

Радиоцентрализация с распределенными вычислительными ресурсами и развитыми функциями самодиагностирования



Д. В. Ефанов,
д-р техн. наук, доцент,
заместитель ген. директора по научно-исследовательской работе ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта



Г. В. Осадчий,
зам. генерального директора — главный инженер ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

В статье описаны способы реализации системы управления с централизованным и с децентрализованным размещением оборудования, рассмотрены новые виды централизации управления движением на железных дорогах: радиоцентрализация и виртуальная централизация стрелок и сигналов. Отдельное внимание уделено вопросам реализации функций самодиагностирования и мониторинга объектов напольной автоматизации.

В целях автоматизации управления движением поездов, повышения быстродействия при реализации перевозок, а также обеспечения требуемого уровня безопасности перевозочного процесса линии железных дорог оборудуются техническими средствами сигнализации, централизации и блокировки, а тяговые подвижные единицы снабжаются специализированными бортовыми средствами управления [1, 2]. Существует большое разнообразие систем управления движением поездов как на перегонах, так и на станциях — от систем малого радиуса действия до систем с широким охватом полигона управления [3, 4].

Перегоны при малой интенсивности движения поездов оборудуются полуавтоматической системой блокировки, где концепция безопасности движения основана на наличии «одного поезда на перегоне» в любой момент времени. При высокой интенсивности движения перегоны оборудуются системами автоматической блокировки с разбиением перегона на блок-участки, въезд на которые ограждается светофорами. Автоматическая блокировка может быть реализована с различной значностью, наиболее распространены трехзначная и четырехзначная блокировки [3].

На станциях для автоматизации управления движением устанавливаются устройства и системы централизации стрелок и сигналов. В настоящее время

повсеместно распространены системы электрической централизации, при которых все объекты, расположенные у железнодорожных путей (стрелочные электроприводы, светофоры, объекты переездной автоматизации и пр.), а также частично совмещенные с ними (рельсовые цепи), посредством кабельной сети соединяются с оборудованием управления постов централизации [5]. Широко применяются именно централизованные системы управления, в которых все технические средства управления размещаются на одном посту. Известны и децентрализованные реализации, при которых объекты управления располагаются в непосредственной близости к напольным объектам сигнализации, централизации и блокировки [6].

Эксплуатация технических средств автоматизации на железных дорогах подразумевает проведение процедур по их техническому обслуживанию. С этой целью все объекты автоматизации железных дорог разбиваются на участки обслуживания и закрепляются за конкретными дистанциями сигнализации, централизации и блокировки, участками и цехами внутри них [7]. Для автоматизации обслуживания предусматриваются системы диспетчерского контроля, диагностирования и мониторинга [8].

Принципы регулирования движения поездов известны более века [9], а основные системы управления были разработаны во второй половине XX века и реализованы на релейной основе, они

не снабжены развитыми встроенными средствами самодиагностирования и мониторинга [10]. На крупных станциях для реализации систем управления требуются десятки тысяч габаритных реле (от 0,5–1 дм³). Для уменьшения количества оборудования в системах управления используется минимально необходимый для безопасного управления набор элементов. Микропроцессорные централизации, внедряемые с 1978 года, имеют уровень самодиагностирования, однако охватывают объекты самой системы, а не напольного технологического оборудования. Следует подчеркнуть, что свыше $\frac{3}{4}$ всех отказов в области железнодорожной автоматики приходится именно на напольное оборудование (рельсовые цепи, стрелочные электроприводы, устройства переездной автоматизации, светофоры и т. д.) [11]. Можно сказать так: «мозг» системы управления достаточно развит с точки зрения надежности и безопасности (не с точки зрения функционала!), а вот «рецепторы» в виде напольного оборудования все еще чувствительны к отказам и являются наиболее уязвимыми элементами систем управления движением поездов.

С конца XX века во всем мире начали внедряться внешние средства технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики. Они позволили автоматизировать часть измерительных работ и дать техническому персоналу оперативную информацию о состоянии объектов управления. Однако подобные системы несовершенны, охватывают не все объекты железнодорожной автоматики, а только часть их, измерения проводят косвенно по постовым объектам [8, 12–14]. Назрела необходимость в реализации новых систем управления движением поездов, имеющих развитое диагностическое обеспечение на каждом уровне их реализации и использующих эту информацию не как дополнительную или вспомогательную, а как информацию, непосредственно влияющую на процесс управления движением [15].

