Системы и устройства автоматики и телемеханики

УДК 656.256.3 (088.8)

В. И. Шаманов, д-р техн. наук
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Российский университет транспорта (МИИТ)

СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ЦИФРОВЫМИ РАДИОКАНАЛАМИ

Статья посвящена вопросам совершенствования систем интервального регулирования движения поездов за счет использования цифровых радиоканалов. Рассмотрены стандарты цифровой радиосвязи, используемые в системах интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами. Проанализированы особенности построения таких систем на железных дорогах мира. Описаны разработанные в 1980-х гг. системы интервального регулирования с радиоканалами. В одной из этих систем для регулирования по координате последнего вагона идущего впереди поезда по радиоканалу передается информация о текущем значении этой координаты. В другой системе дополнительная передача по радиоканалу информации о текущей величине тормозного пути идущего впереди поезда обеспечивает возможность в автоматическом режиме уменьшать межпоездной интервал до нуля при безопасном формировании и расформировывании на ходу соединенных поездов. Приведены примеры технической реализации таких систем. Проанализированы особенности систем с цифровыми радиоканалами, с разными прицельными точками интервального регулирования, а также особенности требований к радиоканалам передачи сигналов и к устройствам контроля и управления в таких системах.

пропускная способность; автоматика и телемеханика; интервальное регулирование; соединенные поезда; цифровые радиоканалы

Введение

Наиболее часто используемые пути повышения пропускной способности железнодорожных линий – уменьшение межпоездного интервала и удлинение поездов. В первом случае наибольшее значение пропускной способности железнодорожной линии можно получить, если в системе интервального регулирования движения поездов (ИРДП) используется информация о координате поезда, его скорости и зависимости от нее длины пути экстренного торможения идущего впереди поезда [1].

Наиболее длинные поезда получаются при их соединении. Однако для формирования соединенных поездов на станциях нужны специальные длинные пути, что увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы. Формирование соединенных поездов на перегонах приводит к уменьшению их пропускной способности. Поэтому представляет интерес разработка систем ИРДП, позволяющих выполнять безостановочное формирование и расформировывание соединенных поездов.

По условиям безопасности движения расстояние между последним вагоном («хвостом») идущего впереди поезда и головным локомотивом («головой») следующего за ним поезда должно быть не менее разности пути служебного торможения идущего сзади поезда и пути экстренного торможения поезда, идущего впереди [1]. Обеспечить выполнение этого условия можно только при динамическом расчете скорости движения поезда на основе необходимого объема и качества непрерывно получаемой информации о координате и скорости движения поезда, идущего впереди.

Работы по повышению пропускной способности железнодорожных линий за счет совершенствования систем ИРДП активно велись в Алма-Атинском институте железнодорожного транспорта (АлИИТ) еще в 1980-х гг. [2]. Однако реализация таких систем стала возможной только при появлении цифровых систем радиосвязи с локомотивами.

1 Стандарты цифровой радиосвязи

Эффективность использования цифровой системы радиосвязи стандарта TETRA в системах ИРДП на магистральных железных дорогах России была обоснована в [3].

В настоящее время в системах ИРДП на железных дорогах мира используются стандарты цифровой радиосвязи TETRA, GSM, GSM-R, DMR [4, 5], а также разработанный в России стандарт DMR-RUS [6].

Аббревиатура TETRA до апреля 1997 г. означала Трансевропейское транкинговое радио (Trans-Eupopean Trunked Radio). Впоследствии, когда интерес к стандарту TETRA расширился за пределы Европы, смысл аббревиатуры TETRA изменился и стал расшифровываться как Наземное транкинговое радио (Terresstrial Trunked Radio).

GSM – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени (TDMA) и частоте (FDMA). Стандарт разработан в конце 1980-х под эгидой Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) группой Groupe Spécial Mobile, которая позже была переименована в Global System for Mobile Communications. На базе этого стандарта был разработан стандарт мобильной связи для железнодорожных перевозок

GSM-R (GSM-Railway), который обеспечивает защищенную голосовую связь и передачу данных между железнодорожными службами и поездами.

Стандарт DMR (ETSITS102 361) (Digital Mobile Radio) был опубликован в 2005 г. Он обеспечивает ровный переход от аналоговых систем радиосвязи к цифровым и в большей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам радиосвязи на железнодорожном транспорте по сравнению с системами стандартов GSM-R и TETRA. В системах DMR время установления соединения в 5 раз меньше, а максимальная скорость передачи информации в 3,75 раз больше по сравнению с стандартом GSM-R. Эти показатели у стандарта DMR лучше и по сравнению со стандартом TETRA. По количеству реализуемых основных сетевых функций и основных функций связи стандарты цифровой радиосвязи DMR и TETRA одинаковы, а в стандарте GSM-R этих функций меньше. Дальность действия систем DMR больше приблизительно в 2 раза по сравнению с системами стандарта TETRA, что в пересчете площадь покрытия дает выигрыш в 4 раза [4].

Компанией «Билайн Бизнес» на базе сетей стандарта GSM для РЖД разработана система ремонтно-оперативной радиосвязи (POPC GSM), которая используется в настоящее время при обеспечении безопасности движения поездов на базе радиоканала [5].

Система поездной радиосвязи стандарта DMR-RUS создана совместно специалистами центральной станции связи (ЦСС) ОАО «РЖД», Ижевского радиозавода и ОАО «НИИАС». Она имеет централизованную структуру с мощным коммутационным оборудованием, объединяя по IP-каналу соседние базовые станции и цифровые серверы с использованием распределенной структуры управления сетью [6].

2 Цифровые радиоканалы в системах интервального регулирования

На железных дорогах мира в настоящее время идет процесс расширения использования цифровых радиоканалов в системах ИРДП.

Система интервального регулирования на координату «хвоста» поезда по радиоканалам с учетом защитного участка при использовании подвижных блок-участков, разработанная фирмой Bombardier Transportation (Signal), успешно работает в Казахстане на участке длиной 500 км. В этой системе радиоблокировки используются реперные датчики (бализы) и центр радиоблокировки (RBC), подключенный к системе цифровой радиосвязи стандарта TETRA. Бортовой программно-аппаратный комплекс отвечает за контроль выполнения кривых скорости и торможения на основании параметров движения, получаемых из центра радиоблокировки. Отсутствие разрыва состава определяется специальной системой контроля [7].

