

ОЦЕНИВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич, профессор, профессор кафедры; e-mail: shamanov_vi@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Москва

Неустойчивая работа аппаратуры рельсовых цепей и локомотивной аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации вызывает ложные переключения светофоров, что отрицательно влияет на пропускную способность участков железных дорог и на безопасность движения поездов. Такие сбои в работе аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации отрицательно действуют на психику локомотивных бригад. При повышенной интенсивности сбоев разрешается отключать эту аппаратуру как неисправную, что существенно ухудшает безопасность движения поездов.

На железных дорогах с электротягой основной причиной рассматриваемых сбоев является мешающее действие тяговых токов при его неравенстве в рельсовых нитях рельсовой линии. Появляется оно при возникновении асимметрии (разности величин) продольного и/или поперечного сопротивлений рельсовой линии, вызванной ухудшением состояния рельсовых стыковых соединителей, дроссельных перемычек и/или при пробое искровых разрядников в цепях подключения к рельсам цепей заземления различных конструкций. Контролировать состояние электропроводящих элементов в рельсовых линиях сложно вследствие их многочисленности и потому, что их электрическое сопротивление в области допуска имеет порядок миллиОмов. Этим вызывается необходимость разработки более совершенных способов оценки электромагнитной обстановки и способов определения состояния указанных элементов. В статье приводятся результаты разработки экспериментальных и аналитических способов оценивания электромагнитной обстановки на участках с электротягой для аппаратуры рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Дано описание разработанных способов контроля состояния электропроводящих и изолирующих элементов в рельсовых линиях, более пригодных при выполнении работ по техническому обслуживанию рассматриваемой аппаратуры и определения причин ее неустойчивой работы.

Ключевые слова: рельсовые линии; тяговые токи; асимметрия; электромагнитная обстановка; помехи; рельсовые цепи; автоматическая локомотивная сигнализация.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-252-265

▼ Введение

Эффективность систем интервального регулирования движения поездов определяется прежде всего совершенством и качеством работы технических средств, обеспечивающих определение местоположения подвижного состава и передающих эту информацию в аппаратуру, управляющую показаниями напольных светофоров, и в аппаратуру на локомотиве. Основные требования к этим техническим средствам — их безопасность и безотказность.

Необходимость в оценке электромагнитной обстановки на электрифицированном участке железной дороги возникает тогда, когда увеличивается интенсивность сбоев в

работе рассматриваемых технических средств или когда необходимо оценить влияние на эту аппаратуру увеличения количества, веса и/или скорости движения поездов.

На всех железных дорогах мира постоянно ведутся работы по совершенствованию методов и технических средств, обеспечивающих выполнение рассматриваемых функций за счет применения счетчиков осей, волоконно-оптических кабелей, индуктивных шлейфов, ультразвуковых датчиков, евробализ [1]. Все шире используется спутниковая навигация, цифровая радиосвязь, позволяющие реализовать координатные системы с регулируемой на «хвост» идущего впереди поезда [2–6].

Однако такие системы используются в основном на линиях с высокоскоростным или очень интенсивным движением.

На магистральных железных дорогах России, стран постсоветского пространства и развитых стран мира продолжается широкое использование рельсовых цепей (РЦ). Они обеспечивают контроль свободности участков железнодорожного пути и целостности рельсов, а также передачу информации о свободности или занятости лежащих впереди по маршруту движения участков пути в аппаратуру телеконтроля и в локомотивную аппаратуру автоматики.

РЦ используются в половине действующих систем железнодорожной автоматики и телемеханики на железных дорогах Германии для контроля участков пути [7, 8]. Они широко применяются на железных дорогах США, Японии, Китая [9–11]. Остаются они и на нижнем уровне в многоуровневых системах интервального регулирования движения поездов, на верхних уровнях которых применяется спутниковая навигация или цифровая радиосвязь [2, 9].

Рельсовые линии используются в РЦ как двухпроводные электрические линии для контроля свободности участков пути и передачи электрических сигналов. На электрифицированных железных дорогах рельсовые линии используются также как две однопроводные электрические линии для пропуска тяговых токов от электровозов к тяговым подстанциям.

Одновременный пропуск по рельсовым линиям сигнальных токов и превосходящих по величине их на один-два порядка тяговых токов увеличивает уровень помех в аппаратуре автоматики, усложняя электромагнитную обстановку. Ее ухудшение вызывает увеличение интенсивности сбоев в работе аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и РЦ. Цель статьи состоит в освещении результатов разработки схем замещения рельсовых линий, обеспечивающих решение задач электромагнитной совместимости РЦ и АЛС с тяговой сетью, а также результатов разработки способов оценивания текущей электромагнитной обстановки на участках с электротягой переменного тока.

1. Факторы, влияющие на электромагнитную обстановку

Всего на устойчивость работы аппаратуры АЛС и РЦ действует более десятка различных факторов. Степень воздействия каждого из них или их различных сочетаний на аппаратуру РЦ или на аппаратуру АЛС может значительно различаться при одних и тех же условиях работы. Поэтому анализировать электромагнитную обстановку для этих видов аппаратуры приходится раздельно.

Длина РЦ по-разному влияет на работу аппаратуры РЦ и АЛС. Короткие РЦ работают устойчивее в условиях ухудшения состояния электропроводящих и изолирующих элементов рельсовых линий, но интенсивность сбоев в работе аппаратуры АЛС может при этом увеличиваться вследствие ее определенной инерционности.

Устойчивость аппаратуры РЦ зависит от суммарных значений величин продольного сопротивления и поперечной проводимости элементов рельсовой линии по всей ее длине между источником и приемником сигнальных токов. Для аппаратуры АЛС важен характер распределения этих величин по длине каждой рельсовой нити рельсовой линии. Смена звеньев железнодородного пути на бесстыковой путь со сварными рельсовыми плетями (на плетевой путь) заметно облегчает работу аппаратуры и РЦ, и АЛС.

Качество работы аппаратуры и РЦ, и АЛС зависит от качества регулировки режимов работы РЦ, от степени воздействия на рельсовые линии грозовых разрядов и коммутационных перенапряжений.

При росте веса поезда, его скорости и ускорения увеличиваются тяговые токи в рельсовой линии, что усиливает мешающее влияние тягового тока в рельсах на аппаратуру и РЦ, и АЛС. Насыщение сердечников дроссель-трансформаторов может быть дополнительным отрицательным фактором. Однако аппаратура АЛС более чувствительна к этому.