В настоящей работе читателю предлагается ознакомиться с архитектурой системы управления движением поездов с развитым диагностическим обеспечением на каждом уровне реализации, а также с особыми вариантами ее практического воплощения.

Архитектура системы управления

Система управления движением, так же как и в известных технических решениях, реализуется для отдельных



Пульт-табло релейной системы управления движением поездов (1964 г. внедрения, ст. Горы Октябрьской ж.д.).

станций и прилегающих к ним перегонов. Возможен, однако, и вариант с реализацией централизованных зон управления движением в местах скопления железнодорожных стрелок. Система вписывается на микросреду и микропроцессорной основе (возможен вариант с использованием программируемых логических интегральных схем, программируемых логических контроллеров промышленной автоматизации и т. д. [16]).

Ключевыми отличиями от известных систем управления движением поездов [3, 5, 6, 10] являются: наличие развитых средств технического диагностирования и мониторинга периферийных объектов автоматизации, использование диагностических цепей с интегрированными средствами мониторинга на каждом уровне иерархии. Структура системы управления приведена на рис. 1. Опишем систему, анализируя ее «снизу вверх» — от периферийных объектов к центру управления движением.

Для станции и прилегающих перегонов определяется множество объектных контроллеров управления периферийными объектами и их мониторинга, куда входят:

- контроллер управления светофором (КСВ);
- контроллер управления стрелочным электроприводом (КСТ);
- оборудование датчиков контроля положения подвижных единиц (ОДКП).

Указаны лишь основные контроллеры. При наличии иных управляемых объектов (например переездной автоматизации или пешеходных дорожек) также требуются контроллеры управления.

Эти устройства могут располагаться централизованно — на едином посту, установленном в одной из зон станции на куда более значительном удалении от самих объектов управления (например, при реализации одного поста управления для двух и более станций), а также в непосредственной близости к объектам управления в специализированных путевых коробках или ящиках.

В случае централизованного расположения объектных контроллеров их питание так же централизовано, как и централизованы зависимости между объектами управления. Питание может осуществляться от электросетей традиционным способом либо подаваться от накопителей энергии, получающих энергию от возобновляемых источников (в том числе от солнечных или ветровых электростанций, расположенных вблизи) [17]. При этом объекты железнодорожной автоматики целесообразно классифицировать на группы потребителей энергии, усовершенствовать и выработать оптимальные способы их реализации, пересмотрев состав традиционно используемых технических средств управления с упором на их энергопотребление [18].

При децентрализованном размещении объектных контроллеров возможны различные случаи реализации питания и зависимостей (рис. 2). С точки зрения энергоснабжения это может быть традиционная кабельная сеть, отдельные точки подключения к сети на объекте управления, использование альтернативных источников. Возможно смешанное питание. С точки зрения реализации зависимостей это может быть традиционная

