

УДК 656.256.3(088.8)

В. И. Шаманов, д-р техн. наук

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Российский университет транспорта, Москва

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С ТЯГОВОЙ СЕТЬЮ

Рассмотрены вопросы повышения устойчивости работы рельсовых цепей при действии помех от переменного тягового тока. Рельсовые цепи в настоящее время используются на железных дорогах всего мира для контроля свободности от подвижного состава и контроля целостности рельсов на участке железной дороги. В современных многоуровневых системах интервального регулирования движения поездов с использованием цифровых радиоканалов и спутниковой навигации рельсовые цепи также применяются.

Найдено, что появление асимметрии продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовых нитей является только первопричиной появления асимметрии тягового тока. Взаимная индуктивность рельсовых нитей в рельсовой линии увеличивает величину асимметрии тягового тока в несколько раз. Степень этого увеличения зависит от температуры рельсов и величины тягового тока в них.

Взаимная индуктивность рельсовых нитей рельсовой линии с параллельными рельсовыми нитями других рельсовых цепей может как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в зависимости от характера распределения тягового тока по рельсовым нитям близлежащих рельсовых цепей. На величину асимметрии может заметно влиять и взаимная индуктивность рельсовых нитей с линиями продольного электроснабжения, расположенными на опорах контактной сети.

Степень искажения синусоидальности сигнального тока определяется гармониками тока асимметрии. Гармонический состав помех от тягового тока может быстро изменяться во времени и зависит от количества, серии и режимов работы тягового оборудования электропоездов, движущихся в зоне между тяговыми подстанциями. Показано, что применяемые в рельсовых цепях электрические фильтры не всегда обеспечивают требуемую эффективность фильтрации помех.

рельсовые цепи, рельсовые нити, взаимная индуктивность, тяговый ток, асимметрия, помехи, гармонический состав, устойчивость работы.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185

Введение

Главным источником помех, оказывающих воздействие на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, на электрифицированных участках железных дорог являются тяговые токи и их гармоники. От действия этих помех на железных дорогах России каждый час происходит

в среднем до трех десятков сбоев автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). А сбои в работе рельсовых цепей (РЦ) от действия этих помех приводят к ложным перекрытиям показаний светофоров на более запрещающие показания. В результате ухудшается безопасность движения поездов и уменьшается пропускная способность участков железных дорог.

Несущая частота сигнальных токов выбирается так, чтобы она отличалась от частоты тягового тока и его гармоник, что позволяет повысить устойчивость работы этих устройств за счет повышения качества фильтрации помех [1]. Но величина тягового тока может на один-два порядка превышать величину сигнальных токов, что затрудняет защиту от них в слаботочной аппаратуре простым использованием электрических фильтров.

Обеспечить решение рассматриваемой задачи можно за счет применения более помехоустойчивых сигналов или совершенствования применяемых способов кодирования [2]. Эти способы перспективны при разработке новых систем.

Эффективным является применение способов снижения уровня помех при их зарождении, что требует более глубокого изучения процессов формирования помех. Многочисленные измерения в условиях эксплуатации показали, что асимметрия тягового тока в рельсовых нитях рельсовой линии всегда больше асимметрии сопротивлений этих нитей, а рост величины переменного тягового тока в рельсовой линии не приводит к пропорциональному увеличению его асимметрии.

При неизменном состоянии электрических параметров рельсовой линии величина асимметрии тягового тока в ней растет при уменьшении температуры окружающей среды. Изменения гармонического состава тяговых токов приводят к изменению степени искажения синусоидальности сигнального напряжения (тока) [3].

Некоторым результатам выяснения особенностей этих процессов посвящена настоящая статья.

1. Рельсовые цепи в современных системах железнодорожной автоматики и телемеханики

До недавнего времени контроль свободности ограниченных по длине участков железнодорожного пути и передача информации на локомотив о количестве свободных таких участков за напольным светофором обеспечивался с использованием только рельсовых цепей (РЦ).

РЦ требуют относительно высоких вложений в инфраструктуру при строительстве и относительно больших затрат на их эксплуатацию. Одним из направлений по созданию систем интервального регулирования движения поездов без РЦ является использование радиоканалов [4]. Такие системы для отечественных магистральных железных дорог начали разрабатываться

относительно давно [5, 6]. Реальное их использование сдерживалось недостаточной надежностью и защищенностью от помех поездной радиосвязи.