Устойчивость работы аппаратуры АЛС в значительной степени зависит от того, на электровазозе какой серии она установлена. Интенсивность сбоев в работе этой аппаратуры может различаться в несколько раз на электровазозах

разных серий при движении поездов по одному и тому же участку [12]. Причины разной степени влияния этого фактора на аппаратуру РЦ исследованы мало.

При анализе электромагнитной обстановки на каком-либо участке железной дороги влияющие факторы можно разделять на неуправляемые и управляемые. К первым можно отнести грозовую активность, наличие коротких и количество неcodируемых РЦ, по которым проходят электровозы с аппаратурой АЛС, серии электровозов на участке.

Ко вторым относятся факторы, степень воздействия которых на интенсивность сбоев рассматриваемой аппаратуры можно уменьшать проведением специальных работ, например, за счет контроля состояния наиболее значимых с точки зрения электромагнитной совместимости объектов и обеспечения требуемого качества их технического обслуживания.

Основным источником рассматриваемых помех на электрифицированных железных дорогах является асимметрия тягового тока под приемными катушками АЛС и в местах подключения к рельсам аппаратуры РЦ [12, 13]. Из-за повышенной асимметрии переменного тягового тока происходит более половины рассматриваемых сбоев.

Появляется асимметрия тягового тока, когда в рельсовой линии из-за действия деградиционных процессов становятся разными по величине сопротивления рельсовых нитей вследствие неодинакового и несимметричного выхода из поля допуска величин электрических сопротивлений токопроводящих и/или изолирующих элементов в этих нитях, а также сопротивлений изолирующих стыков. Действие взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии вызывает заметное увеличение асимметрии тягового тока. Это и определяет необходимость контроля состояния токопроводящих и/или изолирующих элементов в рельсовых нитях [12].

Основной задачей контроля состояния этих элементов является своевременное выявление недопустимого приближения к границам допуска их электрических сопротивлений или быстрое обнаружение их внезапных отказов. Своевременный и достоверный контроль

состояния данных элементов повышает безопасность движения поездов, уменьшает потери от их простоев, сокращает затраты на техническое обслуживание и ремонты элементов рельсовых линий.

2. Схемы замещения рельсовых цепей

Для исследования влияния тягового тока на аппаратуру РЦ и АЛС необходимо знать его распределение по рельсовой линии как линии электрической связи. Рельсовые линии обладают распределенными параметрами, и при анализе распространения по ним сигнальных и тяговых токов применяются разные схемы замещения.

В классической теории РЦ для анализа их свойств и методов расчета применяются схемы замещения, базирующиеся на теории линейного пассивного четырехполюсника и телеграфных уравнений [14]. Все это предназначено для исследования распределения сигнального напряжения и тока по элементам РЦ по их концам или по концам рельсовых линий.

Теория использована и для анализа влияния помех от тягового тока в рельсах на устойчивость работы аппаратуры РЦ и АЛС [15]. Однако при этом возникают сложности учета особенностей растекания тяговых токов по рельсовым нитям неоднородной рельсовой линии по сравнению с протеканием по ним сигнальных токов.

Если за начало РЦ принять тот ее конец, в котором тяговый ток втекает в рельсовую линию, то здесь тяговый ток распределяется по секциям основной обмотки дроссель-трансформатора обратно пропорционально входным сопротивлениям рельсовых нитей по всей их длине. Под локомотивными катушками АЛС тяговый ток распределяется обратно пропорционально входным сопротивлениям отрезков рельсовых нитей между первой колесной парой электровоза и местом подключения к рельсам источника сигнального тока. При движении поезда по неоднородной рельсовой линии эти входные сопротивления изменяются, поэтому важно уметь рассчитывать их величины.

Представление, с учетом [16], рельсовой линии, обладающей распределенными параметрами, как линии с сосредоточенными

параметрами позволяет решить эту проблему [12]. Требуемая точность представления рельсовой линии схемой с сосредоточенными параметрами обеспечивается за счет разделения рельсовой линии на отдельные отрезки с их каскадным соединением в пределах рельсовой линии.

Предельная длина таких отрезков, ограниченная допускаемой погрешностью такой замены, зависит от соотношения величин удельных продольного и поперечного сопротивлений для выбранной гармонике тягового тока на исследуемых участках неоднородной рельсовой линии. На такие отрезки неоднородная рельсовая линия может делиться и для выделения в ней участков с разными значениями асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Этим определяется удобство таких схем для расчета статики и динамики величин входных сопротивлений рельсовых нитей при анализе распределения по ним тягового тока.

Представление в таких схемах замещения рельсовых нитей трехполюсниками с лестничной (цепной) схемой и использование для вычисления входных сопротивлений нитей для тягового тока, текущего под приемными локомотивными катушками АЛС, дало возможность найти зависимости изменения асимметрии переменного тягового тока под этими катушками при движении поезда по рельсовым линиям. Рассматривались различные варианты соотношения продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей по длине неоднородных рельсовых линий [12]. Однако при этом возникли определенные сложности учета взаимной индуктивности рельсовой нити с другими токонесящими линиями.

Анализ процесса формирования асимметрии переменного тягового тока в рельсовой линии обеспечил разработку способа учета взаимной индуктивности между рельсовыми нитями [17]. Это позволило усовершенствовать вычисление входных сопротивлений рельсовых нитей для тягового тока [12]. Схема замещения РЦ, показанная на рис. 1, разработана с учетом полученных результатов.

Рельсовая линия состоит из двух рельсовых нитей РН1 и РН2, обладающих распределенными по длине рельсовой линии продольными

и поперечными сопротивлениями и взаимной индуктивностью. Тяговые токи \dot{I}_T в пределах РЦ, ограниченной изолирующими стыками ИС с дроссель-трансформаторами ДТ, текут по рельсовым нитям в одном направлении, а сигнальный ток \dot{I}_C — в противоположных направлениях.

Рельсовая линия представляется в виде каскадного соединения элементов длиной l_i , включающих в себя параллельное соединение трехполюсников. Этим обеспечивается возможность достаточно строгого исследования влияния изменения по длине рельсовой линии продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей на условия растекания тяговых токов по рельсовой линии и на уровень помех от них на аппаратуру РЦ и АЛС.

В каждом i -м элементе продольные сопротивления половин отрезков первой Z'_{li}, Z''_{li} и второй Z'_{2i}, Z''_{2i} рельсовых нитей включают в себя сопротивления сплошных рельсов Z_{CP} , сопротивления сборных рельсовых стыков Z'_{TC1}, Z''_{TC1} и Z'_{TC2}, Z''_{TC2} , а также сопротивления взаимной индуктивности между рельсовыми нитями Z'_{M1}, Z''_{M1} и Z'_{M2}, Z''_{M2} .