Цифровая система передачи данных на основе радиоканала стандарта GMS-R используется в системах ИРДП без напольных светофоров на линии Эрфурт – Лейпциг длиной 123 км при скоростях движения поездов до 300 км/ч. Система разработана концерном Siemens совместно с фирмой Carrier Com Deutschland GmbH. Планируется внедрение этой системы на участке железной дороги длиной 500 км [8].

На железных дорогах Северной Америки внедряется система управления движением поездов Positive Train Control (PTC) с использованием радиоканалов. Система строится на более высоком уровне по сравнению с существующей инфраструктурой средств железнодорожной автоматики и телемеханики. Планируется внедрение системы на сети общей протяженностью 96 тыс. км [9].

В западной части Китая внедрена система ИРДП типа ITCS с цифровым радиоканалом стандарта GMS-R, разработанная фирмой General Electric, с точкой прицельного регулирования на виртуальный сигнал или на занятый виртуальной блок-участок. Координата локомотива определяется с помощью датчиков пути и системы спутниковой навигации [10].

В Швеции на региональных линиях с малой интенсивностью движения используется система ИРДП типа ERTMS/ETCS уровня 3 (European Railway Traffic Management System/European Train Control System), также с цифровым радиоканалом стандарта GMS-R. Регулирование ведется на «хвост» идущего впереди поезда или на занятый виртуальной блок-участок. Для определения координаты локомотива используются точечные напольные радиопередатчики (Eurobalise). Целостность состава определяется по давлению в тормозной магистрали [10].

В России на базе стандарта GSM-R разработана система, в которой скорость движения поезда регулируется не на координаты светофоров, установленных вдоль пути, а на координату «хвоста» идущего впереди поезда с учетом защитного участка [11].

В ОАО «НИИАС» создан комплекс технических средств передачи ответственной информации о поездной ситуации на перегонах и на станциях на бортовые приборы безопасности. В системе используются радиоканал передачи данных на базе радиостанций 1Р22 СВ-2 «МОСТ», которыми оборудована большая часть подвижного состава, и система РОРС GSM. Для одновременной работы с несколькими каналами связи разработан универсальный блок радиосвязи БРУС, который можно включать без каких-либо существенных доработок в состав новых приборов безопасности БЛОК и БЛОК-М [5].

В системе поездной радиосвязи стандарта DMR-RUS канал сигнализации на борту локомотива подключается к аппаратуре безопасности движения КЛУБ-У или БЛОК, и по этому каналу производится обмен информации между устройствами разных локомотивов [5].

Разработанная ОАО «НИИАС» система ИРДП с использованием с цифрового радиоканала стандарта GMS-R имеет ряд усовершенствований по сравне-

нию с системой ERTMS/ETCS уровня 2. Например, вместо напольных точечных датчиков (бализ) для контроля местоположения поезда применена технология «виртуальных бализ», которые представляют собой специальные опорные точки на цифровой модели участка, нанесенные на бортовую электронную карту. Подвижные единицы позиционируются по данным от колесных датчиков и систем спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS. При потере радиосвязи поезд ведется по сигналам АЛС вместо служебного торможения до полной остановки поезда с последующим движением с пониженной скоростью [11].

3 Интервальное регулирование на текущую координату «хвоста» поезда

В разработанной в начале 1980-х гг. отечественной системе интервальное регулирование ведется на текущую координату «хвоста» идущего впереди поезда, информация о которой передается по радиоканалу при отсутствии разрыва поезда [12]. Текущая допустимая величина интервала между «головой» поезда и «хвостом» идущего впереди поезда вычисляется бортовой аппаратурой с учетом скорости своего поезда и скорости изменения этого интервала.

Функциональная схема системы приведена на рис. 1. В системе непрерывно контролируются скорость поезда V и координаты «головы» и «хвоста»,

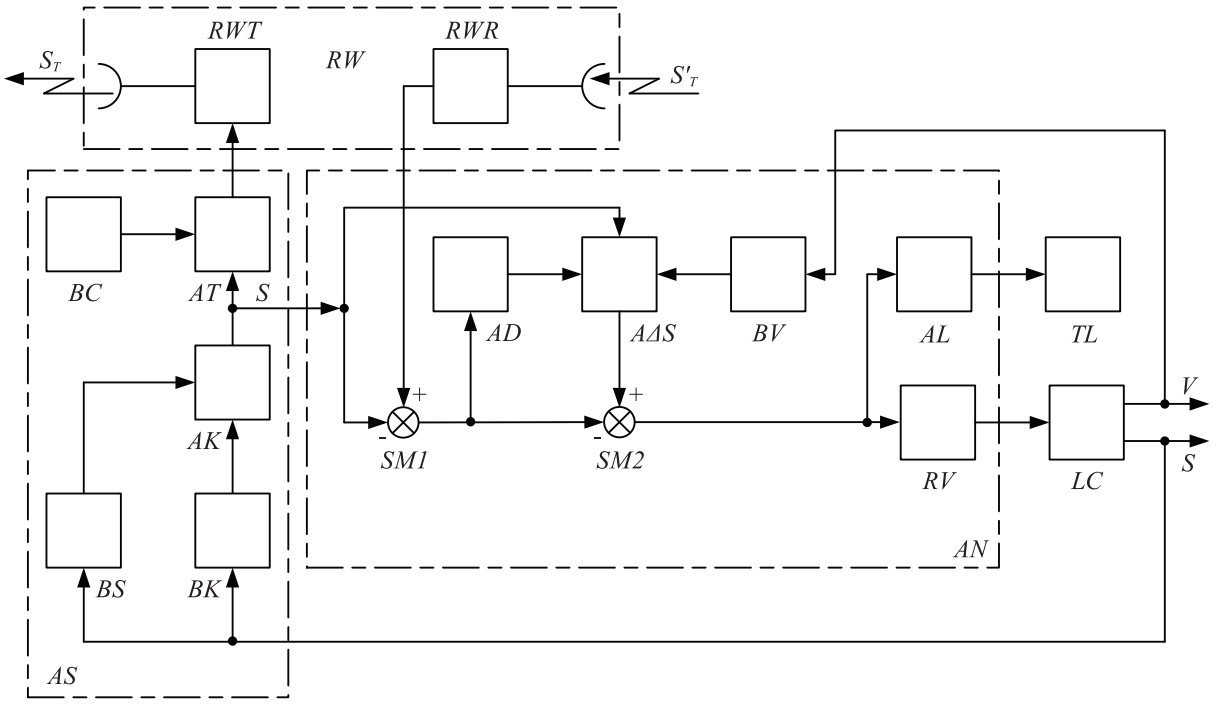

Рис. 1. Функциональная схема отечественной системы управления движением по радиоканалу