Появление цифровой радиосвязи сняло эти ограничения. В Германии, например, на линии Эрфурт – Лейпциг при скоростях движения до 300 км/ч работает система без светофоров, в которой используется цифровая передача данных по радиоканалу со стандартом GSM-R [7]. Используются радиоканалы и в системе управления движением поездов PTC (Positive Train Control) на железных дорогах Северной Америки [8]. Подобные системы применяются и на отечественных железных дорогах [9].

Внедрение Европейских систем обеспечения безопасности и управления движением поездов ERTMS (European Rail Traffic Management System) требует установки путевых бализ и строительства радиоблокцентров. В то же время есть три системы спутниковой связи – GPS (США), GLONASS (Россия) и Galileo (Европа), которые с относительно высокой точностью определяют местоположение транспортной единицы. Первые исследования по использованию спутниковой навигации для интервального регулирования движения поездов выполнялись еще в конце прошлого века.

Совершенствование этих систем обеспечило, например, то, что в конце февраля 2017 г. на опытном участке острова Сардиния (Италия) успешно завершился проект ERSAT EAV (ERTMS on SATELLITE – Enabling Application Validation). В этой системе обеспечена интеграция европейской системы управления движением поездов ETCS/ERTMS (European Train Control System) с системой спутниковой навигации Galileo и общедоступными сетями радиосвязи. Применение этих технологий позволяет существенно снизить стоимость внедрения ETCS на линиях с низкой интенсивностью движения поездов.

Спутниковая навигация в этой системе используется для определения местоположения поездов вместо путевых приемопередатчиков, формируя виртуальные приемопередатчики с интервалом 50 м. В проекте используются виртуальные бализы и спутниковая связь без установки путевых бализ и напольных сигналов [10].

Однако системы спутниковой навигации не обеспечивают пока требуемой точности контроля границ подвижного состава на станциях.

Контроль свободности участков пути обеспечивают также счетчики осей. Они заняли определенную нишу в выполнении этой функции на магистральных и промышленных железных дорогах, но пока существенно не потеснили РЦ [11].

На магистральных железных дорогах России, стран постсоветского пространства и развитых стран мира продолжается широкое использование РЦ для контроля свободности от подвижного состава участков пути и контроля излома рельсов. Например, на железных дорогах Германии РЦ используются для контроля участков пути примерно в половине действу-

ющих систем железнодорожной автоматики и телемеханики [12]. Используются они на железных дорогах и США [13], и, в соответствии с отчетами Железнодорожного научно-исследовательского института RTRI (Railway Technical Research Institute), в Японии [14].

Таким образом, в обозримом будущем РЦ останутся одним из основных технических средств контроля свободности участков пути в системах интервального регулирования движения поездов, что требует разработки способов повышения их надежности, помехозащищенности и совершенствования методов их технического обслуживания.

2. Источники помех, воздействующих на рельсовые цепи

Сигнальные токи РЦ величиной несколько ампер передаются от источника сигналов (путевого генератора) к путевому или локомотивному приемнику по рельсовым линиям. Эти линии используются как специфические электрические воздушные линии связи, которые подвержены температурным, механическим, электрическим и электромагнитным воздействиям, изменяющим условия передачи сигнальных токов.

Источниками помех на РЦ могут быть смежные РЦ, линии электропередач, устройства электропитания, радиочастотные электромагнитные поля, электростатические разряды, разряды молний, контактная и рельсовая линии тягового электроснабжения,

На электрифицированных железных дорогах по рельсовым линиям на тяговые подстанции текут тяговые токи электровозов, величина которых в каждой рельсовой нити может превышать при электротяге постоянного тока 1000 А, а при электротяге переменного тока – 500 А, что существенно усложняет электромагнитную обстановку для РЦ. В результате на таких участках сбоев в работе РЦ происходит в десятки раз больше, чем на участках с автономной тягой. На участках с электротягой переменного тока сбоев в работе этой аппаратуры фиксируется в среднем 1,5 раза больше, чем на участках с электротягой постоянного тока.

В РЦ с дроссель-трансформаторами (ДТ) секции их основных обмоток включены встречно. Поэтому ЭДС помех, наводимых в дополнительной обмотке ДТ, при одинаковой величине тяговых токов в ее секциях равны по величине и направлены встречно. В результате в таких случаях помех от тяговых токов на входах путевых приемников РЦ нет.

Если величины продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовой линии в пределах РЦ становятся неодинаковыми, величины тяговых токов в рельсовых нитях различаются в местах подключения к рельсам путевых приемников РЦ и на входах этих приемников появляются помехи.

