных состояний S_f: $S = S_g \cup S_f$. На множестве S_f можно выделить те состояния S_R, которые связаны с конкретным заданным риском для управления движением поездов: $S_R \subset S_f$.

Утверждение. Все состояния S_R должны для каждого технического объекта фиксироваться и передаваться на единое безопасное решающее устройство для выработки им должных реакций для перехода в защитные состояния для управления движением поездов и информационных сообщений для участников движения и эксплуатации объектов диагностирования.

Таким образом, отдельные системы ТДМ объектов инфраструктуры, подвижного состава и ЖАТ должны вырабатывать сигналы о достижении своих состояний S_R с заданной достоверностью D. Они либо напрямую (что сложнее технически), либо через безопасную платформу аналитики и принятия решения должны передавать сигналы для перехода во множество защитных состояний для системы управления перевозочным процессом. На рис. 1 изображена структура взаимодействия объектов железнодорожного транспорта.

2. Основные правила синтеза безопасной системы управления движением поездов

Безопасность перевозочного процесса существенно зависит от безопасности функционирования устройств и систем ЖАТ [1–3]. Фактически устройства и системы ЖАТ выполняют роль регулирующих технических средств для передачи достоверных данных машинисту. Традиционным способом передачи служит использование светофорной сигнализации. Каждый цветовой сигнал обозначает определённое действие для машиниста. Число таких сигналов весьма лимитировано, что ограничивает и градации для действий.

В процессе функционирования любое устройство ЖАТ или же вся система могут переходить между конечным множеством определённых заранее состояний. В таком случае в качестве математической модели объектов ЖАТ может использоваться модель абстрактного конечного автомата Z:

$Z = <\mathrm{X}, S, \Omega, s_0, \varphi, \psi>$, (2)

где X – множество входных состояний, соответствующих булевым векторам, формируемым на входах объекта $x_1, x_2, \ldots, x_q$;

S – множество состояний автомата, соответствующих булевым векторам внутренних переменных $y_1, y_2, \ldots, y_r$;

Ω – множество выходных состояний автомата, соответствующих булевым векторам, формируемым на выходах объекта внутренних переменных $z_1, z_2, \ldots, z_p$;

s_0 – начальное состояние ($s_0 \in \mathrm{S}$);

$\varphi: \mathrm{X} \times S \rightarrow S$ – функция переходов, отображающая множество $\mathrm{X} \times S$ в множество S;

$\psi: \mathrm{X} \times S \rightarrow \Omega$ – функция переходов, отображающая множество $\mathrm{X} \times S$ в множество Ω.

При синтезе безопасных конечных автоматов можно использовать алгебру регулярных событий [24]. Автомат в таком случае рассматривается как преобразователь входных слов в выходные. Событием E для конечного автомата считается любое множество входных слов. Для описания алгоритма рабо-

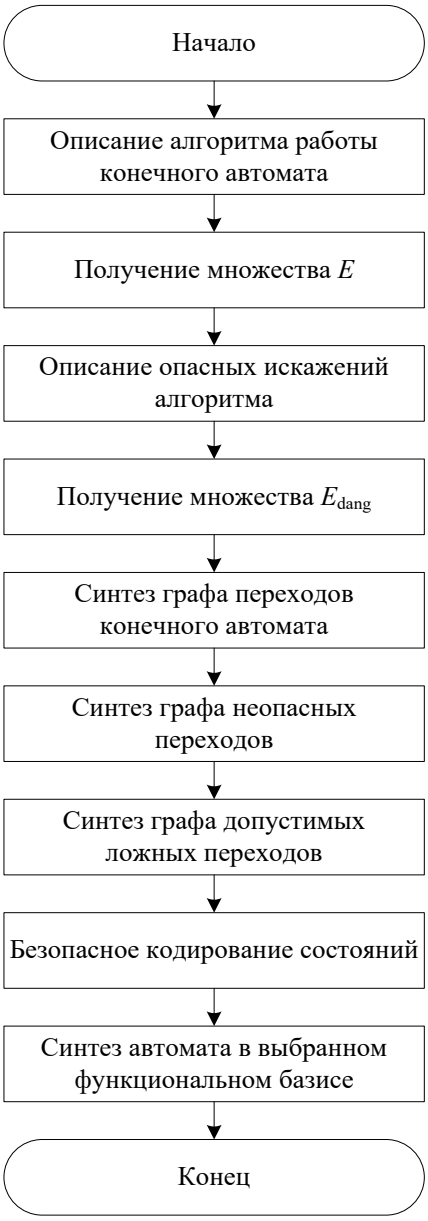

Рис. 2. Упрощённый алгоритм синтеза безопасного автомата [выполнено авторами].