а также отсутствие разрыва поезда (целостность поезда). По цифровому радиоканалу принимаются сигналы с информацией о координате «хвоста» идущего впереди поезда $S_{т}^{'}$ и передаются сигналы с информацией о координате «хвоста» своего поезда $S_{т}$.

Скорость поезда контролируется датчиком *BV*. Координата «головы» поезда определяется с использованием двух датчиков – датчика пройденного пути *BS* и датчика местоположения пройденных «головой» поезда контрольных отметок *BK*. Двойной контроль необходим для обеспечения требуемой точности определения координаты «головы» поезда.

Погрешность непрерывного определения пройденного пути датчиком *BS*, установленным на локомотиве, нарастает по мере движения поезда. Дискретные уточнения текущей координаты головного локомотива обеспечиваются блоком *AK*, на второй вход которого подаются сигналы от датчика отметок пройденного пути *BK*. В качестве таких отметок с точными координатами могут быть точки подключения к рельсовой линии генераторов сигнальных токов рельсовых цепей или специальные генераторы сигналов, например бализы.

Отсутствие разрыва поезда контролируется датчиком *BC* по величине давления воздуха в тормозной магистрали или по радиосигналу от радиостанции, устанавливаемой на последнем вагоне поезда. Такая радиостанция получает электропитание от турбогенератора, ротор которого вращается воздухом из тормозной магистрали последнего вагона.

Координата «хвоста» идущего впереди поезда $S_{т}^{'}$ принимается радиоприемником *RWR* локомотивной радиостанции *RW*. Координата «хвоста» своего поезда $S_{т}$ посылается в «эфир» передатчиком *RWT* этой радиостанции.

Перед отправлением поезда в блоке *AT* вычисления координаты своего «хвостового» вагона, входящем в узел *AS* вычисления пройденного пути, задается длина поезда. В блоке $A\Delta S$ вычисления величины допустимого интервала между поездами, входящем в узел управления движением локомотива *AN*, задаются масса этого поезда, характеристики его тормозной системы и характеристики пути, по которому поезд будет двигаться.

Если по какой-либо причине после начала движения поезда сигнал на приемнике *RWR* радиостанции *RW* о координате «хвоста» идущего впереди поезда отсутствует (поездов впереди нет, отказ в системе формирования информации о координате «хвостового» вагона и т. п.), то узел управления движением локомотива *AN* с ориентацией на «хвост» идущего впереди поезда выключается. Машинист в таком случае ведет поезд по показаниям сигналов автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации.

С момента начала движения датчик пройденного пути *BS* подает информацию о текущей координате «головы» поезда в блок *AK*. При прослеживании локомотива над устройствами, передающими сигналы на датчик отметок пройденного пути *BK*, эта координата уточняется. При отсутствии

разрыва поезда, контролируемого датчиком *BC*, сигнал о координате «хвоста» поезда подается в передатчик *RWT*. Этот сигнал соответствующим образом кодируется, и передатчиком вырабатывается сигнал $S_т$ о текущей координате «хвоста» поезда. При разрыве поезда формирование и передача сигнала $S_т$ прекращаются.

Кодирование сигнала необходимо для того, чтобы он воспринимался только локомотивной радиостанцией поезда, идущего вслед за рассматриваемым. Кодирование должно обеспечить безопасность шифрования и расшифровки сигнала, а также минимизацию влияния помех на устойчивость приема сигналов.

При наличии идущего впереди поезда на приемник *RWR* поступает сигнал $S_т^{'}$ о текущей координате его «хвоста». После дешифрования этот сигнал подается на вход алгебраического сумматора *SM*1, на второй вход которого поступает сигнал с выхода блока *AK*, пропорциональный расстоянию, пройденному «головой» рассматриваемого поезда. Следовательно, сигнал на выходе сумматора *SM*1 пропорционален текущей величине межпоездного интервала ΔS – расстояния между «головой» своего поезда и «хвостом» поезда, идущего впереди.

Сигнал с выхода сумматора *SM*1 подается одновременно на вход второго сумматора *SM*2 и на вход дифференцирующего устройства *AD*. Сигнал на выходе дифференцирующего устройства *AD* несет информацию о скорости изменения межпоездного интервала ΔS – его увеличении, уменьшении или отсутствии изменения. Этот сигнал подается на один из входов блока $A\Delta S$ вычисления величины допустимого интервала между поездами, на второй вход которого подается сигнал с выхода блока *AK*, пропорциональный координате «головы» рассматриваемого поезда. На третий вход этого блока подается сигнал с выхода датчика *BV*, пропорциональный текущей скорости движения поезда.

В блоке $A\Delta S$ по известным соотношениям [13] на основе информации о весе и тормозных характеристиках поезда, особенностях плана и профиля на конкретном отрезке пути, скорости поезда, а также об изменениях межпоездного расстояния в текущий момент времени вычисляется величина допустимого интервала между поездами в этот момент времени. Сигнал с выхода блока $A\Delta S$ подается на второй вход алгебраического сумматора *SM*2.

Поскольку путь служебного торможения идущего позади поезда больше пути экстренного торможения идущего впереди поезда, межпоездной интервал должен рассчитываться с учетом защитного участка.