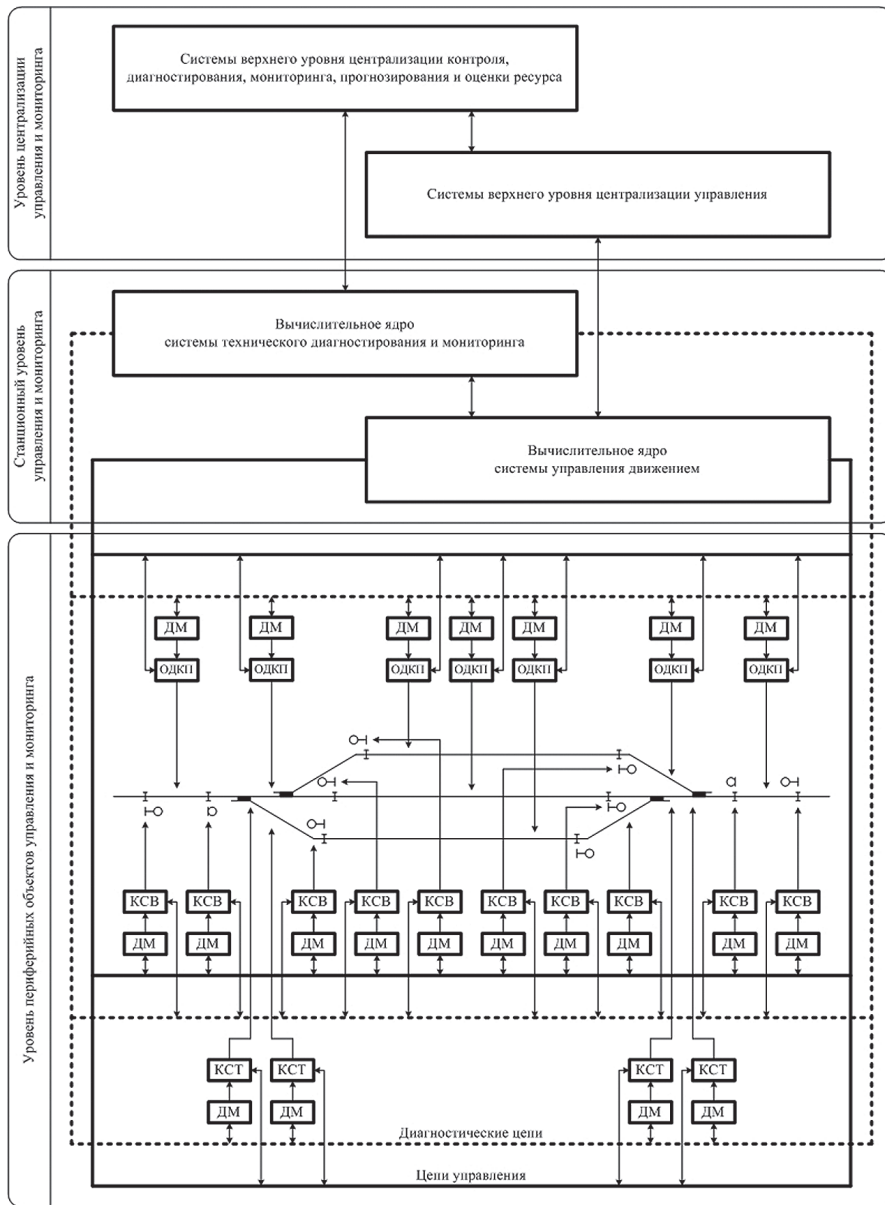


Рис. 1. Архитектура системы управления

реализация с помощью кабельной сети (например, медно-жильный или оптоволоконный кабель), передача управляющей и диагностической информации по киберзащищенному радиоканалу, промежуточный вариант с передачей управляющей информации по кабелю, а диагностической — по радиоканалу. Таким образом, зависимости опять же могут проверяться и выполняться централизованно в вычислительном ядре, расположенном на посту централизации, данные об объектах могут передаваться различными способами, а могут проверяться на самих взаимосвязанных объектах в зоне централизации. Отсюда вытекает, что к уже известным способам реализации систем управления движением поездов (электрической централизации и ее «предшественницам») можно добавить еще два — **радиоцентрализацию**

и **виртуальную централизацию** групп объектов.

Последние два способа реализации системы управления движением поездов в будущем при развитии технологий обеспечения надежности и безопасности управления позволяют отказаться от «местного» управления из постов централизации и перейти к управлению движением прямо из кабины машиниста при реализации виртуальных зависимостей в процессе движения. Этот вопрос требует детальной проработки.

Уровень диагностики и мониторинга в системе управления

Вернемся к периферийным средствам автоматизации — объектным контроллерам напольной автоматизации. Они снабжаются легкоъемными диагностиче-

скими модулями (ДМ), каждый из которых позволяет получать полное множество диагностических параметров. Диагностические данные получают непосредственно от каждого конкретного объекта управления, а не от группы объектов, как это сделано в современных настраиваемых системах мониторинга [8]. Возможно дооснащение объектов выносными датчиками физических величин, подключаемыми безопасно к входам диагностических модулей (при децентрализованном размещении объектных контроллеров).

Для максимально эффективного процесса мониторинга напольных объектов автоматизации требуется получить следующие параметры.

Для объектного контроллера стрелки необходимо измерение межфазных напряжений, фазных токов, сопротивления изоляции кабеля относительно земли (при использовании кабельного хозяйства).

