

Различные подходы к автономному вождению для железных дорог

Various approaches to autonomous driving in railways

Шебе Х.¹, Шубинский И.Б.^{2*}, Розенберг Е.Н.²
Schäbe H.¹, Shubinsky I.B.^{2*}, Rozenberg E.N.²

¹ TÜV Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия

² АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация

¹ TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany

² Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russian Federation

*igor-shubinsky@yandex.ru



Шебе Х.



Шубинский И.Б.



Розенберг Е.Н.

Резюме. В данной статье мы анализируем различные технические решения для автономного вождения. В зависимости от роли автономной системы для нее могут потребоваться различные уровни полноты безопасности. Мы рассматриваем три основные архитектуры. Первая – это просто система поддержки, не требующая уровня полноты, а только базовую полноту. Вторая – простая замена машиниста один к одному, что соответствует уровню SIL 1, вплоть до SIL 2. Третья архитектура – интеграция функций АТО в систему защиты безопасного поезда, что соответствует требованиям SIL 4.

Abstract. In this paper, we analyse various technical solutions for autonomous driving. Depending on the role of an autonomous system, different safety integrity levels may be required. We examine the three primary architectures. The first one is simply a support system that only requires a basic integrity, rather than a level. The second one is a simple replacement of the driver, which corresponds to SIL 1 up to SIL 2. The third architecture is an integration of ATO into a safe train protection system, which corresponds to SIL 4.

Ключевые слова: Функциональная безопасность, автоматическое управление поездом, архитектура безопасности, требования безопасности

Keywords: functional safety, autonomous train driving, safety architecture, safety requirements

Для цитирования: Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог // Надежность. 2025. №1. С. 4-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10>

For citation: Schäbe H., Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. Various approaches to autonomous driving in railways. Dependability 2025;1:4-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10>

Поступила: 15.11.2024 / **После доработки:** 10.01.2025 / **К печати:** 05.03.2025

Received on: 15.11.2024 / **Revised on:** 10.01.2025 / **For printing:** 05.03.2025

Введение

В данной статье мы анализируем различные технические решения для автономного вождения. В зависимости от роли автономной системы для нее могут потребоваться различные уровни полноты безопасности.

За последние 20 лет в железнодорожном транспорте можно выделить две основные тенденции. С одной стороны, были разработаны системы метро без машинистов. Благодаря четко определенной среде автоматизировать систему метрополитена относительно просто. Путь обычно отделен от пассажиров и нарушителей, поскольку метро проходит в тоннелях, по наземному рельсовому пути, и на станциях используются платформенные перегородки, а система метрополитена защищена системой обнаружения вторжений.

С другой стороны, и на железных дорогах существует большая заинтересованность хотя бы в частичной автоматизации. В последние годы передвижение на железных дорогах базировалась в основном на машинисте, который по-прежнему необходим в соответствии с законодательством большинства стран.

Для автоматизации используются следующие степени автоматизации [1]:

- GoA0 – операции в зоне прямой видимости;
- GoA1 – неавтоматизированное движение поездов;
- GoA2 – полуавтоматическое управление поездами;
- GoA3 – эксплуатация поездов без машиниста (DTO);
- GoA4 – беспилотное движение поездов (БДП).

Многие системы АТО представляют собой систему GoA2, в которой поезда движутся от станции к станции в автоматическом режиме, но в кабине еще находится

машинист. Машинист отвечает за закрытие дверей, обнаружение препятствий на пути перед поездом и действия в аварийных ситуациях

В качестве первого шага были проведены исследования, направленные на помощь машинисту в его работе, например, для экономии электрической энергии или топлива путем оптимизации разгона и торможения. При этом машинист по-прежнему полностью отвечает за безопасность. Следовательно, эта функция не является функцией безопасности.

Однако в дальнейших исследованиях [2, 3] ведутся поиски возможностей прямой замены машиниста поезда. Это означает, что машинист в поезде больше не присутствует, а управление поездом будет осуществляться автоматически.

В новой версии TSI CCS [4] тоже упоминается АТО. В разделе 2 мы исследуем возможность простой замены машиниста поезда технической системой один к одному. Если функции машиниста заменяются техническими системами, то ситуация усложняется. В разделе 2 мы также описываем выведение важных требований к безопасности. Третий раздел посвящен интегрированным системам, в которых функции машиниста интегрированы в систему автоматической защиты поезда.