ты конечного автомата требуется найти событие, включающее в себя все разрешённые слова – такие слова, которые представлены в автомате. Это делается с применением трёх операций: дизъюнкции, произведения и итерации множеств событий. Если это сделать с помощью обозначенных трёх операций, то событие E является регулярным. Известно [25], что любой конечный автомат представляет собой регулярное событие и наоборот, любое регулярное событие может быть представлено в конечном автомате.

События в конечном автомате могут реализовывать корректные переходы и некорректные, в том числе, опасные – нарушающие безопасность технологического процесса, реализуемого описываемым объектом. Множество опасных событий обозначим через E_{dang}.

Отказы в устройстве, которое описывается рассматриваемым автоматом, приводят к тому, что возникают ложные переходы автомата – вместо состояния S_i автомат переходит в состояние S_z ($S_i \rightarrow S_z$). Фактически исходный автомат трансформируется, и регулярные события в нём уже описываются выражением [24]:

$$E^*_k = E_i E_{z(k)}, \quad (3)$$

где E_i – все события (множество слов), переводящие исходный автомат из начального состояния в состояние S_i;

$E_{z(k)}$ – все события, переводящие автомат из состояния S_i в состояния, представляющие события E_k, где k – номер опасного события.

Определение 3. Конечный автомат является безопасным, если исключает все ложные переходы, связанные с реализацией опасных событий, вероятность возникновения которых требуется учитывать.

В [10; 24] определено следующее.

Определение 4. Ложный переход автомата называется опасным, если при его возникновении для всех k выполняется условие:

$$E^*_k \cap E_{dang} \neq \varnothing. \quad (4)$$

Определение 5. Ложный переход автомата называется защитным, если при его возникновении для всех k выполняется условие:

$$E^*_k \cap E_{dang} = \varnothing. \quad (5)$$

Введённое понятие опасного отказа легло в основу работы [24], где была доказана теорема об отсутствии опасных отказов в конечном автомате.

Теорема 1. Опасные отказы в работе конечного автомата отсутствуют тогда и только тогда, когда для всех ложных переходов $S_i \rightarrow S_z$ и для всех ложных событий k выполняется условие:

$$E_{S_i \rightarrow S_z} E_{z(k)} \cap E_{dang} = \varnothing, \quad (6)$$

где $E_{S_i \rightarrow S_z}$ есть события, соответствующие ложным переходам автомата из состояния S_i в состояние S_z.

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

Упрощённый алгоритм синтеза безопасного автомата представлен на рис. 2. В нём на финальном этапе подразумевается безопасное кодирование состояний конечного автомата с учётом графа неопасных ложных переходов.

Необходимо подчеркнуть, что в данном случае конечный автомат, описывающий работу некого устройства или некой системы ЖАТ, будет безопасным со следующих позиций:

1) с позиции внутренней безопасности – отказы и сбои не приведут к переходу ни в одно из состояний риска для движения поездов S_R;

2) с позиции внешней безопасности – внешние дестабилизирующие факторы не приведут к переходу ни в одно из состояний риска для движения поездов S_R.

Однако при этом конечный автомат никак не будет учитывать состояния S_R тех объектов инфраструктуры и подвижного состава, которые непосредственно не взаимодействуют с данным конечным автоматом. Это просто не определено в множествах событий E_{dang}. Таким образом, конечный автомат будет безопасным, однако он будет являться только ограниченно безопасным и не сможет выдать сигнала перехода в защитное состояние при возникновении одного из переходов в состояния S_R тех объектов инфраструктуры и подвижного состава, которые непосредственно не взаимодействуют с данным конечным автоматом.

Определение 6. Полностью безопасным конечным автоматом устройства или системы управления движением поездов будет являться конечный автомат, который способен переходить во множество защитных состояний при возникновении всех заданных переходов в состояния с установленным уровнем риска нарушения безопасности движения поездов для всех объектов инфраструктуры и подвижного состава.

Во множество входных воздействий конечного автомата следует добавить ещё одну переменную $\theta \in \{0,1\}$. Переменная θ принимает значение 1 в том случае, если безопасный решатель фиксирует переход одного из объектов мониторинга, с состоянием которого связано обеспечение безопасности перевозочного процесса, в одно из состояний S_R. В остальных случаях она равна 0.

В описанной логике работы безопасного решателя реализуется концепция строгого запрета для движения – виртуальный заградительный сигнал (красное показание светофора). В таком случае переход осуществляется в единственное защитное состояние, уже имеющееся для конечного автомата: $s_{\text{safety}} \in S$. Выход из этого состояния осуществляется при участии человека.