Для контроллера светофора — напряжения питания ламп огней светофоров (питания светодиодных ламп) и токи в цепях питания, сопротивление изоляции кабеля относительно земли (при использовании кабельного хозяйства). Если контроллер устанавливается в светофорном ящике или в головке светофора, то для мониторинга геометрического положения мачты (при ее наличии) диагностический прибор снабжается датчиком контроля угла отклонения — инклинометром [19].

Состав данных от оборудования датчиков контроля положения подвижных единиц определяется типом этих датчиков. Например, при использовании современных рельсовых цепей тональной частоты управление и контроль осуществляются с использованием генератора, фильтра, приемника и реле [8]. Функция рельсовой цепи — именно контроль положения подвижного состава, а не управление, однако управление в данном случае осуществляется с генератора путем подачи тока определенной частоты и приема его путевым приемником с приемной стороны. Таким образом, для достоверного диагностирования потребуются токи и напряжения на выходах генераторов, путевых приемников, фильтров и реле, а также сопротивление изоляции кабеля относительно земли (при использовании кабельного хозяйства).

Дополнительно для каждого объекта диагностирования нужен анализ таких параметров, как вибрационные воздействия на объект диагностирования и климатические условия эксплуатации.

С этой целью может применяться выносное устройство на основе акселерометров или встроенный в модуль диагностирования датчик. Каждый измерительный модуль должен быть снабжен датчиком температуры (либо на объекте мониторинга устанавливается метеостанция). Каждый контроллер также должен передавать в систему мониторинга данные самодиагностирования (как компонентов, так и средств энергоснабжения).

Встраиваемые диагностические модули могут служить и устройством первичной обработки данных о состоянии объектов смежных хозяйств. Важнейшей задачей является контроль механических и геометрических параметров рельсового пути и непосредственно железнодорожных стрелок. Для их мониторинга используются выносные датчики, располагаемые на внутренних элементах устройств и на внешних объектах с проводным или беспроводным интерфейсом (примером является известное решение по мониторингу геометрии стрелочного перевода [20]).

Сам измерительный модуль должен быть средством получения множества диагностических параметров от одной группы взаимосвязанных объектов, часть из которых обрабатывается непосредственно «на месте», а часть транслируется на сервер мониторинга.

В архитектуре, представленной на рис. 1, диагностическая информация передается по выделенным цепям в выделенное вычислительное ядро системы технического диагностирования и мониторинга, располагаемое в непосредственной близости к ядру системы управления движением. Диагностические цепи, тем не менее, могут быть и совмещенными с цепями управления в случае соответствующего доказательства безопасности. Однако первый вариант будет приоритетным.

Диагностические данные проходят предобработку, восстановление и фильтрацию на уровне диагностических модулей и передаются в вычислительное ядро системы мониторинга, где при использовании искусственного интеллекта производится их комплексный анализ: пороговая обработка (по сравнению с нормами), трендовая обработка (по прогнозируемым изменениям значений) и комплексный анализ с постановкой диагноза, прогноза, оценкой остаточного ресурса и «жизненно важных показателей» (например живучести) [21, 22]. Кроме того, формируется дорожная карта обслужи-



Вологодская горловина ст. Мга Октябрьской ж.д.

вания конкретного объекта железнодорожной автоматики.

Результаты мониторинга выводятся на автоматизированные рабочие места, расположенные в непосредственной близости к пульту или панели управления. Данные мониторинга сортируются, укрупняются и транслируются на верхние уровни управления и мониторинга в единые центры управления движением. Доступ к результатам мониторинга реализуется и удаленно через браузер (технология «тонкий клиент»), и через специализированные защищенные мобильные приложения мониторинга (по типу банковских приложений) для авторизованных пользователей системы.

Представленный подход к организации диагностического уровня в системе управления движением поездов позволяет существенно усовершенствовать известные технологии мониторинга. Строго говоря, современные системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики в Российской Федерации являются устройствами накопления и простейшей классификации диагностических данных, но никак не системами диагностирования и тем более мониторинга [8]. Можно сказать, что это лишь системы контроля по пути к системам диагностирования и мониторинга с требуемой полнотой и глубиной фиксации событий и высоким уровнем достоверности постановки диагноза и прогноза, требующие существенной модернизации и использования современных средств обработки диагностической информации.