Сигнал на выходе этого сумматора пропорционален разности между допустимым и действительным значениями межпоездного интервала. Этот сигнал подается одновременно на входы регулятора скорости локомотива *RV* и блока *AL* переключения сигнальных показаний локомотивного светофора *TL*. Блок *AL* включает на локомотивном светофоре *TL* сигналы о необ-

ходимости увеличения или уменьшения скорости. Если локомотив снабжен автоматическим регулятором скорости *RV*, то при поступлении на его вход сигнала с выхода сумматора *SM*2 регулятор обеспечивает движение поезда с требуемой скоростью.

Система строится на более высоком уровне по сравнению существующей инфраструктурой средств железнодорожной автоматики и телемеханики. При ее отказе скорость движения поезда регулируется не на координату «хвоста» идущего впереди поезда с учетом длины защитного участка, а на координаты светофоров, установленных на пути.

Таким образом, разработанная система автоматически обеспечивает выдерживание требуемой величины интервала попутного следования при движении на «хвост» идущего впереди поезда.

4 Безостановочное формирование соединенных поездов

Использование дополнительной информации, передаваемой по радиоканалам, обеспечивает возможность уменьшения межпоездного интервала вплоть до нуля при выполнении требований к безопасности движения поездов. В результате формирование и расформировывание соединенных поездов могут выполняться на ходу без выделения для этих операций части перегона или специальных удлиненных путей на станциях.

Реализация такой системы ИРДП требует использования дополнительной текущей информации о длине тормозного пути при служебном или экстренном торможении идущего впереди поезда, а также о скорости сближения «головы» поезда с «хвостом» идущего впереди поезда и расстояниях между ними на последнем этапе сближения и при сцеплении на ходу. При расцеплении на ходу должна использоваться информация о скорости разъезда поездов и изменении межпоездного интервала.

Современные технические средства позволяют реализовать этот способ в системе интервального регулирования движения поездов, запатентованной в 1980-х гг. [14]. Функциональная схема такой системы показана на рис. 2.

В системе используются радиостанция *RW*, элементы для задания величины межпоездного интервала $A\Delta S_з$, допустимой скорости соударения при сцеплении поездов на ходу $A\Delta V_з$ и длины своего поезда $Al_{пз}$.

Датчиками в системе контролируются текущие значения следующих параметров: датчиком *BS* – пройденный поездом путь (координата «головы» поезда), датчиком *BV* – скорость движения поезда, датчиком $B\Delta V$ – скорость сближения с идущим впереди поездом, датчиком *BP* – давление в тормозной магистрали, датчиком $Bl_р$ – отсутствие разрыва поезда. Возможные способы контроля разрыва поезда рассмотрены в п. 3. Требуемая точность

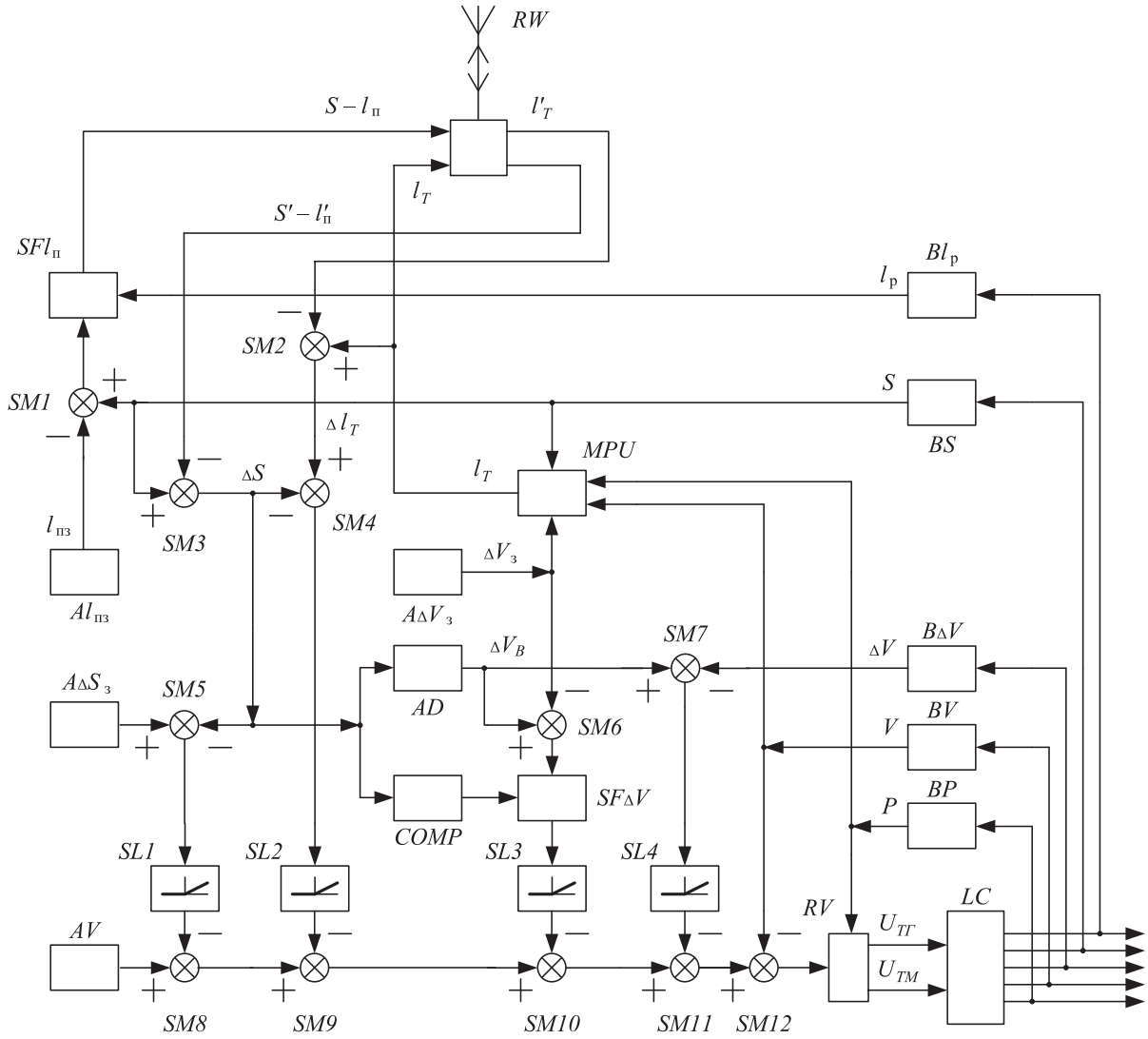

Рис. 2. Функциональная схема современной системы управления движением по радиоканалу

определения текущей координаты головного локомотива обеспечивается указанными выше способами.