Переменный тяговый ток стекает из рельсов в землю $\dot{I}_{y1i}, \dot{I}_{y2i}$ через сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле R_{P31}, R_{P32} и через сопротивления цепей заземления опор контактной сети и различных конструкций R_{O_i} , подключаемых к рельсам. Поэтому тяговый ток в рельсах в начале рельсовых нитей $\dot{I}_{TH1i}, \dot{I}_{TH2i}$ больше тягового в их конце $\dot{I}_{TK1i}, \dot{I}_{TK2i}$ у каждого i -го элемента. Могут различаться также тяговые токи в началах $\dot{I}_{TH1i}, \dot{I}_{TH2i}$ и концах $\dot{I}_{TK1i}, \dot{I}_{TK2i}$ первой и второй рельсовых нитей.

Тяговый ток в начале каждого i -го элемента распределяется по рельсовым нитям обратно пропорционально величинам их входных сопротивлений Z_{BX1i} и Z_{BX2i} . Для РЦ это входные сопротивления рельсовых нитей на том ее конце, где тяговые токи втекают в нити. Для аппаратуры АЛС это изменяющиеся при движении поезда сопротивления отрезков рельсовых нитей от первой колесной пары головного электровагона до установленного впереди дроссель-трансформатора или до источника сигнальных токов.

Под действием деградиционных процессов сопротивления всех элементов продольного сопротивления рельсовых нитей, кроме сопротивления основных обмоток дроссель-трансформаторов, с течением времени растут. Эти изменения происходят неравномерно и неодинаково по длине рельсовых нитей. Неодинаково по длине рельсовых нитей уменьшаются и сопротивления цепей заземления. Сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле могут мало различаться в рельсовых линиях с деревянными шпалами. Эти сопротивления на участках с железобетонными шпалами могут различаться заметно при односторонних пробоях электрической изоляции шпал.

В РЦ с дроссель-трансформаторами сопротивления их основных обмоток играют роль балластных сопротивлений, а случайная неодинаковость изменения во времени сопротивлений элементов в разных рельсовых нитях по длине рельсовой линии в определенной степени взаимно компенсируется.

В режиме АЛС в цепи протекания тягового тока остается только один дроссель-трансформатор, а при движении поезда расстояние от головного электровоза до места установки передатчика сигнальных токов уменьшается, отчего данная компенсация проявляется меньше. Поэтому на одних и тех же участках интенсивность сбоев в работе АЛС всегда больше, чем интенсивность сбоев в работе РЦ [12].

3. Экспериментальная оценка электромагнитной обстановки

Экспериментальная оценка электромагнитной обстановки обеспечивает разработку эффективных мер по повышению устойчивости работы аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики на выбранных участках железных дорог [12, 17–19]. Специфическими являются исследования частотного спектра помех от тяговых токов, результаты которых позволяют разрабатывать действенные способы фильтрации и компенсации (парирования) помех [12, 20, 21].

Основной причиной появления повышенной интенсивности помех на аппаратуру РЦ и АЛС является ухудшение состояния элементов рельсовых нитей вследствие действия в них

деградационных процессов. Токопроводящих и изолирующих элементов в рельсовой линии много, особенно в звеньевом пути, что делает достаточно трудоемкими работы по контролю их состояния. Поэтому очень важной является предварительная оценка причин ухудшения электромагнитной обстановки. Выполнение этой операции на участках с электротягой переменного тока обеспечивается запатентованным способом диагностики состояния элементов в рельсовых нитях [22].

Падения напряжения на секциях основных обмоток дроссель-трансформаторов в начале $\dot{U}_{Н1}, \dot{U}_{Н2}$ и в конце $\dot{U}_{К1}, \dot{U}_{К2}$ соответственно первой и второй рельсовых нитей пропорциональны тяговому токам $\dot{I}_{ТН1}, \dot{I}_{ТН2}$ в их начале и конце $\dot{I}_{ТК1}, \dot{I}_{ТК2}$ (см. рис. 1). В соответствии с предложенным способом измеряются эти напряжения и по полученным данным вычисляются соответствующие токи. Например, при найденном значении напряжения $\dot{U}_{Н1}$ величина тока в начале рельсовой нити РН1 вычисляется по формуле $\dot{I}_{ТН1} = \dot{U}_{Н1} / (0,25Z_{ДТ})$, где $Z_{ДТ}$ — сопротивление основной обмотки дроссель-трансформатора.

По полученным данным находится асимметрия тяговых токов в начале и конце РЦ. Если асимметрия повышена, то вычисляют степень уменьшения величины тягового тока в каждой рельсовой нити. Результаты этих вычислений позволяют определить причины появления повышенной асимметрии тягового тока, что обеспечивает возможность существенного уменьшения трудоемкости работ по диагностике состояния токопроводящих или изолирующих элементов в рельсовых нитях.

Известные способы измерения параметров рельсовых линий дают возможность находить только продольное и поперечное сопротивления рельсовой линии [23]. В задачах электромагнитной совместимости важно знать также поперечное сопротивление каждой рельсовой нити, т. е. ее сопротивление по отношению к земле. Найти и продольное, и поперечное сопротивления каждой рельсовой нити позволяет запатентованный способ измерений при представлении отрезков рельсовых нитей трехполюсниками с сосредоточенными параметрами [24].