А в представленной архитектуре с выделением ядра мониторинга, размещением его на станции (на посту централизации или в отдельном контейнере) и получением более полного множества диагностических параметров по каждому из объектов напольной автоматизации создается возможность реализовать более развитые методики мониторинга.

«Зеленая» централизация

Одной из перспективных систем централизации управления является «озеленённая» система с распределенными вычислительными ресурсами, дающая минимальный углеродный след [17, 18]. Ее укрупненная архитектура представлена на рис. 3 и воплощает концепцию Green Interlocking. Такая система строится на основе использования современных информационных технологий.

Архитектура системы включает в себя несколько уровней иерархии: низовой уровень сопряжения с напольным технологическим оборудованием, образованный функциональными модулями (ФМ) и беспроводной сетью обработки данных на их основе, уровень беспроводной связи с объектами оперативного управления и сам уровень оперативного управления. Функциональные модули подключаются непосредственно к объектам управления, содержат в себе микроконтроллер управления и встроенного мониторинга, а также передатчик сигнала. Функциональные модули, таким образом, распределены по станциям и перегонам и образуют распределенную вычислительную сеть

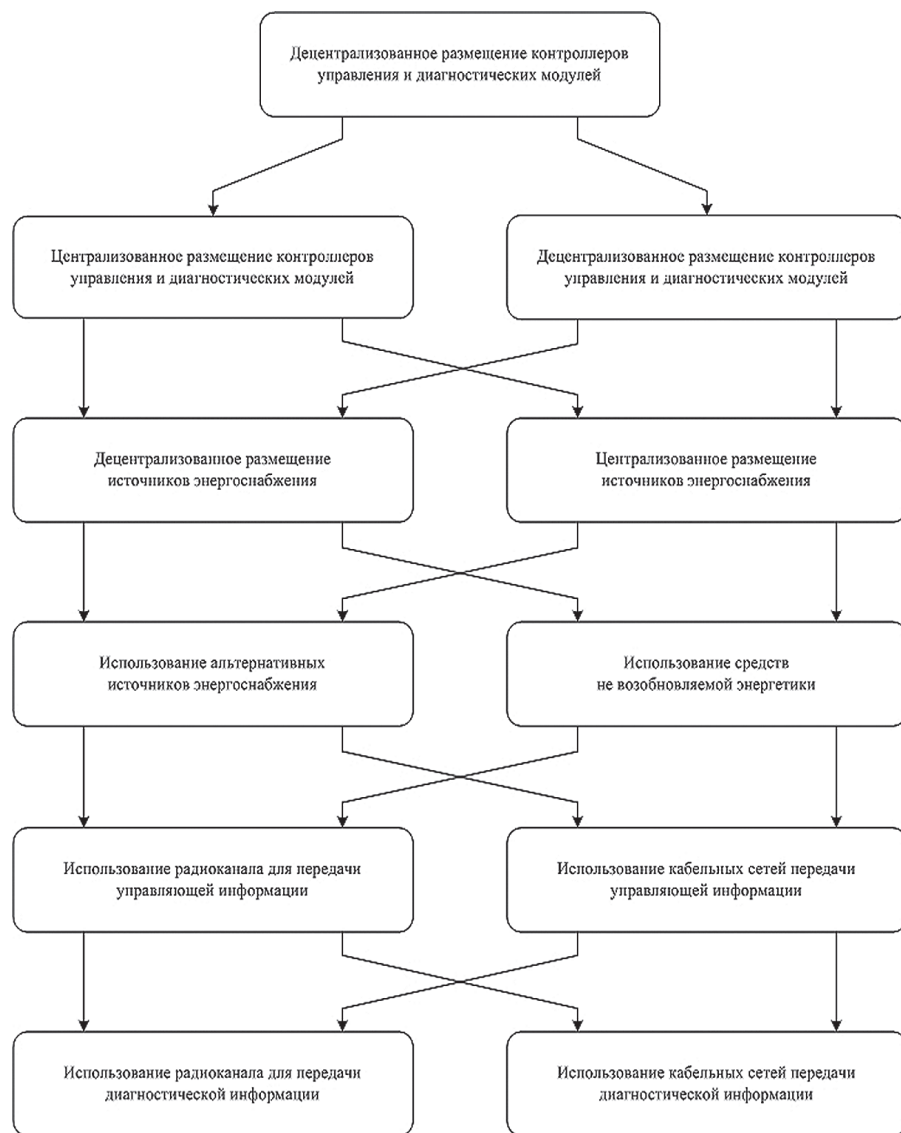


Рис. 2. Варианты реализации системы управления

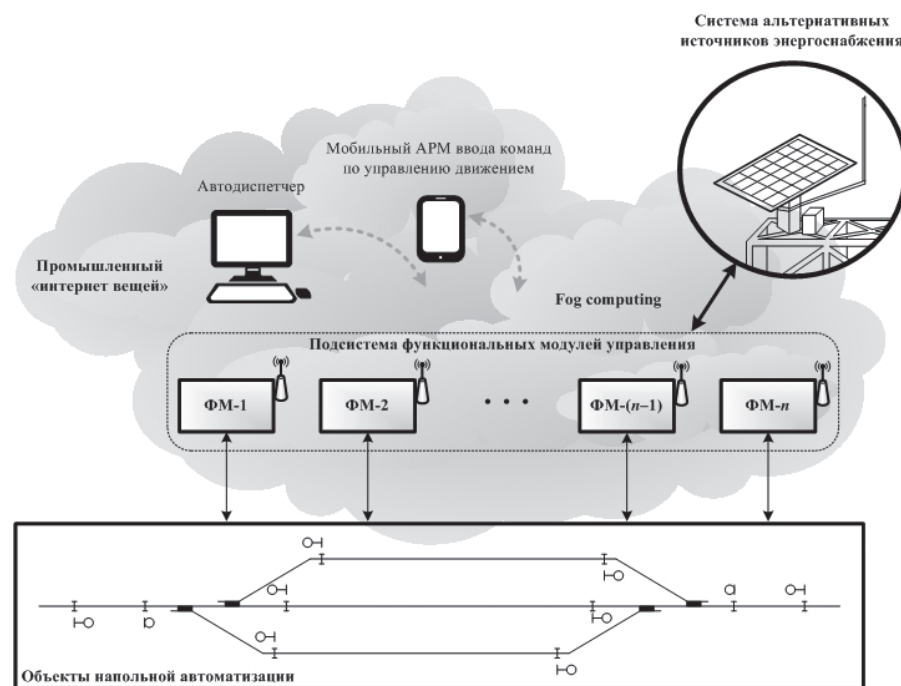


Рис. 3. Архитектура Green Interlocking с распределенными вычислительными ресурсами

на основе технологии fog computing. Все зависимости проверяются именно здесь, на нижнем исполнительном уровне. Доступ к датчикам осуществляется по киберзащищенному беспроводному каналу, сообщения в котором используют разработанный криптографический протокол на основе генетического алгоритма в компиляторе для обеспечения максимальной энергоэффективности, со специального автоматизированного рабочего места (АРМа) оператором управления движением на объекте (аналог дежурного по станции). В перспективе функции оператора автоматизируются и используются автодиспетчером для организации рациональных режимов управления движением.