Для работы датчика скорости сближения с идущим впереди поездом $B\Delta V$ может использоваться принцип ближней радиолокации [15]. В этом случае на последнем этапе сближения «голова» поезда и «хвост» идущего впереди поезда должны находиться на отрезке железной дороги, на котором отсутствуют кривые небольшого радиуса.

Система включает в себя также микропроцессорное устройство *MPU*, компаратор *COMP*, дифференцирующий блок *AD*, два автоматических выключателя – SFl_n и $SF\Delta V$, двенадцать элементов сравнения $SM1 - SV12$, выполняющих функцию вычитания, а также четыре элемента отсечки $SL1 - SL4$.

Устройством *AV* в автоматическом режиме или машинистом задается допустимая скорость движения поезда на конкретном отрезке пути. Регулятор

скорости RV вырабатывает управляющие воздействия на систему тяги $U_{тг}$ и систему торможения $U_{тм}$ локомотива LC.

Перед началом движения в системе задаются следующие параметры: длина своего поезда l_n – задающим устройством Al_n, требуемое значение межпоездного интервала ΔS – задающим устройством $A\Delta S_{пз}$, а также допустимая скорость соударения при сцеплении поездов на ходу $\Delta V_з$ – задающим устройством $A\Delta V_з$.

В компараторе $COMP$ задается величина межпоездного интервала, при котором должна обеспечиваться наибольшая точность его регулирования на последнем этапе сближения поездов. В качестве допустимой скорости соударения при сцеплении поездов на ходу может быть принята, например, скорость 5 км/ч, допустимая для соударения бегунов на подгорочных путях сортировочных станций [15].

В микропроцессорное устройство MPU вводится информация о плане и профиле пути, а также задаются численные значения массы состава и локомотива, состава поезда в вагонах, основного сопротивления движению поезда при холостом ходе локомотива, коэффициента трения между колесом и колодкой, силы нажатия колодок на ось. Эти данные необходимы для вычислений текущего значения тормозного пути собственного поезда по известным зависимостям [13].

Сигналами для микропроцессорного устройства MPU на переход к вычислению длины своего тормозного пути при экстренном торможении являются резкие изменения давления в тормозной магистрали P и скорости движения поезда V. Информация об этом подается от датчиков соответственно BP и BV.

При движении поезда из сигнала на выходе датчика BS, пропорционального пройденному рассматриваемым поездом расстоянию S, элементом сравнения $SM1$ вычитается сигнал задающего устройства $Al_{пз}$, пропорциональный длине этого поезда l_n. Следовательно, сигнал на выходе элемента сравнения $SM1$ пропорционален расстоянию, пройденному «хвостом» рассматриваемого поезда $S - l_n$. Так определяется координата «хвоста» поезда.

При отсутствии разрыва поезда данный сигнал передается на один из входов радиопередатчика радиостанции RW. Этот сигнал в закодированном виде передается по радиоканалам для приема радиостанцией поезда, идущего следом, или радиостанцией центрального пункта управления. Если «хвост» рассматриваемого поезда отрывается, то с выхода датчика разрыва поезда Bl_p поступает сигнал на управляющий вход автоматического выключателя $SFL_п$ и передача сигнала в радиостанцию RW о координате «хвоста» поезда прекращается.

Для последующего поезда исчезновение сигнала о координате «хвоста» идущего впереди поезда является сигналом о прекращении работы радиоканала и необходимости перехода на другие способы ИРДП.

Информация о координате «хвоста» идущего впереди поезда $S' - l'_{\text{п}}$ и текущем значении его тормозного пути $l'_{\text{т}}$ поступает в приемник радиостанции *RW* рассматриваемого поезда. После дешифрации сигнал, пропорциональный разности расстояний $S' - l''_{\text{п}}$, подается на один из входов элемента сравнения *SM*3, на второй вход которого подается сигнал с выхода датчика *BS*, пропорциональный расстоянию *S*, пройденному «головой» рассматриваемого поезда. Сигнал на выходе элемента сравнения *SM*3 пропорционален разности расстояний $(S' - l'_{\text{п}}) - S$, равной текущей величине межпоездного интервала ΔS. Подается этот сигнал на входы элементов сравнения *SM*4 и *SM*5, а также на входы дифференцирующего блока *AD* и компаратора *COMP*.

Сигнал на выходе микропроцессорного устройства *MPU*, пропорциональный текущей величине тормозного пути своего поезда l_m, подается на второй вход поездной радиостанции *RW* и на вход элемента сравнения *SM*2. На второй вход этого элемента сравнения подается сигнал с информацией о текущем значении тормозного пути идущего впереди поезда $l'_{\text{т}}$, получаемой после дешифрования принятого приемником радиостанции *RW* сигнала. На выходе элемента сравнения *SM*2 сигнал, пропорциональный разности $\Delta l_{\text{т}} = l'_{\text{т}} - l_{\text{т}}$, подается на второй вход элемента сравнения *SM*4.

Сигнал с выхода элемента сравнения *SM*4, пропорциональный разности $\Delta l_{\text{т}} - \Delta S$, подается на вход элемента отсечки *SL*2. С выхода элемента отсечки *SL*2 этот сигнал подается на один из входов элемента сравнения *SM*9 только при выполнении условия $\Delta S < \Delta l_{\text{т}}$, вызывая уменьшение заданной текущей скорости для регулятора скорости *RV*.

Элементом *SM*5 выполняется операция сравнения заданного значения межпоездного интервала $\Delta S_{\text{з}}$ с его текущим значением ΔS. Если текущее значение межпоездного интервала ΔS становится больше его заданного значения, то на выходе элемента отсечки *SL*1 появляется сигнал, передаваемый на один из входов элемента сравнения *SM*8. По этому сигналу текущая скорость движения поезда уменьшается.