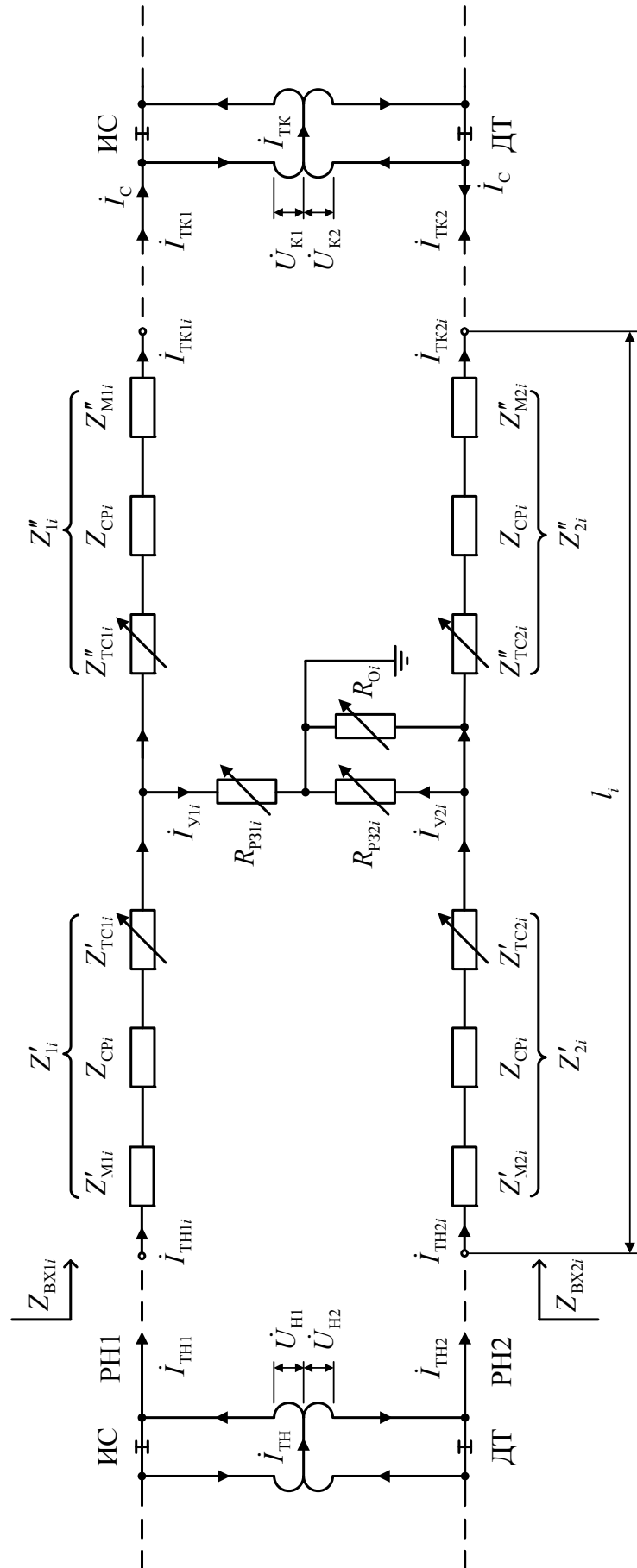


Рис. 1. Схема замещения релейской цепи

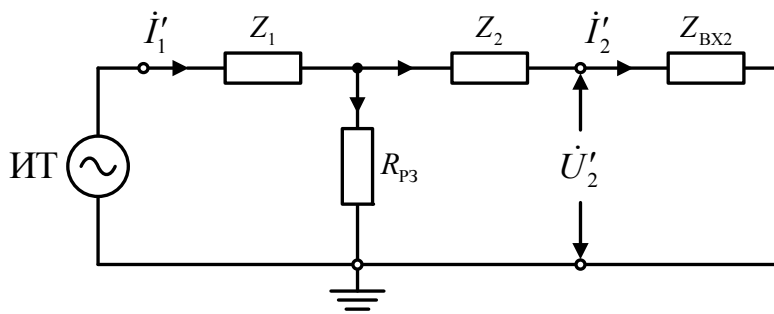


Рис. 2. Измерения при нормальной работе рельсовой сети

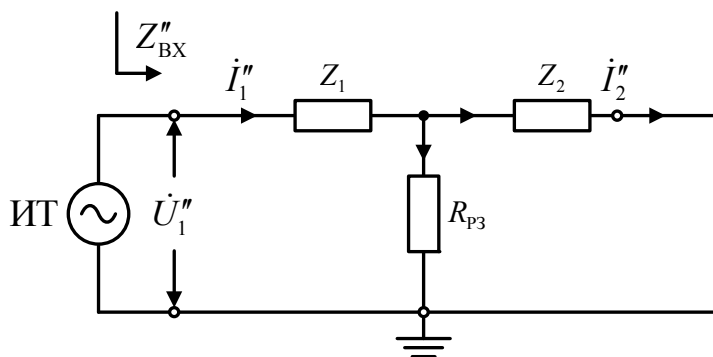


Рис. 3. Измерения при коротком замыкании рельсов на землю в конце измеряемого отрезка рельсовой нити

Для измерения напряжения между рельсовой нитью и удаленной землей устанавливаются заземлители возле входного и выходного концов участка рельсовой нити на расстоянии 30–50 м от оси пути. Заземлитель в конце участка обеспечивает измерение этого напряжения в нормальном режиме работы этого участка. Заземлитель возле входного конца участка используется для измерения напряжения в режиме короткого замыкания на землю его конца. Еще один заземлитель, устанавливаемый в конце участка в непосредственной близости от пути, нужен для обеспечения этого короткого замыкания.

В схемах замещения отрезка рельсовой нити трехполюсником на рис. 2 и 3 сопротивления половин отрезков рельсовых нитей в Т-образной схеме замещения обозначены последовательно включенными резисторами с сопротивлениями Z_1 и Z_2 . Реальные величины этих сопротивлений могут быть различными.

Распределенное по длине отрезка рельсовой нити ее сопротивление по отношению к земле обозначено резистором R_{p3} . Входное по отношению к земле сопротивление участка

рельсовой нити, примыкающей к концу ее отрезка, обозначено Z_{BX2} . На рис. 2 использованы обозначения: I'_1, I'_2 — тяговые токи соответственно втекающий в рассматриваемый отрезок рельсовой нити и вытекающий из него; U'_2 — напряжение между рельсами и удаленной землей на выходном конце этого отрезка рельсовой нити в нормальном режиме ее работы. На рис. 3 показано, что при коротком замыкании рельсов на землю на выходном конце участка измеряются напряжение U''_1 между рельсами и удаленной землей на входном конце участка, а также токи в рельсовой нити. Измеренные значения токов и напряжений позволяют найти численные значения продольных и поперечных сопротивлений рассматриваемого участка рельсовой нити. Величина продольного сопротивления Z_2 второй половины этого участка вычисляется по формуле:

$$Z_2 = \frac{I''_1 - I''_2}{I''_1 I''_2 - I''_2 I''_1} \cdot U'_2. \tag{1}$$

Сопротивление между рельсами и землей у данного отрезка рельсовой нити:

$$R_{P3} = \frac{i_2''}{i_1'' - i_2''} Z_2, \quad (2)$$

а продольное сопротивление рельсов первой половины отрезка рельсовой нити:

$$Z_1 = \frac{U_1''}{I_1''} - \frac{Z_2 R_{P3}}{Z_2 + R_{P3}}. \quad (3)$$

Таким образом, предложенный способ обеспечивает возможность находить численные значения продольного сопротивления участка рельсовой нити и его сопротивления по отношению к земле. Определяются они по соотношениям величин тяговых токов, текущих по рельсам и утекающих в землю в пределах рассматриваемого участка, поэтому найденные значения сопротивлений адекватно отражают реальный процесс растекания тягового тока по отрезкам рельсовых нитей в неоднородной рельсовой линии.