1. Система помощи машиниста

В качестве первого шага для локомотивов были разработаны системы поддержки в чистом виде. Это было сделано под влиянием систем поддержки для дорожных транспортных средств, список которых может быть очень длинным, некоторые примеры см. в [5]:

- адаптивное управление расстояний и скоростью (ACC);
- адаптивное рулевое управление (активное рулевое управление);
- адаптивное шасси;
- адаптивный дальний свет (безбликовый дальний свет);
- адаптивные поворотные огни;
- вспомогательная система движения прицепа задним ходом / Trailer Assist;
- антиблокировочная система тормозов (ABS);
- предупреждение о движении задним ходом;
- вспомогательная система по выходу;
- автоматическое оповещение об аварии (eCall);
- помощь в зоне строительства;
- вспомогательная система старта на подъеме (Hill Holder);
- ассистент торможения (ассистент экстренного торможения);
- динамическая реакция рулевого управления (DSTC);
- ESP (электронная система стабилизации);
- обнаружение транспортных средств;
- обнаружение пешеходов;
- вспомогательная система ограничения скорости (распознавание дорожных знаков);

- система предупреждения задних столкновений;
- интеллектуальная система помощи при торможении / Intelligent Brake Assist (IBA);
- предупреждение о перекрестном движении;
- ассистент по торможению на поворотах;
- обнаружение источника света;
- вспомогательная система левого поворота;
- вспомогательная система маневренного тормоза;
- обнаружение усталости;
- помощник ночного видения;
- помощник по парковке и гаражам (помощник по парковке/выезду);
- голосовое управление;
- предупреждение о сходе с полосы движения;
- помощник при дорожных заторах;
- круиз-контроль;
- вспомогательная система контроля слепых зон (ассистент смены полосы движения);
- антипробуксовочная система.

Многие из них не нужны для железных дорог, поскольку поезд движется по четко определенному пути (рельсам) и защищен от столкновения и превышения скорости автоматической системой защиты поезда.

Тем не менее, некоторые системы помощи уже разработаны, см., например, [2]:

- позиционирование поездов;
- кривая торможения и разгона (небезопасная);
- ограничения скорости (небезопасные);
- АТО (automatic train operation) в комбинации с ETCS; расписание.

Все эти системы в классических АТО обычно не имеют уровня полноты безопасности.

Кроме того, при рассмотрении АТО для автоматических систем метрополитена существует четкое разделение на АТО (небезопасные) и АТП (безопасные), см., например, [6].

2. Прямая замена машиниста

Следующим шагом в развитии систем АТО является замена машиниста, т.е. установка на локомотив технических систем, которые возьмут на себя функции машиниста без изменения самого локомотива. Первым шагом в этом направлении должно стать определение требований безопасности, главным образом, допустимой интенсивности отказов соответствующих функций. Данный раздел в основном посвящен исследовательскому проекту «Критерии приемлемости рисков для автоматизированного вождения на железной дороге», который был выполнен по заказу Немецкого центра исследований железнодорожного транспорта, см. итоговый отчет [7] и статью [8]. В рамках этого проекта разработаны критерии приемлемости риска для систем АТО на железной дороге.

В частности, большое значение имеют три вопроса:

- 1) каков уровень безопасности текущей системы с машинистом;

2) каковы требования безопасности к техническим системам, заменяющим машиниста;

3) как эти требования могут быть сопоставлены и объединены.

Решающим фактором здесь является то, что система АТО должна обеспечивать как минимум тот же уровень безопасности, что и машинист.

Для вывода требований к безопасности используются два подхода. Первый из них ориентирован на анализ вероятности человеческой ошибки и требует, чтобы техническая система, заменяющая машиниста, была как минимум не хуже машиниста, а второй использует стандарт для вывода требований к функциям, заменяющим машиниста. В следующих двух подразделах обсуждаются результаты для функции обнаружения препятствий. Более подробная информация приведена, например, в [9].

2.1. Применение методов Hinzen и RARA для обнаружения препятствий на открытом пути

Для определения вероятности человеческой ошибки используются два метода: Hinzen и RARA, подробности и определение подходов см. в [9].