Сигнал на выходе дифференцирующего устройства *AD* пропорционален вычисленной текущей скорости сближения $\Delta V_{\text{в}}$ «головы» поезда с «хвостом» поезда, идущего впереди. Элементом *SM*6 этот сигнал сравнивается с сигналом, пропорциональным заданной скорости сближения $\Delta V_{\text{з}}$. Если расстояние сближения ΔS достигло величины, когда можно использовать аппаратный контроль скорости сближения ΔV методами ближней локации, то по команде компаратора COMP выключатель $SF\Delta V$ соединяет выход элемента сравнения *SM*6 с входом элемента отсечки *SL*3. Сигнал на выходе элемента отсечки *SL*3, подаваемый на один из входов элемента сравнения *SM*10, обеспечивает регулирование скорости движения поезда так, чтобы скорость сближения поездов не превышала заданную, т. е. чтобы выполнялось условие $\Delta V \le \Delta V_{\text{з}}$.

Поскольку скорость сближения поездов является одним из основных показателей безопасности их движения, вычисленное ее значение $\Delta V_{\text{в}}$ сравнива-

ется с фактическим значением ΔV, измеряемым датчиком текущей скорости сближения $B\Delta V$. Если фактическая скорость сближения больше вычисленной, то сигнал с выхода элемента сравнения *SM*7, пропорциональный разности этих величин $\Delta V_{в} - \Delta V$, через элемент отсечки *SL*4 поступает на вход элемента сравнения *SM*11, вызывая корректировку текущей скорости движения поезда *V* в сторону уменьшения.

Управляющее воздействие $U_{тм}$ на систему торможения локомотива *LC* вырабатывается регулятором *RV* с учетом величины текущего значения давления в тормозной магистрали, контролируемого датчиком *BR*.

Таким образом, данная система ИРДП обеспечивает возможность безопасного уменьшения межпоездного интервала в автоматическом режиме вплоть до нуля.

5 Особенности систем интервального регулирования с цифровыми радиоканалами

Системы ИРДП с цифровыми радиоканалами можно условно разделить на централизованные, децентрализованные и смешанные.

К централизованным относится, например, система ERTMS/ETCS уровня 2, в которой предусматривается управление движением поездов на участке длиной в среднем 80 км с использованием центра радиоблокировки. В этом центре значимая информация обрабатывается специализированным безопасным компьютером, а затем передается по цифровым радиоканалам стандарта GMS-R.

В центре радиоблокировки рассчитывается, в зоне своей ответственности, индивидуальная скорость движения для каждой подвижной единицы с учетом общей поездной ситуации, постоянных и временных ограничений скорости и профиля пути [11].

К децентрализованным можно отнести предлагаемую систему ИРДП, обеспечивающую автоматизацию операций по безостановочному формированию и расформировыванию соединенных поездов, функциональная схема которой приведена на рис. 2. В этой системе, после получения по радиоканалам команды на выполнение операций по соединению или разъединению поездов, вся требуемая контрольная и управляющая информация обрабатывается в бортовом безопасном микропроцессорном блоке управления.

В смешанных системах обработка требуемой информации разделяется между специализированным безопасным компьютером, установленным в стационарном центре, и бортовыми устройствами контроля и управления. Это, например, система ITCS фирмы General Electric, в которой локомотивы оборудуются бортовым контроллером, отвечающим за определение местоположения поезда с точностью до одного метра, контроль целостности состава,

обработку информации о состоянии напольных устройств и соблюдение скоростных ограничений. Безопасный логический контроллер, входящий в состав станционного оборудования системы ITCS, выполняет функции электрической микропроцессорной централизации. Модуль обмена данными с локомотивным оборудованием передает информацию о сигналах, состоянии стрелок и переездов всем локомотивам в зоне управления, а модуль проверки координат спутниковой навигации пересчитывает географические координаты поездов в пикетные на пути.

В децентрализованных системах важной задачей бортового оборудования является динамический расчет кривых торможения в зависимости от местоположения поезда, выполняемый в соответствии с требованиями документов [13] или [16]. Для этого в бортовую электронную карту вносится цифровая модель участка с координатами на ней опорных точек, в качестве которых могут быть реальные или «виртуальные» бализы, а также генераторы рельсовых цепей или счетчиков осей [11].

Точность динамического расчета допустимой скорости движения поезда в конкретной точке пути зависит от точности определения координаты его головного локомотива. Интенсивность опасных отказов, приводящих к неправильному определению координаты головы поезда, должна быть меньше 10^{-9} ч$^{-1}$ [11].

Увеличение количества функций бортовых и стационарных аппаратно-программных комплексов ужесточает требования к их надежности. Если взять за базу сравнения сигнальную точку микропроцессорной системы автоблокировки АБ-ЧКЕ, то вероятность возникновения опасного отказа за 20 лет эксплуатации рассматриваемой бортовой аппаратуры должна быть не больше $8 \cdot 10^{-9}$ [17].

Использование цифровых радиоканалов в системах ИРДП повышает требования к их надежности, безопасности и помехозащищенности.

Надежность передачи данных по радиоканалам должна соответствовать требованиям стандарта EN 50159:2010 [18]. Максимальная задержка при передаче данных между радиоблок-центром и бортовым оборудованием или между бортовым оборудованием разных локомотивов в режиме коммутации каналов должна быть менее 500 мс в 99 % случаев, а интенсивность отказов с потерей соединения – менее 10^{-2} ч$^{-1}$ [19].

При передаче ответственной информации по радиоканалам должны выполняться требования и по минимизации опасных ошибок [20]. На основе статистической информации установлено, что ошибка передачи ответственной информации о поездной ситуации на перегонах и станциях по цифровым радиоканалам каналам в отечественной системе поездной связи была не хуже 2×10^{-2} на бит [5].

Требования по помехоустойчивости цифрового радиоканала при использовании его как основного средства для передачи ответственной информа-

ции [21] могут обеспечиваться, например, за счет использования кода Рида – Соломона [5, 22].