Величину асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС обычно находят по результатам измерения напряжений на этих катушках из кабины электровоза. Однако этот способ требует использования цифровых запоминающих осциллографов и связан с определенными организационными сложностями.

Асимметрию тягового тока в любой точке рельсовой линии можно найти по результатам измерения токов в этой точке в каждой рельсовой нити. Однако характер распределения тягового тока по рельсовым нитям рельсовой линии при наличии и отсутствии на ней электровоза движущегося поезда существенно различается. Максимальное приближение результатов измерения асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях при отсутствии поезда к асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС в конкретной точке рельсовой линии обеспечивает запатентованный способ косвенных измерений. Имитация первой колесной пары электровоза обеспечивается закорачиванием рельсовой линии нормативным шунтом и измерением

тяговых токов в рельсах за местом наложения шунта по ходу поезда. [22].

За нормативным шунтом тяговые токи электровоза растекаются от точки измерения по рельсовым нитям обратно пропорционально их входным сопротивлениям. Наложением нормативного шунта имитируется выравнивание тяговых токов в рельсовых нитях, аналогичное такому выравниванию колесными парами под движущимся поездом. В результате этого обеспечивается их перераспределение под приемными локомотивными катушками АЛС, близкое к реальному распределению. Тяговые токи в рельсах при этом удобно измерять бесконтактными измерительными приборами или используя способ двух вольтметров.

Погрешность измерения асимметрии тягового тока предложенным способом при вступлении электровоза на РЦ находится в пределах 1,0–2,0 %, возрастая до 7,0–14,0 % при приближении электровоза к месту подключения к рельсам генератора сигнальных токов. Такая погрешность допустима, так как при приближении электровоза к этому месту возрастает и сигнальный ток под катушками АЛС [22]. Следовательно, по результатам компьютерных экспериментов установлено, что предложенный способ обеспечивает вполне удовлетворительную для практических целей точность косвенного измерения асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС в любой точке пути.

Уточнение причин ухудшения электромагнитной обстановки на каком-то участке железной дороги требует проведения измерений для определения состояния электропроводящих и изолирующих элементов в рельсовых нитях. Наиболее многочисленные электропроводящие элементы в рельсовых нитях — это токопроводящие стыки между рельсовыми звеньями, которые должны обладать достаточно малыми значениями электрического сопротивления. В соответствии с [17] сопротивления таких стыков на электрифицированных участках не должны увеличивать сопротивление рельсовой нити больше, чем на 20 %.

Следовательно, модуль суммарного сопротивления сборных токопроводящих стыков рельсовой нити с рельсами Р65 на частоте 50 Гц

не должен превышать 0,06 Ом/км. Тогда при длине рельсовых звеньев 25 м сопротивление каждого такого стыка в среднем не должно превышать 0,0015 Ома. А при контроле состояния в этих стыках соединений штепселей с рельсами и с медными тросами, а также таких соединений в дроссельных перемычках приходится иметь дело с сопротивлениями еще меньшей величины.

Использование в полевых условиях прямых контактных или бесконтактных методов для массовых измерений таких малых величин сопротивления практически невозможно. Однако это могут обеспечить косвенные способы оценки состояния токопроводящих элементов в рельсовых нитях. Наиболее интересен для измерения сопротивлений малой величины в полевых условиях способ двух вольтметров. Суть способа заключается в сравнении измеренных значений падения напряжения на эталонном и измеряемом сопротивлениях. При измерениях в рельсовых линиях за эталонное сопротивление берется участок рельса выбранной длины [22].

Использование этого способа дало возможность провести широкие исследования по выявлению причин ухудшения электромагнитной обстановки на отдельных участках железных дорог и разработать ряд изобретений. Дополнительные измерения тяговых токов в приварных и штепсельных стыковых соединителях с последующими несложными вычислениями дали возможность диагностировать причины выхода из поля допуска сопротивления элементов сборного токопроводящего стыка [22].

Нижний предел допускаемого значения сопротивлений изолирующих стыков в рельсовых нитях находится в пределах 15–50 Ом. Минимально допустимое сопротивление электрической изоляции железобетонной шпалы имеет порядок 2 кОм. Сопротивления цепей заземления, подключаемых непосредственно к рельсу двухниточной РЦ, должно быть не менее 100 Ом, а подключаемых через групповое заземление — не менее 6 Ом·км.

Для измерения сопротивлений в таких диапазонах серийно выпускаются измерительные приборы. Однако параллельно с

изолирующими стыками и элементами электрической изоляции железобетонных шпал существуют обходные цепи, сопротивления которых на порядок меньше минимально допускаемых величин сопротивлений этих элементов, что исключает использование для проведения измерений серийных приборов. Поэтому были запатентованы способы косвенных измерений сопротивления этих электроизолирующих элементов.

Проверка состояния искровых промежутков в цепях заземления, подключаемых к рельсу, должна проводиться с выполнением всех требований по безопасности проведения работ в высоковольтных электрических линиях, что усложняет и удорожает выполнение таких проверок.

Все сказанное определило необходимость разработки и патентования ряда способов и устройств, обеспечивающих измерение параметров и контроль состояния изолирующих элементов в рельсовых нитях с использованием способов неразрушающего контроля [22].

4. Аналитическая оценка электромагнитной обстановки

Для прогнозирования изменения электромагнитной обстановки или экстраполяции результатов ее обследования на другие участки железных дорог большое значение имеют аналитические способы, основанные на знании физических процессов растекания тяговых токов по тяговой рельсовой сети.

Величина сопротивления токопроводящих элементов рельсовых нитей зависит от величины I_T и частоты ω_T гармоник тягового тока, от величины I_B тока во влияющих высоковольтных линиях электроснабжения. В высоковольтных линиях электроснабжения практически исключено появление гармоник тока промышленной частоты ω_B , а частота гармоник ω_T тягового тока в рельсовых нитях одной рельсовой линии одинакова. На величину сопротивления электроизолирующих элементов действуют температура T° и абсолютная влажность f_B окружающей среды.

Сопротивления многих элементов меняются из-за действия деградиционных процессов по мере увеличения времени эксплуатации рельсовой линии после капитального ремонта пути t_3 .

Не зависит от времени эксплуатации только удельное сопротивление сплошных рельсов.