Оценка действий машинистов поездов с помощью RARA и Hinzen была определена междисциплинарной командой Берлинского технического университета в ходе модулируемого семинара. В табл. 1 оценивается действие «Обращение с препятствиями на открытом пути, если они явно воспринимаются как препятствие». Сюда относятся, например, встречные рельсовые транспортные средства на однопутных линиях. Результаты для обоих методов имеют схожий порядок величины, однако учет усталости, вызванной сменной работой, приводит к большему значению полученному с помощью RARA.

Более подробная информация приведена в [9].

2.2. Сравнение с допустимым уровнем опасных отказов технических систем

Не вдаваясь в подробности, параллельно с учетом человеческих ошибок была применена процедура определения TFFR (Tolerable Functional Failure Rate) – допустимая частота функциональных отказов – в соответствии с DIN V VDE 0831-103 [10]. Для типичных функций, таких как обнаружение препятствий, было получено значение $9 \cdot 10^{-7}$ 1/ч.

В основе человеческой ошибки и отказа технических систем лежат разные процессы. Сравнить эти величины можно следующим образом:

а) перевод вероятности человеческой ошибки на одно действие в интенсивность отказов в час, или

б) получение вероятности ошибки из интенсивности отказов.

Оба направления рассмотрения эквивалентны, хотя и принципиально различны. Если в а) функциональный отказ может быть устранен только ремонтом, то в б) сбои (самоустраняющиеся отказы). В а) интенсивность отказов определяется ожидаемым числом событий в единицу времени в интервале между двумя контрольными испытаниями. В случае б), напротив, применение методов по RARA и Hinzen происходит в сочетании с оценкой интенсивности требований.

Стандарты железнодорожной техники не знают PFD, т.е. средней вероятности отказа по требованию. Однако можно показать связь между PFD и TFFR, см., например, [16]

$$TFFR = PFD \cdot \lambda,$$

где λ – интенсивность требований.

Теперь в качестве интенсивности требований выбирается максимальная, которая получается из интенсивности требований машинисту поезда, а также из

Табл. 1. Результаты адаптированных методик по RARA и по Hinzen для действия «Обращение с препятствиями на открытой трассе, если они четко воспринимаются как препятствия»

	Выбор	Комментарий
Адаптированный Hinzen	Поведенческий уровень: Навыки	Для препятствия, которое четко распознается как соответствующее, реакция экстренного торможения предполагается сенсорно-моторной
	Повышение уровня стресса	–
	Благоприятные условия окружающей среды	–
	1×10^{-3}	Результат вероятности человеческой ошибки на действие
RARA адаптированная	Тип задачи R3	Для препятствия, которое четко идентифицируется как соответствующее, простой реакцией является начало экстренного торможения.
	Фактор влияния T2	Экстренное торможение должно быть выполнено как можно быстрее, чтобы предотвратить аварию или ограничить размер ущерба
	Фактор влияния T6	В случае небольших препятствий повреждения локомотива при столкновении незначительны, поэтому столкновение может остаться незамеченным.
	Фактор влияния P2	Предполагается, что определенная степень утомления, связанная с посменной работой, присуща железнодорожной системе.
	$8,6 \times 10^{-3}$	Верхняя граница интервала Вероятность человеческой ошибки на одно действие
	$2,9 \times 10^{-3}$	Нижняя граница интервала Вероятность человеческой ошибки на одно действие

интенсивности требований, соответствующей интервалу контрольных проверок.

Предполагается, что техническая система ежегодно подвергается тщательной проверке (контрольная проверка), в ходе которой выявляются все «спящие» неисправности. С другой стороны, требование к машинисту поезда воспринять и впоследствии отреагировать на отклонение может предъявляться реже, чем раз в год. В частности, учитывая большое количество функций, все требования к машинисту распределены между многими функциями, поэтому интенсивность требования каждой функции будет соответственно небольшой. Тем не менее, требование на реакцию машиниста и ежегодная контрольная проверка действуют совместно, так что спрос возникает не реже одного раза в год. Это оправдывает максимальное значение.