В процессе реализации концепции Green Interlocking должен происходить постепенный переход к уменьшению количества напольного технологического оборудования железнодорожной автоматики. На первом этапе сохраняются традиционные средства в виде рельсовых цепей, светофоров, стрелок, дроссель-трансформаторов и т. д. На втором этапе производится отказ от светофорной сигнализации за счет передачи требуемых показателей скорости на бортовые устройства локомотивов. На третьем этапе исключаются рельсовые цепи и минимизируется число дроссель-трансформаторов, подвижные единицы позиционируются с использованием радиоканала, а целостность рельсового пути контролируется на основе мониторинговых оптоволоконных систем. Таким образом, конечный этап связан лишь с сохранением устройств автоматического управления железнодорожными стрелками (естественно, при изменении типа используемых двигателей и номиналов токов и напряжений их функционирования) и формированием собственного защищенного IIoT для управления движением поездов. От применения переменного тока для управления с последующим преобразованием его в постоянный ток постепенно переходят к использованию только постоянного тока.

Предложенная в этой работе архитектура системы управления движением поездов может быть реализована на любой современной элементной базе. Каждый из объектных контроллеров, снабженный легкоъемными диагностическими модулями, позволяет не только управлять конкретным объектом железнодорожной автоматики, но и получать

широкий спектр информации о нем, что открывает пути к реализации функции управления, а также достоверного и глубокого контроля, диагностирования, мониторинга, прогнозирования, оценки остаточного ресурса объектов и выдачи дорожных карт для их обслуживания и поддержания на высоком уровне отказоустойчивости. Предлагаемая архитектура позволяет в процессе разработки системы управления наделять ее техническим иммунитетом и способностью противостоять внешним дестабилизирующим факторам.