Для однопутной автоблокировки при звеньевом пути формулу для вычисления продольного сопротивления первой рельсовой нити с учетом влияющих факторов можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} Z_{PH1}(T^\circ, \dot{I}_T, \omega_T, t_\Theta) = & z_p(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T)l_{PC} + \\ & + Z_{H1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta) + Z_{CC1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta) + \\ & + 2Z_{ДП1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta) + 0,5Z_{ДТ}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T) + \\ & + z_{M12}(\omega_T)l_{PC}\dot{I}_{T2}(\omega_T)/\dot{I}_{T1}(\omega_T) + z_{M1B}l_{PC}\dot{I}_B/\dot{I}_{T1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где l_{PC} — длина РЦ, км;
 $z_p(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T)$ — удельное сопротивление сплошных рельсов, Ом/км;
 $Z_{H1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta)$, $Z_{CC1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta)$ — суммарные сопротивления соответственно рельсовых накладок и рельсовых стыковых соединителей, Ом;
 $Z_{ДП1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta)$ — сопротивления переходов и тросов у дроссельных перемычек, Ом;
 $Z_{ДТ}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T)$ — сопротивление основной обмотки дроссель-трансформатора, Ом;
 $z_{M12}(\omega_T)$ — удельное сопротивление взаимной индуктивности между рельсовыми нитями, Ом/км;
 z_{M1B} — удельное сопротивление взаимной индуктивности первой рельсовой нити с высоковольтной линией электроснабжения, Ом/км;
 $\dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}$ — тяговые токи в первой и второй рельсовых нитях, А;
 \dot{I}_B — эквивалентный ток в многопроводной линии электропередачи, А.

Для второй рельсовой линии такая формула выглядит подобным образом:

$$\begin{aligned} Z_{PH2}(T^\circ, \dot{I}_T, \omega_T, t_\Theta) = & z_p(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T)l_{PC} + \\ & + Z_{H2}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + Z_{CC2}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + \\ & + 2Z_{ДП2}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + 0,5Z_{ДТ}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T) + \\ & + z_{M12}(\omega_T)l_{PC}\dot{I}_{T1}(\omega_T)/\dot{I}_{T2}(\omega_T) + z_{M2B}l_{PC}\dot{I}_B/\dot{I}_{T2}. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) не учтены изменяющиеся во времени сопротивления изолирующих стыков $Z_{ИС1}(T^\circ, t_\Theta, f_B)$, $Z_{ИС2}(T^\circ, t_\Theta, f_B)$, которые также могут заметно влиять на условия растекания тяговых токов по рельсовым нитям рельсовой линии.

Коэффициенты асимметрии продольных сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ} рельсовой линии и коэффициенты асимметрии тягового тока в ней k_{AI} можно находить по формуле:

$$k_{AZ} = k_{AI} = \frac{|Z_{PH1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta) - Z_{PH2}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta)|}{Z_{PH1}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \omega_T, t_\Theta) + Z_{PH2}(T^\circ, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta)}. \quad (6)$$

Числитель формулы (6) с учетом взаимных индуктивностей и действующих факторов:

$$\begin{aligned} |Z_{PH1} - Z_{PH2}| = & |\Delta Z_H(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + \\ & + \Delta Z_{CC}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + \\ & + \Delta Z_{ДП}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta) + \\ & + (\dot{I}_{1T}/\dot{I}_{2T} - \dot{I}_{2T}/\dot{I}_{1T})z_{M12}(\omega_T)l_{PC} + \\ & + z_{M2B}(\omega_B)l_{PC}\dot{I}_B/\dot{I}_{2T} - z_{M1B}(\omega_B)l_{PC}\dot{I}_B/\dot{I}_{1T}|, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta Z_H(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta)$, $\Delta Z_{CC}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta)$, $\Delta Z_{ДП}(T^\circ, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \omega_T, t_\Theta)$ — разности в рельсовых нитях переходных сопротивлений соответственно в рельсовых накладках, в рельсовых стыковых соединителях, в дроссельных перемычках, величины которых растут по мере увеличения времени эксплуатации рельсовых нитей t_Θ .

При оценке величины коэффициента асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС приходится учитывать его изменения при движении поезда по неоднородной рельсовой линии [12].

Разность продольных сопротивлений рельсовых нитей зависит от времени эксплуатации и качества технического обслуживания, от влажности изолирующих стыков и переходов в рельсовых накладках, а также от частоты гармоник и соотношения величин тяговых токов в каждой рельсовой нити с токами в другой рельсовой нити и с величиной тока во влияющей линии электропередачи.

В знаменатель формулы (6) входят все члены из формул (4) и (5). Величина сопротивления токопроводящих элементов рельсовой линии зависит от величины \dot{I}_T и частоты ω_T гармоник тягового тока, а также от температуры элементов T° . На величину сопротивления электроизолирующих элементов действуют температура T° и абсолютная влажность f_B окружающей среды. Наибольшее действие оказывает изменение величины сопротивления сплошных рельсов, зависящей от температуры, частоты и силы тягового тока в них.

При отрицательных температурах сопротивление сплошных рельсов становится меньше, отчего уменьшается численное значение знаменателя в формуле (6), растёт коэффициент асимметрии тягового тока при таком же численном значении числителя, что приводит к увеличению интенсивности рассматриваемых сбоев. Поэтому, когда после ремонтных работ в электропроводящих элементах в летнее время их состояние признаётся вполне удовлетворительным, в зимнее время интенсивность сбоев РЦ и АЛС может резко увеличиваться, что вызывает необходимость выполнять такие работы и зимой. Следовательно, проведение летних ремонтных работ должно обеспечивать определённый запас по уменьшению мешающего влияния тяговых токов на рассматриваемую аппаратуру.

Повышение интенсивности сбоев РЦ и АЛС в летний период может вызываться ухудшением электроизолирующих свойств искровых промежутков в цепях заземления различных конструкций, подключаемых к рельсам, а также ухудшением состояния электроизолирующих элементов в железобетонных шпалах. Описанные физические процессы вызывают сезонные изменения электромагнитной обстановки и интенсивности рассматриваемых сбоев.

Зависимость величины сопротивления сплошных рельсов от силы тягового тока нелинейна [22]. Поэтому рост тяговых токов в рельсах при движении тяжеловесных поездов или в зонах возле тяговых подстанций не приводит к пропорциональному росту интенсивности сбоев в работе РЦ или АЛС.

Деградиционные процессы в токопроводящих и изолирующих элементах рельсовых нитей вызывают увеличение интенсивности

сбоев РЦ и АЛС по мере роста сроков эксплуатации пути после капитального ремонта.

На двухпутных или многопутных перегонах, а также на станциях величина асимметрии тяговых токов в рельсовых линиях зависит от величины токов в рельсовых нитях соседних рельсовых линий и в их контактных проводах. Это достаточно часто приводит к перекрытиям входных светофоров на запрещающие показания перед поездом, когда одновременно по соседнему пути движется тяжеловесный поезд или разгоняется грузовой поезд [12].