Таким образом, интенсивность требований определяется как значение $1/8760$ 1/ч. Это значение может быть подтверждено следующим образом. Из нидерландского источника можно взять показатели для столкновения поездов с препятствиями в Нидерландах, а также для пожара – типичных событий, на которые приходится реагировать машинисту поезда [11]. В значительной степени машинист не успевает среагировать вообще, просто в силу большого тормозного пути поезда по отношению к его скорости. Это означает, что частота требований к машинисту находится примерно на одном уровне с приведенными выше значениями. Не вдаваясь в подробности, можно получить результат $8,8 \cdot 10^{-5}$ 1/ч для интенсивности требований. Это подтверждает выше выведенное значение.

Используя $1/8760$ 1/ч для преобразования значений PFD, полученных в 2.1, получаем результаты, приведенные в табл. 2.

Табл. 2. Результаты, полученные в разделе 2, и производные ставки

Источник	PFD	TFFR
Hinzen модифицированный	0,001	$1,14 \cdot 10^{-6}$ 1/ч
RARA модифицированная	0,0029... 0,0086	$3,31 \cdot 10^{-7}$... $9,82 \cdot 10^{-7}$ 1/ч

В проекте ATO-RISK проводились сравнительные расчеты для отдельных функций, при этом следует учитывать, что на результат влияют технические эксплуатационные барьеры, вновь создаваемые технологией ATO, и технические барьеры, исчезающие с удалением машиниста.

Кроме того, был проведен расчет на основе принципа MEM для принятия риска. Данные представлены на рис. 1.

Видно, что полученные значения TFFR на основе [10], RARA и MEM в принципе совпадают. Значения, полученные по Hinzen, меньше, что можно объяснить тем, что Hinzen не рассматривает весь процесс, начиная

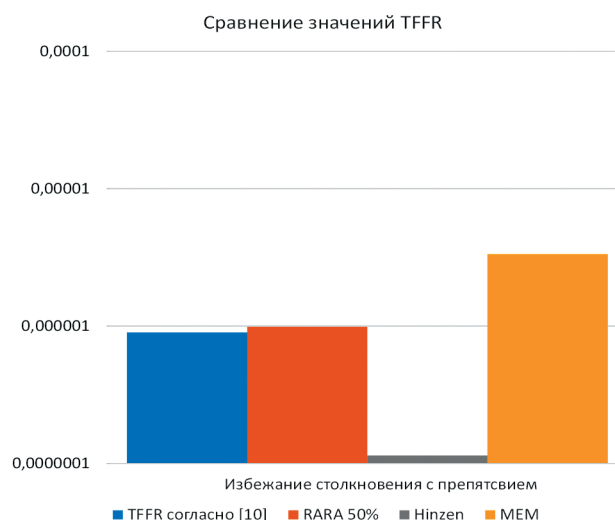


Рис. 1. Сравнение подходов [10] и RARA / Hinzen

с восприятия, затем обработки и реакции, пренебрегая двумя другими этапами, что приводит к меньшим значениям, см. [11].

Главный результат заключается в том, что система, заменяющая машиниста поезда, должна иметь уровень полноты безопасности порядка SIL1 / SIL2. Важно отметить, что этот результат не распространяется на условия поддержки работы машиниста другими агентами на линии (как это предусмотрено в Правилах эксплуатации), например, диспетчером-контролером по безопасности, дежурным по станции, системой контроля бдительности машиниста и т.д. С учетом этих обстоятельств следует ориентироваться на то, что система, заменяющая машиниста поезда, должна иметь уровень полноты безопасности порядка SIL3 или даже выше.

Однако возможны и специфические ситуации, как, например, на голландской чисто грузовой линии BetuweRoute [1]. Для автоматизации этой линии необходимо учитывать следующие специфические условия:

- линия является чисто грузовой, пассажирские поезда по ней не ходят, что снижает тяжесть аварии. Единственным погибшим может быть машинист поезда, которого не было бы при автоматическом управлении;
- линия оснащена европейской системой ETCS, обеспечивающей непрерывное ограничение скорости и запрещающей проезд на красный свет светофора с уровнем SIL4;
- доступ на линию ограничен, линия полностью оборудована шумозащитными стенками, которые полностью исключают доступ на линию посторонних лиц и т.д.

В такой ситуации уровень полноты безопасности технических систем может быть даже снижен, возможно, до базовой полноты безопасности.

Конкретная реализация этих функций здесь рассматриваться не будет, ее необходимо оставить для конкретных проектов.