Однако в практической реализации в конечный автомат может быть введён не один сигнал θ, а кодовый вектор $<\theta_1\ \theta_2\ \ldots\ \theta_t>$, соответствующий одному из защищённых состояний с заданной градацией. Например, если требуется передать информацию о снижении скорости проследования именно через систему сигнализации, то можно ввести аналог трёх цветов: «зелёный», «жёлтый» и «красный». Это потребует две переменные для кодирования. Если требуется передавать градацию скоростей в диапазоне 10 км/ч в промежутке от 0 до 300 км/ч, то потребуется передать 30 защитных состояний и, соответственно, требуется использовать пять двоичных переменных.

В общем случае потребуется изначальное введение $t = \lceil \log_2 N \rceil$ (N – число защитных состояний) переменных для кодирования. Кроме того, должны быть заданы и условия выхода из них без участия человека. Эта задача требует особой проработки в будущем.

Отсюда следует такое умозаключение.

Теорема 2. Автомат будет безопасным в том случае, если:

$$\forall S_{R_j} : E_{dang} \supset E^j_{dang}, j \in \{1,2,...,n\}, \quad (7)$$

где n – число подсистем диагностирования и мониторинга.

Следуя (7) и реализуя системы диагностирования и мониторинга в соответствии с требованиями к безопасным системам, нормируя уровень достоверности фиксируемых диагностических событий, можно перейти к реализации систем управления перевозочным процессом нового, реально более высокого уровня безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на колоссальный прогресс в развитии техники и технологий за прошедший век, системы управления во многих областях промышленности и транспорта не реализуются таким образом, чтобы можно было сказать, что они полностью безопасны. Ограниченность свойства безопасности для систем управления связана с различными факторами. С одной стороны, с человеческим фактором, не исключающим возможности внесения ошибок в проектную документацию и ошибок при монтаже устройств и проведении тестирования в процессе пусконаладочных работ. С другой стороны, с отсутствием комплексного подхода при рассмотрении процесса синтеза системы управления отдельными устройствами или подсистемами без полного учёта всех взаимодействующих объектов. Это в полной мере отражается на примере систем ЖАТ. Они являются ограниченно безопасными, так как не передают машинисту данные о допустимых скоростях для движения с учётом состояния объектов инфраструктурного комплекса. В предложенной статье сделан упор именно на решение этой проблемы и предложено синтезировать системы управления движением поездов с тесной интеграцией со средствами автоматического мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры.

Решение задачи синтеза полностью безопасной системы управления движением поездов в настоящее время напрямую невозможно. Это связано со сложившимся комплексом нормативной документации, исключающей использование диагностических данных от внешних систем напрямую в управлении. Требуется решить главную подзадачу – создать методику синтеза систем технического диагностирования и мониторинга, которые могут быть сертифицированы на какой-либо из уровней функциональной безопасности [26]. Так как задача относительно новая, целесообразно двигаться по пути эволюции действующих, не сертифицируемых на функциональную безопасность, внешних систем диагностирования и мониторинга к системам нового уровня безопасности (Система ТДМ 0 (современная реализация, не сертифицируемая на функциональную безопасность) → Система ТДМ 1 → … → Система ТДМ 4, по числу уровней полноты безопасности SIL 1…SIL 4). Это потребует и решения следующих задач:

• определение критериев опасного отказа систем диагностирования и мониторинга;

• определение функциональных требований к архитектуре, составляющим и к самим системам мониторинга;

• использование риск-ориентированного подхода к определению и ранжированию диагностических событий по степени влияния на безопасность движения поездов;

• нормирование достоверности фиксируемых событий;

• определение способов безопасной увязки решающих систем с управляющими комплексами (данные вопросы, например, для устройств ЖАТ рассматривались ранее в [21–23]).

Следование принципам комплексного учёта параметров объектов инфраструктуры железных дорог и подвижного состава позволит достичь существенного повышения (и даже скачка!) в уровне безопасности движения поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=3949&option_lang=rus. Доступ 26.02.2022.

2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики: Монография / Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с. ISBN 5-277-01690-2.

3. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. – М.: ВИНИТИ РАН, 1999. – 331 с. ISBN 5-900242-29-3.

4. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 2–8. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=44000551 [платный доступ].

5. Railway Signalling and Interlocking: International Compendium. 3ed ed. Eds.: Dr. G. Theeg, Dr. S. Vlasenko. Germany, PMC Media House GmbH, 2020, 560 p. ISBN 978-3-96245-169-1.

6. Joung, Eui-jin; Lee, Changmu; Lee, Hanmin; Kim, Gil-dong. Software Safety Criteria and Application Procedure for the Safety Critical Railway System. 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 26–30 October 2009, Seoul, Korea (South), pp. 1–4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356897 [ограниченный доступ].