Использование цифровых радиоканалов в системах ИРДП позволяет уменьшать межпоездной интервал и обеспечивает возможность автоматизации многих операций по ведению поездов, что уменьшает влияние локомотивных бригад на безопасность движения поездов. В связи с этим можно говорить о том, что разработка систем типа «автомашинист» становится вполне реальной [23]. Однако в таких системах увеличивается влияние «человеческого фактора» на этапах разработки, изготовления и технической эксплуатации их аппаратных и программных средств.

Заключение

Рассмотрены функциональные схемы разработанных в 1980-х гг. систем автоматического регулирования интервала попутного следования поездов с передачей данных по цифровому радиоканалу. Некоторые из рассмотренных систем обеспечивают повышение пропускной способности железнодорожной линии за счет интервального регулирования с ориентацией на «хвост» идущего впереди поезда с помощью передачи по поездной радиосвязи данных о текущем значении координаты последнего вагона идущего впереди поезда.

Другие системы автоматического регулирования с дополнительной передачей по цифровому радиоканалу информации о текущем значении тормозного пути идущего впереди поезда обеспечивают безопасное уменьшение межпоездного интервала вплоть до нуля, создавая возможность безостановочного формирования и расформировывания соединенных поездов. Все контрольные и управляющие функции в этих системах выполняются специальными бортовыми безопасными программно-аппаратными комплексами.

Рассмотрены стандарты цифровой радиосвязи, используемые в системах интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами. Проанализированы особенности систем с цифровыми радиоканалами на железных дорогах мира с разными точками прицельного интервального регулирования, а также требования по безопасности, отказоустойчивости и помехоустойчивости к аппаратуре управления и контроля в системах интервального регулирования движения поездов рассматриваемого типа.

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов : учеб. пособие / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Милёшин, Л. М. Чинь ; под ред. Л. А. Баранова. – М. : МИИТ, 2011. – 163 с.

2. Шаманов В. И. Совершенствование автоматических средств управления интервалами попутного следования между поездами / В. И. Шаманов // Робототехнические средства на железнодорожном транспорте : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 218. – Ташкент : ТашИИТ, 1989. – С. 27–31.
3. Розенберг Е. Н. Технико-экономическая эффективность многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (уровень систем ЖАТ) / Е. Н. Розенберг, В. И. Талалаев, В. И. Шаманов. – М. : ВНИИАС, 2004. – 121 с.
4. Тимошенко А. В. Сравнительный анализ цифровых систем радиосвязи для использования в качестве резервного канала управления движением поездов. Ч. 1 / А. В. Тимошенко // Проблемы безопасности на транспорте. – Гомель, 2017. – С. 202–204.
5. Шухина Е. Е. Системы обеспечения безопасности движения поездов на базе радиоканала / Е. Е. Шухина, А. В. Низовский // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 25–26.
6. Васильев О. К. Внедрение систем поездной радиосвязи стандарта DMR–RUS / О. К. Васильев, А. М. Вериго, Д. К. Завалищин // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 8. – С. 17–20.
7. Романчиков А. М. Технологические новации / А. М. Романчиков // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 5. – С. 9–11.
8. Erste signalfreie Fernverkehsstrecke // Signal und Draht. – 2016. – № 1. – С. 68.
9. Внедрение системы РТС // Железные дороги мира. – 2016. – № 3. – С. 10.
10. Рубаник П. П. Сравнительный анализ современных систем управления движением поездов с применением цифрового радиоканала и спутниковых технологий. Ч. 1 / П. П. Рубаник // Проблемы безопасности на транспорте. – Гомель, 2017. – С. 198–199.
11. Попов П. А. Интервальное регулирование на основе цифрового радиоканала / П. А. Попов, А. В. Озеров // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 19–22.
12. А. с. 1004183 СССР, МПК B 61 L 23/22. Устройство для интервального регулирования движения поездов / И. П. Кривцов, В. И. Шаманов, Г. И. Глащенков. – № 3333079/27-11 ; заявл. 27.08.81 ; опубл. 15.03.83, Бюл. № 10. – 6 с. : ил.
13. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. ОАО «РЖД» 12.05.2016 № 867 р. – М., 2016. – 287 с.
14. А. с. 1687492 СССР, МПК B 61 L 23/22. Устройство для интервального регулирования движения поездов / В. И. Шаманов, И. П. Кривцов, М. К. Бимуканов. – № 4444296/11 ; заявл. 20.06.88 ; опубл. 30.10.91, Бюл. № 40. – 11 с. : 3 ил.
15. Шелухин В. И. Датчики измерения и контроля устройств железнодорожного транспорта / В. И. Шелухин. – М. : Транспорт, 1990. – 119 с.
16. UIC 544-1. Brakes – Braking Performance. – 6th ed. – International Union of Railways (UIC), 2014. – 147 p.
17. Сапожников Вал. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2017. – 318 с.

18. BS EN 50159:2010. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety-related communication in transmission systems. – URL : https://webshop.ds.dk/Files/Files/Products/M236545_attachPV.pdf.
19. GSM-R Interface. Class 1 Requirements. Subset-093: Version 2.3.0 (10/10/2005) ERTMS. – URL : http://www: era.europa.eu/Document-Register/Document/B37-Subset-093-v230.pdf.
20. Сапожников Вал. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 195–211.
21. 2006/679/ЕС. Техническая спецификация для интероперабельности, касающаяся управления и сигнализации подсистемы трансевропейской системы обычных железнодорожных линий: решение комиссии ЕЭА от 28.03.2066 // Official Journal of the European Union. 2006.10.16. L 284/1. – Режим доступа : http://eur-lex.europa/eu/legal-content/EN/TXT/?qid=&uri=CELEX:32006D0679.
22. Золотарев В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 128 с.
23. Попов П. А. На пути к беспилотному движению / П. А. Попов // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 10. – С. 16–17.