3. Интеграция в систему автоматической защиты поездов

В этом разделе мы рассмотрим ситуацию, в которой функции, заменяющие машиниста поезда, интегрированы в систему защиты поезда. Поскольку опыт работы с системами тяжелого рельсового транспорта SIL4 практически отсутствует (одно из немногих исследований можно найти в [12]), мы будем использовать результаты для городских транспортных систем. В рамках финансируемого Европейским Союзом исследовательского проекта ModSafe интенсивно изучались опасности, риски и меры по снижению рисков для автоматических городских транспортных систем.

Здесь различают степени автоматизации, начиная со степени 0 и заканчивая степенью 4. В табл. 3 перечисле-

ны все функции безопасности. Некоторые из них имеют отношение к машинисту, который будет заменен при внедрении системы АТО. К таким функциям относятся:

- обнаружение препятствий;
- предотвращение столкновения с людьми на путях;
- падение человека между транспортными средствами или на пути;
- контролировать состояние поезда.

На основе специального подхода к определению уровней полноты безопасности для выбранных четырех функций были получены следующие уровни полноты безопасности, предполагающие их реализацию в автономных системах [14].

Табл. 4 составлена для непрерывно используемых функций.

Таблица 3 Степень автоматизации и функции безопасности (см. [13])

	Основные функции управления движением	Операции в зоне прямой видимости GoA0	Неавтоматизированное движение поездов с частичной автоблокировкой GoA1a	Неавтоматизированное движение поездов с автоблокировкой GoA1b	Полуавтоматическое управление поездами. GoA2	Эксплуатация поездов без машиниста (DTO)GoA3	Беспилотное движение поездов (БДП) GoA4
Безопасное движение поездов	Безопасная маршрута	X	Система	Система	Система	Система	Система
	Безопасное расстояние между поездами	X	Система	Система	Система	Система	Система
	Ограничение скорости	X	X (Частично под контролем системы)	Система	Система	Система	Система
Водить поезд	Ускорение и тормоз	X	X	X	Система	Система	Система
Наблюдение пути	Детектирование препятствий	X	X	X	X	Система	Система
	Предотвращение столкновения с людьми на релсах	X	X	X	X	Система	Система
Обмена пассажирами	Управление дверями	X	X	X	X	X	Система
	Падение пассажиров между поездом и платформы	X	X	X	X	X	Система
	Безопасное отправление поезда	X	X	X	X	X	Система
Другие функции	Ввод и вывод из эксплуатации подвижного состава	X	X	X	X	X	Система
	Мониторинг состояния поезда	X	X	X	X	X	Система
Обнаружение и управление опасными ситуациями	Диагностика, детектирование пожара, схода с рельсов управление чрезвычайными ситуациями	X	X	X	X	X	Система
X – Ответственность персонала, который может быть опционально совмещен или контролировано системой							

Табл. 4. Уровни полноты безопасности

Функция безопасности	Уровень полноты				
	GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Предотвращение травм, вызванных падением человека между платформой и поездом (вне ответственности персонала)	–	1 – 2	1 – 2	1 – 2	1 – 2
Предотвращение травм, вызванных защемлением человека между экранными дверями платформы и поездом	–	3	3	3	3

Так называемые функции по требованию были проанализированы в [15]. Здесь различные GoA не различались, а для случая, когда функция необходима, был выведен только уровень целостности безопасности. В соответствии с [15] для функций по требованию необходимо согласовать вероятность отказа по требованию, интенсивность спроса и допустимую интенсивность функциональных отказов. Этот же метод был применен в разделе 2 и использовался в работах [7–11].

В [15] перечислены следующие функции:

- обнаружение огня и дыма: SIL 3;
- контроль путей рядом с платформами: SIL 3.

Интересно, что MODSafe не дает явного результата для функции «обнаружение препятствий»: [14] ссылается на [15], а [15] поддерживает только утверждение, что обнаружение препятствий является функцией по требованию.

Для того чтобы определить уровень безопасности функций АТО, особенно обнаружения препятствий, в случае полностью интегрированной и автоматизированной системы, необходимо сделать предположения о системе защиты поезда.