При влажном грунте переменный тяговый ток интенсивно стекает из рельсов в землю, отчего величина переменного тягового тока по длине рельсовой нити изменяется в зависимости от соотношения продольного и поперечного сопротивлений рельсовой нити в конкретной ее точке. От этого меняется влияние взаимной индуктивности на сопротивление рельсовых нитей по их длине. Для таких случаев удобно учитывать не сопротивления рельсовых нитей, а их входные сопротивления в конкретных точках пути [25].

Следовательно, аналитические способы оценки электромагнитной обстановки позволяют определять степень влияния на интенсивность сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС:

- изменения величины и частотного состава тяговых токов в своей и в соседних рельсовых линиях, в контактных проводах;
- изменения токов в линиях продольного электроснабжения;
- изменения температуры окружающей среды;
- сроков службы в рельсовых линиях токопроводящих и изолирующих элементов, качества их технического обслуживания.

Заключение

Основным источником помех в работе аппаратуры РЦ и АЛС на участках железных дорог с электротягой являются тяговые токи в тяговой сети. Создаются помехи при появлении асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии, вызывающей возникновение асимметрии тягового тока.

В статье проведен краткий анализ факторов, влияющих на электромагнитную обстановку.

Часть из них относится к неуправляемым факторам, интенсивность действия которых определяется особенностями путевого развития участков железных дорог и используемыми электровозами. Отрицательное действие управляемых факторов можно уменьшить за счет повышения качества используемых технических средств, улучшения контроля их состояния и их технического обслуживания.

Исследование причин возникновения и их влияния на интенсивность сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС удобно проводить по схемам замещения рельсовых линий, представляющих собою линии связи с распределенными параметрами. Показано, что в задачах электромагнитной совместимости больше результатов можно получить при использовании схем замещения рельсовых цепей, в которых электрические линии с распределенными параметрами представляются как каскадное соединение их отрезков, обладающих сосредоточенными параметрами.

Выполнен анализ известных способов экспериментальной оценки электромагнитной обстановки, обеспечивающих разработку эффективных мер по повышению устойчивости работы рассматриваемой в статье аппаратуры на конкретных участках железных дорог. Рассмотрены запатентованные способы измерений параметров и контроля состояния элементов, определяющих повышение интенсивности сбоев в работе аппаратуры.

Показано, что аналитические способы оценки электромагнитной обстановки, основанные на знании физических процессов растекания тяговых токов по тяговой рельсовой сети, обеспечивают возможность объективной оценки электромагнитной обстановки, прогнозирования ее изменения или экстраполяции результатов обследования на другие участки железных дорог, которые отличаются интенсивностью, скоростью движения и/или весом поездов. ▲

Библиографический список

- Гапанович В. А. Методы и технические средства определения местоположения подвижного состава / В. А. Гапанович, В. И. Головин, В. И. Астрахан // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 2. — С. 10–13.
- Розенберг И. Н. Инновационные технологии интервального регулирования — основа системы управления движением на МЦК / И. Н. Розенберг, В. Г. Матюхин, А. Б. Шабунин, В. И. Уманский // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 6. — С. 5–10. — DOI: 10.34649/AT.2019.6.6.002.
- Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke // Signal und Draht. — 2016. — Vol. 108. — № 2. — P. 68.
- Büssmann F. Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büssmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // Signal und Draht. — 2016. — Vol. 108. — № 10. — Pp. 6–11.
- Rosenbergen M. Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen / M. Rosenbergen, F. Pointer // Signal und Draht. — 2015. — Vol. 107. — № 6. — Pp. 6–8.
- Sauer C. Gleisstromkreise — ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer / Eisenbahningenieur. — 2014. — Vol. 65. — № 7. — Pp. 25–30.
- Kurzweil F. Diebstahlsichre Verbinder bei Gleisstromkreisen / F. Kurzweil // Signal und Draht. — 2014. — Vol. 106. — № 3. — Pp. 29–32.
- Schienen K. T. Die Bestimmung des Bettungswiderstandes bei durchgängig geschwifteten Schienen / K. T. Schienen // Signal und Draht. — 2015. — Vol. 107. — № 12. — Pp. 32–37.
- Vantuono W. Train control systems in the United States / W. Vantuono // Internationale Railway Journal. — 2009. — № 10. — Pp. 32–34, 36.
- Railway Operation and Control. 3rd edition. — Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. — 2014. — 284 p.
- Watanabe I. Moving Block System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit / I. Watanabe, T. Takashige // Quarterly Reports of RTRI. — 1989. — № 4. — Pp. 9–11.
- Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 244 с.
- Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС, 2002. — 638 с.
- Брылеев А. М. Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. — М.: Транспорт, 1970. — 256 с.
- Кравцов Ю. А. Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики / Ю. А. Кравцов, П. Е. Машенко, Е. Г. Щербина. — М.: МИИТ, 2012. — 117 с.
- Зевеке Е. Г. Основы теории цепей / Е. Г. Зевеке, П. А. Ионкин. — М.: Энергия, 1975. — 751 с.
- Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Kazan, Russia, September 14–17, 2018. — Pp. 140–146. — DOI: 10.1109/EWDTS.2018.
- Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–40.

19. Лунев С. А. Непрерывная оценка состояния обратной тяговой сети в условиях организации тяжеловесного движения. / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, И. В. Присухина, А. Г. Ходкевич // Известия ТрансСиб, — 2017. — № 1. — С. 2–9.
20. Bestemyanov P. F. The study of the electromagnetic environment on electrified section of railways / P. F. Bestemyanov, Yu. A. Kravtsov, V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. — 2019. — Vol. 90. — № 9. — Pp. 3–7. — DOI: 10.3103/S1068371219090049.
21. Батраев В. В. Методы повышения надежности систем приема и синхронизации сигналов автоматической локомотивной сигнализации / В. В. Батраев // Автоматика на транспорте. — 2021. — № 2. — С. 175–188. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-175-188.
22. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты / В. И. Шаманов. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. — 304 с.
23. Дмитренко И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / И. Е. Дмитренко, Д. В. Дьяков, В. В. Сапожников. — М.: Транспорт, 1994. — 263 с.
24. Шаманов В. И. Измерения электрических сопротивлений в неоднородных рельсовых линиях на участках с электротягой / В. И. Шаманов, А. Е. Ваньшин, Д. В. Денежкин, Л. Тасболатова // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 3. — С. 11–13. — DOI: 10.34649/AT.2020.3.3.002.
25. Шаманов В. И. Расчеты помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 241–267. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 3, pp. 252–265
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-252-265

Assessment of Electromagnetic Situation for Automation and Remote Control Equipment on Railway Electrified Sections

Information about author

Shamanov V. I., Professor. E-mail: shamanov_vi@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport, Moscow

Abstract: Unstable operation of rail chain equipment and locomotive equipment of automatic locomotive signaling causes false switching of traffic lights that negatively affects the capacity of railway sections and train traffic safety. Such failures in automatic locomotive signaling operation impacts negatively on locomotive crew mentality. At increased intensity of the failures, it is allowed to turn off automatic locomotive signaling equipment as faulty one that significantly worsens train traffic safety. On electrified railways, the main cause of failures in this equipment operation is the interfering effect of traction currents.