7. Markov, D. S., Nasedkin, O. A., Manakov, A. D., Vasilenko, M. N., Kotenko, A. G., Belozerov, 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, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 356–361. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224925 [ограниченный доступ].

8. Huang, Lujiang. The Past, Present and Future of Railway Interlocking System. IEEE 5th International

Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), 11–13 September 2020, pp. 170–174. DOI: 10.1109/ICITE50838.2020.9231438 [ограниченный доступ].

9. Qian, Jinlong; Guo, Wei; Zhang, Hongtao; Li, Xiaona. Research on Automatic Test Method of Computer-Based Interlocking System. International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), 3–5 July 2020, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 298–302. DOI: 10.1109/CISCE50729.2020.00066 [ограниченный доступ].

10. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. – М.: Наука, 2021. – 229 с. ISBN 978-5-02-040877-7.

11. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – СПб.: ПГУПС, 2016. – 171 с. ISBN 978-5-7641-0933-6.

12. Fritz, C. Intelligent Point Machines. Signal+Draht, 2018 (110), Iss. 12, pp. 12–16. [Электронный ресурс]: https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=469469&lng=en [ограниченный доступ].

13. Heidmann, L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance. Signal+Draht, 2018, Iss. 9, pp. 70–75. [Электронный ресурс]: https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=325895&lng=en [ограниченный доступ].

14. Efanov, D., Lykov, A., Osadchy, G. Testing of relay-contact circuits of railway signalling and interlocking. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095 [ограниченный доступ].

15. Wernet, M., Brunokowski, M., Witt, P., Meiwald, T. Digital Tools for Relay Interlocking Diagnostics and Condition Assessment. Signal+Draht, 2019 (111), Iss. 11, pp. 39–45. [Электронный ресурс]: https://eurailpressarchiv.de/SingleView.aspx?show=1136153&lng=en [ограниченный доступ].

16. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности и надёжности микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2007. – Т. 2. – С. 273–274. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=15619177. Доступ 26.02.2022.

17. Бочков К. А., Сивко Б. В. Выбор и определение функции безопасности при верификации микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Надёжность. – 2014. – № 2 (49). – С. 101–108.

18. Марков Д. С., Наседкин О. А. Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надёжности и безопасности систем железнодорожной автоматики // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – № 1. – С. 23–34. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-23-34.

19. Ковкин А. Н. Релейно-полупроводниковая коммутация цепей в безопасных устройствах сопряжения на основе электромагнитных реле // Транспорт Урала. – 2020. – № 2. – С. 31–35. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-31-35.

20. Бочков К. А., Комнатный Д. В. Обеспечение функциональной и информационной безопасности микроэлектронных систем управления движением поездов с учётом новых видов угроз // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2020. – № 2 (41). – С. 4–8. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=44780175. Доступ 26.02.2022.

21. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Аганов И. А. Увязка систем управления с техническими средствами диагностирования и мониторинга объектов инфраструктуры // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 6. – С. 25–29. DOI: 10.34649/AT.2021.6.6.004 [платный доступ].

22. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Аганов И. А. Барьерная функция систем мониторинга в увязке с системами управления движением поездов // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 3. – С. 51–56. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46683409 [платный доступ].

23. Efanov, D., Osadchy, G., Aganov, I. Fundamentals of Implementation of Safety Movement of Trains under Integration of Control Systems with Hardware for Railway Infrastructure Facilities Monitoring. Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021), Cracow, Poland, September 22–25, 2021, Vol. 1, pp. 391–396. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660985 [ограниченный доступ].

24. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. О синтезе конечных автоматов с исключением опасных отказов // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 8. – С. 93–99. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=8917&option_lang=rus. Доступ 26.02.2022.

25. Shannon, C. E., McCarthy, J. Automata Studies. In: Annals of Mathematics Studies, Vol. 34. Princeton, New Jersey, Prinston University Press, 1956, 285 p. ISBN 9780691079165.

26. Smith, D. J., Simpson, K. G. L. Functional safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards. 2nd ed., Simpson, Elsevier, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK and Burlington, MA, 2004, 263 p. ISBN 978-0750652704.

Информация об авторах:

Ефанов Дмитрий Викторович *– доктор технических наук, доцент, член Института инженеров электротехники и электроники (IEEE member), профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Транспортной и строительной безопасности», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), Москва / Санкт-Петербург, Россия, TrES-4b@yandex.ru.*

Хорошев Валерий Вячеславович *– кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, hvv91@icloud.com.*

Осадчий Герман Владимирович *– кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный инженер ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», старший преподаватель кафедры автоматики и телемеханики на железных дорогах Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, osgerman@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 09.02.2022, одобрена после рецензирования 27.05.2022, принята к публикации 20.06.2022.