Предположим, что система обнаружения препятствий интегрирована в систему технического зрения, которая также используется для определения состояния сигналов. Определение состояния сигналов относится к таким функциям, как безопасное движение поездов. В этом случае функция обнаружения сигналов должна иметь уровень SIL4, см., например, [14]. Поскольку обнаружение препятствий использует эту функцию и не может быть отделено от функции защиты поезда, оно также должно иметь уровень надежности SIL4. Это подтверждается исследованием [17], в котором заявлен уровень SIL4 для системы технического зрения, используемой для позиционирования поезда.

Заключение

В данной работе рассмотрены требования и возможности различных подходов к системам автоматического управления поездом. Первый тип систем – это чисто вспомогательные системы, которые поддерживают машиниста, но не заменяют его. Вторая категория – это системы, которые непосредственно заменяют машиниста, не затрагивая существующую систему автоматической защиты поезда. К третьей категории относятся интегрированные системы, т.е. функции машиниста полностью интегрированы в систему защиты локомотива.

Можно ожидать, что и в железнодорожных системах будет происходить развитие параллельное тому, которое характерно для автомобильного транспорта. В зависимости от имеющихся на рынке технических компонентов можно выбирать различные архитектуры и постепенно заменять машиниста техническими системами, начиная с самых простых ситуаций.

Библиографический список

1. Hoekstra S., Middelkoop D., de Vries D. et al. ATO Verkenning Betuweroute Eindrapportage, 1.0, 21.7.2020, ProRail.
2. Lieskovsky A., Mysliviec I., Zemlicka M. Automatic Train Operation: History and Open Questions // VEHITS 2020 – 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. 2020. Pp. 260-267.
3. Schäbe H. Autonomes Fahren auf der Schiene und der Straße – Erfahrungen nutzbar machen für die Schiene // Fachtagung Autonomes Fahren und Betriebshofautomatisierung im Schienenverkehr (30.09.2021 – 01.10.2021). Potsdam, 2021.
4. ERA, TSI revision 2022. Digital Rail and Green Freight. Changes proposed to the CCS TSI. Version 1.0, 2022-03-18.
5. Tigadi A., Gujanatti R., Ginchi A., Advanced Driver Assistance Systems // International Journal of Engineering Research and General Science. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 151-158.
6. Schäbe H., Wigger P. Experience with SIL Allocation in Railway Applications // 4th International Symposium “Programmable Electronic Systems in Safety Related Applications”, TÜV, 3-4 May 2000. Cologne, 2000.
7. Braband J., Evers B., Kinas M. et al. Risikoakzeptanzkriterien für das automatisierte Fahren auf der Schiene // Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 40 (2023). DOI: 10.48755/dzsf.230008.01
8. Braband J., Lindner L., Rexin F. Risk analysis for obstacle detection in automated driving // Signal & Data-communication. 2023. No. 3. Pp. 12-20.
9. Adebahr F., Schäbe H. Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler und Ausfallraten technischer ATO-systeme // Signal und Draht. 2023. Vol. 3(115). Pp. 21-29.
10. DIN VDE V 0831-103:2020-09 Электрические системы железнодорожной сигнализации – Часть 103: Определение требований безопасности для технических функций в железнодорожной сигнализации. 2020.
11. Braband J., Schäbe H. Risikoanalyse für das Automatisierte Fahren – Validierung und Erkenntnisse // Signal und Draht. 2023. Vol. 4(115). Pp. 6-12.
12. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Шебе Х. К оценке безопасности системы автоведения поездов // Надежность. 2021. Т. 21. № 4. С. 31-37.
13. MODSAFE, WP2–D2.2 Consistency analysis and Final hazard Analysis. TU Dresden, DEL_D2.2_TUD_WP2_100430_V1.1, 2010-04-30.
14. MODSAFE, WP4–D4.2 Analysis of Safety requirements for MODSafe Continuous Safety Measures and Functions. DEL_4.2_UITP_WP4_11021_V2.0, 2011-01-21
15. MODSAFE, WP4.3–D4.3 Analysis of On Demand Functions. DE_D4.3_3_UITP_WP4_120220_V 1.3, 2021-02-15.
16. vom Hövel R., Braband J., Schäbe H. The probability of failure on demand – the why and the how // Proc. Int. Conf. on Computer Safety, SafeComp 2009, LNCS 5775. Springer, Berlin-Heidelberg, 2009. Pp. 46-54.