Victor I. Shamanov
«Automation, remote control and communication» department
Russian University of Transport

Systems interval regulation of traffic trains with digital radio channels

The article is devoted to the issues of improving the systems of interval regulation of train traffic by using digital radio channels. The analysis of systems of interval regulation of trains that use digital radio channels carried out. Characterized the standards of digital radiocommunication used on the Railways of the world to control and navigation the movement of trains. It is shown, how does the use of digital radio channels in these systems influence on increase throughput of Railways. Considered the construction of a system of interval regulation of trains, which ensured safe incessantly to form united trains.

trains; throughput; automatics and remote control; interval control; navigation; connected trains; digital radio channels

References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Milyoshin I. S., Chin L. M. (2011). Optimization of movement of trains [Optimizatsiya dvizheniya poezdov]. Moscow, MIIT. – 163 p.

2. Shamanov V. I. (1989). Improvement of automatic controls associated repetition intervals between trains [Sovershenstvovanie avtomaticheskikh sredstv upravleniya intervalami poputnogo sledovaniya mezhdu poezdami]. Robotics on railway transport, Tashkent railway transport engineering institute collection of scientific works, issue 218. – Pp. 27–31.
3. Rozenberg E. N., Talalaev V. I., Shamanov V. I. (2004). Technical and economic efficiency of multilevel management system and ensure the safe movement of trains (standard of railway automatics and telemechanics systems) [Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' mnogourovnevoy sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov (uroven' sistem ZHAT)]. Moscow, VNIIAS. – 121 p.
4. Timoshenko A. V. (2017). Comparative analysis of digital Radiocommunication systems for use as backup channel train traffic control. Part 1 [Sravnitel'nyy analiz tsifrovykh system radiosvyazi dlea ispol'zovaniya v kachestve rezervnogo kanala upravleniya dvizheniem poezdov]. Problems of transport security. Gomel. – Pp. 198–199.
5. Shuhina E. E., Nizovsky A. V. (2016). Systems to ensure the safe movement of trains on the basis of the radio channel [Sistemy obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na baze radiokanala]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 25–26.
6. Vasil'ev O. K., Verigo A. M., Zavalishin D. K. (2011). Implementation of systems in ezdnoe radio standard DMR-RUS [Vnedrenie system poezdnoy radiosvyazi standarta DMR-RUS]. Automation, communication, Informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 8. – Pp. 17–20.
7. Romanchikov A. M. (2016). Technological innovations [Tekhnologicheskie innovatsii]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 5. – Pp. 9–11.
8. Erste signalfreie Fernverkehsstrecke (2016). Signal und Draht, issue 1. – 68 p.
9. The introduction of system PTC (2016). [Vnedrenie sistemy PTC]. World Railways, issue 3. – 10 p.
10. Rubanik P. P. (2017). Comparative analysis of modern systems of train management using digital radio and satellite technologies. Part 1 [Sravnitel'nyy analiz sovremennykh system upravleniya dvizheniem poezdov s primeneniem tsifrovogo radiokanala i sputnikovykh tekhnologiy]. Problems of transport security. Gomel. – Pp. 202–204.
11. Popov P. A., Ozerov A. V. (2016). Interval regulation based on the digital radio channel [Interval'noe pegulirovanie na osnove tsifrovogo padiokanala]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 19–22.
12. Krivtsov I. P., Shamanov V. I., Glashchenkov G. A. (1983). System for interval regulation of movement of trains [Ustroistvo dlya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. Author's certificate for invention № 1004183 (USSR). Bulletin of inventions [Byulleten' izobreteniy], issue 10. – Pp. 84– 85.
13. Rules of traction calculations for train operation (2016) [Pravila tyagovykh raschyetov dlya poezdnoy raboty]. Approved by JSC «RZD» 12.05.2016, N 867p. Moscow, VNIIZHT. – 287 p.
14. Shamanov V. I., Krivtsov P. I., Bimukanov M. K. (1991). System for interval regulation of movement of trains [Ustroistvo dlya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya

poezdov]. Author's certificate for invention № 1687492 (USSR). Bulletin of inventions [Byulleten' izobreteniy], issue 40. – Pp. 97– 98.
15. Shelukhin V.I. (1990). Measurement Sensors and control devices of railway transport [Datchiki izmereniya i kontrolya ustroystv zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Transport. – 119 p.
16. UIC 544-1. Brakes – Braking Performance. – 6th ed. – International Union of Railways (UIC), 2014. – 147 p.
17. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V., Shamanov V.I. (2017). Reliability of railroad automation, telemechanics and communications systems [Nadyozhnost' system zheleznodorozhnoy avtomaniki, telemekhaniki i svyazi]. Moscow, UMC by education on the railroad transport. – 318 p.
18. BS EN 5015:2010. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety-related communication in transmission systems. Enter. 31.10.2010. URL: https://webshop.ds.dk/Files/Files/Products/M236545_attachPV.pdf.
19. GSM-R Interface. Class 1 Requirements. Subset-093: Version 2.3.0 (10/10/2005). ERTMS. URL: http://www:era.europa.eu/Document-Register/Document/B37-Subset-093-v230.pdf.
20. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. (2015). Detection of dangerous errors at the output terminals of combinational logic circuits [Obnaruzhenie opasnykh oshibok na rabochikh vykhodakh kombinatsionnykh logicheskikh skhem]. Automation on Transport [Avtomatika na Transporte], issue 1, N 2. – Pp. 195–211.
21. 2006/679/EC. Technical specification for interoperability concerning the management and signaling of the subsystem of the trans-European system of ordinary railway lines: decision of the Commission of the EEA of 28.03.2066. Official Journal of the European Union. 2006.10.16. L 284/1. URL: http://eur-lex.europa/eu/legal-content/EN/TXT/?Qid=&uri=CELEX:32006D0679.
22. Zolotaryov V.V., Ovechkin G.V. (2004). Interference stable coding. Methods and algorithms [Pomekhoustoychivoe kodirovanie. Metody i algoritmy]. Moscow, Hot line – Telecom. – 128 p.
23. Popov P.A. (2017). On the way to unmanned traffic [Na puti k bespilotnomu dvizheniyu]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 16–17.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Б. Никитиным
Поступила в редакцию 13.01.2018, принята к публикации 16.02.2018

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ).
e-mail: shamanov_vi@mail.ru

© Шаманов В.И., 2018