Положительный экономический эффект от применения системы с описанной архитектурой достигается за счет получения цифровой картины состояния объектов управления, что позволяет проводить обслуживание по фактическому состоянию. При этом не требуется большой штат технического персонала на станциях. Одна бригада способна обслуживать сразу десятки систем управления с одного центрального поста. Данные мониторинга могут выводиться в защищенные мобильные приложения, что дает обслуживающему персоналу возможность реагировать на развитие неисправностей вовремя и парировать их, проводя техническое обслуживание. Подобный подход может сократить стоимость эксплуатации системы железнодорожной автоматики и телемеханики в разы по сравнению с обслуживанием по планово-предупредительному методу.

Высокоиммунные системы управления движением — то, что необходимо для создания надежного и безопасного комплекса управления движением поездов. Они являются базовыми средствами управления, которые могут эффективно использоваться с высокоуровневыми системами автоматического диспетчерского управления. При совершенствовании технологии мониторинга, дооснащении датчиками объектов железнодорожной инфраструктуры (контактной сети, железнодорожного пути, мостов, вокзалов и т. д.) можно получать цифровые копии станций, выводить данные оперативному персоналу, автоматически анализировать риски в нарушении безопасности в движении и при необходимости вносить корректировки в процесс движения. ■

Литература

1. Hall C. Modern Signalling: 5th edition. — UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016. — 144 p.

2. Сапожников, В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А. и др. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1995. — 272 с.
3. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition. — Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. — 552 p.
4. Кокурин, И. М. Интеллектуальная система управления движением поездов на основе автоматизации диспетчерского регулирования и центрального автоведения // Автоматика на транспорте. — 2018. — Том 4. — № 3. — С. 305–314.
5. Микропроцессорные системы централизации: Учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, А. Б. Никитин, А. А. Прокофьев, М. С. Трясов; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. — 398 с.
6. Власенко, С. В., Лунев С. А., Соколов М. М. Централизованная и децентрализованная архитектура постов управления станциями // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 3. — С. 22–25.
7. Сапожников, В. В., Борисенко Л. И., Прокофьев А. А. и др. Техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики. — М.: Маршрут, 2003. — 336 с.
8. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 171 с.
9. Лупал, Н. В. Устройства сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах Российской Империи / под ред. В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. — СПб.: Наука, 2020. — 159 с.
10. Кононов, В. А., Лыков А. А., Никитин А. Б. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 348 с.
11. Сапожников, В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Шаманов В. И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие // Под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. — 318 с.
12. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance // Signal+Draht, 2018, issue 9, pp. 70–75.
13. Fritz C. Intelligent Point Machines // Signal+Draht, 2018, (110), issue 12, pp. 12–16.
14. Brandt M. Sidis WS Diagnostic Center // Signal+Draht, 2020 (112), issue 4, pp. 13–16.
15. Ефанов, Д. В., Осадчий Г. В. Эволюция систем управления на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 3. — С. 43–47.
16. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment // Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design, 2004, pp. 467–473.
17. Ефанов, Д. В., Осадчий Г. В. «Зеленые» технологии на железнодорожном транспорте // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 12. — С. 13–16. — DOI: 10.34649/AT.2019.12.12.003.
18. Efanov D. W., Osadtschiy G. W. Energy Efficiency Categories for Safety Installations // Signal+Draht, 2020 (112), issue 4, pp. 36–42.
19. Belyi A., Osadchy G., Dolinskiy K. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 176–183, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743.
20. Kassa E., Skavhaug A., Kaynia A. M. Monitoring of Switches & Crossing (Tornouts) and Tracks. — Decision Support Tool for Rail Infrastructure, EU Project No. 636285., 41 p.
21. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. Evaluation of Loads Applied on Engineering Structures Based on Structural Health Monitoring // International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 146–150.
22. Ефанов, Д. В., Мясин В. Н., Осадчий Г. В. и др. Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 2. — С. 35–40.