Traction current most strongly interferes with the operation of these devices at this current inequality in rail lines at those places where rail chain equipment is connected or under receiving locomotive coils of automatic locomotive signaling. The interfering activity occurs while an asymmetry (difference in values) of longitudinal and/or transverse resistances of a rail line due to the deterioration of the state of rail butt connectors, throttle jumpers and/or the breakdown of spark arresters in the circuits of connection to rails of grounding circuits of various structures. It is difficult to control the state of electrically conductive elements in rail lines because of their multiplicity and also as their electrical resistance in a tolerance area has milliohm order. It causes the necessity to work out better ways on electro-magnetic situation check and approaches to define the condition of indicated elements such as numerous grounding circuits. It's time-consuming task but must be carried out with the fulfillment of all requirements for operation in high-voltage lines. This article presents some results on the development of methods for controlling electrically conductive and insulating elements in rail chains and that are more suitable for performing maintenance work of equipment of rail chain and locomotive automatic signaling.

Keywords: rail lines; traction currents; asymmetry; electromagnetic situation; interference; rail chains; automatic locomotive signaling.

References

- Gapanovich V. A. Metody i tekhnicheskie sredstva opredeleniya mestopolozheniya podvizhnogo sostava [Methods and technical means of determining the location of the rolling stock]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2019, I. 2, pp. 10-13. (In Russian)
- Rozenberg I. N. Innovatsionnye tekhnologii interval'nogo regulirovaniya – osnova sistemy upravleniya dvizheniem na MTSK [Innovative interval control technologies are the basis of the traffic control system at the MCC]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2019, I. 6, pp. 5–10. DOI: 10.34649/AT.2019.6.6.002. (In Russian)
- Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke. *Signal und Draht*. 2016, vol. 108, I. 2, p. 68.
- Bssmann F. Yu., Scheier B., Brinkmann F., Jder B. Wirtschaftlichkeit eines satellitenge-stzten ERTMS fr deutsche Regionalstrecken. *Signal und Draht*. 2016, vol. 108, I. 10, pp. 6–11.
- Rosenbergen M., Pointer F. Hochverfgbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lungen. *Signal und Draht*. 2015, vol. 107, I. 6, pp. 6–8.
- Sauer C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding. *Eisenbahningenieur*. 2014, vol. 65, I. 7, pp. 25–30.
- Kurzweil F. Diebstahlsichre Verbinder bei Gleisstromkreisen. *Signal und Draht*. 2014, vol. 106, I. 3, pp. 29–32.
- Schienen Korn Thomas. Die Bestimmung des Bettungswiderstandes bei durchgngig geschwtiften Schienen. *Signal und Draht*, 2015, 107, I. 12, pp. 32–37.
- Vantuono W. Train control systems in the United States. *Internationale Railway Journal*, 2009. I. 10, pp. 32–34, 36.
- Railway Operation and Control. 3rd edition. Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. 2014. 284 p.
- Watanabe I., Takashige T. Moving Block System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit. *Quarterly Reports of RTRI*. 1989, I. 4, pp. 9–11.
- Shamanov V. I. *Elektromagnitnaya sovместimost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Electromagnetic compatibility of railway automation and telemechanics systems]. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2013. 244 p. (In Russian)
- Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow: UMK MPS Publ., 2002. 638 p. (In Russian)
- Bryleev A. M. *Elektricheskie rel'sovye tsepi* [Electrical track circuits]. Moscow: Transport Publ., 1970. 256 p. (In Russian)
- Kravtsov Yu. A. *Elektromagnitnoe vliyaniye perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Electromagnetic influence of a

- promising electric rolling stock on railway automation devices]. Moscow: MIIT Publ., 2012. 117 p. (In Russian)
16. Zeveke E. G. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1975. 751 p. (In Russian)
 17. Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control. Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.
 18. Baranov L. A. Metod otsenki izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Method for assessing the change in the electromagnetic environment in the places of operation of systems for interval regulation of train traffic]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2013, I. 3, pp. 35–40. (In Russian)
 19. Lunev S. A. Nepreryvnaya otsenka sostoyaniya obratnoy tyagovoy seti v usloviyakh organizatsii tyazhelovesnogo dvizheniya [Continuous assessment of the state of the reverse traction network in the conditions of the organization of heavy traffic]. *Izvestiya TransSiba* [News of TransSib]. 2017, I. 1, pp. 2–9. (In Russian)
 20. Bestemyanov P. F., Kravtsov Yu. A., Shamanov V. I. The study of the electromagnetic environment on electrified section of railways. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, I. 9, pp. 3–7. DOI: 10.3103/S1068371219090049
 21. Batraev V. V. Metody povysheniya nadezhnosti sistem priema i sinkhronizatsii signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii [Methods for improving the reliability of systems for receiving and synchronizing automatic locomotive signaling signals]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2021, I. 2, pp. 175–188. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-175-188. (In Russian)
 22. Shamanov V. I. *Pomekhi na apparaturu rel'sovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity* [Interference on the equipment of track circuits and automatic locomotive signaling. Means of protection]. Moscow: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2018. 304 p.
 23. Dmitrenko I. E. *Izmereniya i diagnostirovanie v sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Measurements and diagnostics in systems of railway automation, telemechanics and communication]. Moscow: Transport Publ., 1994. 263 p. (In Russian)
 24. Shamanov V. I. Izmereniya elektricheskikh soprotivleniy v neodnorodnykh rel'sovykh liniyakh na uchastkakh s elektrotiyagoy [Measurements of electrical resistance in non-uniform rail lines in sections with electric traction]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2020, I. 3, pp. 11–13. DOI: 10.34649/AT.2020.3.3.002. (In Russian)
 25. Shamanov V. I. Raschety pomekh ot tyagovogo toka v neodnorodnykh rel'sovykh liniyakh [Calculations of interference from traction current in inhomogeneous rail lines]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2020, vol. 6, I. 3, pp. 241–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267. (In Russian)