17. Smaki B. Artificial Intelligence applications for railway signalling // KTH Stockholm, 2021.

References

1. Hoekstra S., Middelkoop D., de Vries D. et al. ATO Verkenning Betuweroute Eindrapportage, 1.0, 21.7.2020, ProRail.
2. Lieskovsky A., Mysliviec I., Zemlicka M. Automatic Train Operation: History and Open Questions. In: Proceedings of VEHITS 2020 – 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems; 2020. Pp. 260-267.
3. Schäbe H. Autonomes Fahren auf der Schiene und der Straße – Erfahrungen nutzbar machen für die Schiene. Fachtagung Autonomes Fahren und Betriebshofautomatisierung im Schienenverkehr (30.09.2021 – 01.10.2021). Potsdam; 2021.
4. ERA, TSI revision 2022. Digital Rail and Green Freight. Changes proposed to the CCS TSI. Version 1.0, 2022-03-18.
5. Tigadi A., Gujanatti R., Ginchi A., Advanced Driver Assistance Systems. *International Journal of Engineering Research and General Science* 2016;4(3):151-158.
6. Schäbe H., Wigger P. Experience with SIL Allocation in Railway Applications. In: Proceedings of the 4th International Symposium “Programmable Electronic Systems in Safety Related Applications”, TÜV, 3-4 May 2000. Cologne; 2000.
7. Braband J., Evers B., Kinas M. et al. Risikoakzeptanzkriterien für das automatisierte Fahren auf der Schiene. Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 40 (2023). DOI: 10.48755/dzsf.230008.01.
8. Braband J., Lindner L., Rexin F. Risk analysis for obstacle detection in automated driving. *Signal & Datacommunication* 2023;3:12-20.
9. Adebahr F., Schäbe H. Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler und Ausfallraten technischer ATO-systeme. *Signal und Draht* 2023;3(115):21-29.
10. DIN VDE V 0831-103:2020-09 Electric signalling systems for railways – Part 103: Identification of safety requirements for technical functions in railway signalling; 2020.
11. Braband J., Schäbe H. Risikoanalyse für das Automatisierte Fahren – Validierung und Erkenntnisse. *Signal und Draht* 2023;4(115):6-12.
12. Shubinsky I.B., Shaebe H., Rozenberg E.N. On the safety assessment of an automatic train operation system. *Dependability* 2021;4:31-37.
13. MODSAFE, WP2–D2.2 Consistency analysis and Final hazard Analysis. TU Dresden, DEL_D2.2_TUD_WP2_100430_V1.1, 2010-04-30.
14. MODSAFE, WP4–D4.2 Analysis of Safety requirements for MODSafe Continuous Safety Measures and Functions. DEL_4.2_UITP_WP4_11021_V2.0, 2011-01-21

15. MODSAFE, WP4.3–D4.3 Analysis of On Demand Functions. DE_D4.3_3_UITP_WP4_120220_V 1.3, 2021-02-15.

16. Vom Hövel R., Braband J., Schäbe H. The probability of failure on demand – the why and the how. In: Proc. Int. Conf. on Computer Safety, SafeComp 2009, LNCS 5775. Springer: Berlin-Heidelberg; 2009. Pp. 46-54.

17. Smaki B. Artificial Intelligence applications for railway signalling. KTH Stockholm; 2021.

Сведения об авторах

Розенберг Ефим Наумович – профессор, доктор технических наук, первый заместитель Генерального директора, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия

Шубинский Игорь Борисович – профессор, доктор технических наук, главный эксперт, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Шебе Хендрик – доктор естественных наук, главный специалист по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности, TÜV Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия, e-mail: schaebe@de.tuv.com

About the authors

Efim N. Rozenberg, Professor, Doctor of Engineering, First Deputy Director General, JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russia.

Igor B. Shubinsky, Professor, Doctor of Engineering, Chief Expert, JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russia. e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru.

Hendrik Schäbe, Doctor of natural sciences, Main specialist on RAMS, TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany, e-mail: schaebe@de.tuv.com.

Вклад авторов в статью

Шубинский И.Б. сравнил различные подходы к автоматическому управлению поездом, Розенберг Е.Н. проанализировал предположения и их следствия, Шебе Х. Выполнил анализ различных системных архитектур

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.