Уровни и гармонический состав помех изменяются во времени случайным образом, а нарушения нормальной работы приемников РЦ (сбои)

от их действия обычно непродолжительны. Эти сбои (самовосстанавливающиеся отказы) отрицательно влияют на бесперебойность и безопасность движения поездов. Кратковременность превышения уровнями и гармоническим составом помех допускаемых пределов, а также многочисленность причин изменения во времени этих параметров существенно усложняет выявление и устранение причин появления сбоев.

Неустойчивая работа аппаратуры РЦ вызывает ложную смену показаний напольных светофоров на более запрещающее показание. В результате поезда ложно уменьшают скорость движения, отчего уменьшается пропускная способность участков железных дорог.

Перекрытие показаний путевого светофора перед движущимся поездом вызывает автостопное торможение. Пассажиры в таких случаях испытывают дискомфорт и могут получать травмы различной тяжести от падений. В грузовом движении на колесах появляются «ползуны», а при неудачном формировании поезда легкие вагоны могут выдавливаться из него. В таких случаях ухудшается и безопасность движения.

Помехозащищенность аппаратуры РЦ от мешающего влияния тяговых токов обеспечивают разделением сигнальных и тяговых токов по частоте, кодированием сигнальных токов, а также использованием электрических фильтров и различных схемных решений [1, 3]. Достоверное выяснение причин возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии и исследование процессов ее влияния на величину и гармонический состав помех обеспечивает разработку эффективных средств защиты от них.

3. Пути растекания тяговых токов по рельсовой цепи

Рельсовые линии в рельсовой сети электрифицированных железных дорог используются для пропуска тяговых и сигнальных токов по рельсовым нитям, включающим в себя рельсы, соединители на их стыках, а также различные тяговые соединители. В обход изолирующих стыков, ограничивающих РЦ, тяговый ток пропускается через ДТ.

Схема замещения неразветвленной РЦ, оборудованной ДТ, со всеми возможными путями протекания по ее элементам тягового тока показана на рис. 1. Каждая рельсовая нить представлена в виде трехполюсника.

На схеме приняты следующие условные обозначения: $Z_{рн1}$, $Z_{рн2}$ – распределенные по длине РЦ сопротивления первой и второй рельсовых нитей; $R_{рз1}$, $R_{рз2}$ – распределенные по длине РЦ сопротивления рельсов по отношению к земле в первой и второй рельсовых нитях; R_0 – распределенные по длине РЦ входные сопротивления подключаемых к рельсам цепей заземления опор контактной сети; $Z_{дт}$ – сопротивления основных обмоток ДТ; $Z_{п1н}$, $Z_{п1к}$, $Z_{п2н}$, $Z_{п2к}$ – сопротивления дроссельных перемычек в

начале и в конце РЦ соответственно в первой и второй рельсовых нитях; $R_{ис1}, R_{ис2}, R_{ис3}, R_{ис4}$ – сопротивления изолирующих стыков, ограничивающих РЦ; $Z_{вхТ1}, Z_{вхТ2}$ – входные сопротивления соответственно первой и второй рельсовых нитей для тягового тока; $Z_{п1}, Z_{п2}, Z_{п3}, Z_{п4}$ – сопротивления дроссельных перемычек в смежных РЦ; M_{12} – взаимная индуктивность между рельсовыми нитями РЦ; $\dot{I}_{тн}, \dot{I}_{тк}$ – тяговые токи, втекающие в РЦ и вытекающие из нее; $\dot{I}_{тн1}, \dot{I}_{тк1}, \dot{I}_{тн2}, \dot{I}_{тк2}$ – тяговые токи в начале и в конце соответственно первой и второй рельсовых нитей; $\dot{I}'_{Т1}, \dot{I}''_{Т1}$ – тяговые токи в рельсах в начале и в конце трехполюсника, замещающего первую рельсовую нить; $\dot{I}'_{Т2}, \dot{I}''_{Т2}$ – тяговые токи в рельсах в начале и в конце трехполюсника, замещающего вторую рельсовую нить; $\dot{I}_{трз}$ – тяговый ток, утекающий из рельсов в землю; $\dot{I}_{ис1}, \dot{I}_{ис}, \dot{I}_{ис3}, \dot{I}_{ис4}$ – тяговые токи соответственно в первом, втором, третьем и четвертом изолирующих стыках; $\dot{I}_{ТПр1}, \dot{I}_{ТПр2}, \dot{I}_{ТПр2}, \dot{I}_{ТПр2}$ – тяговые токи в рельсовых нитях смежных РЦ.

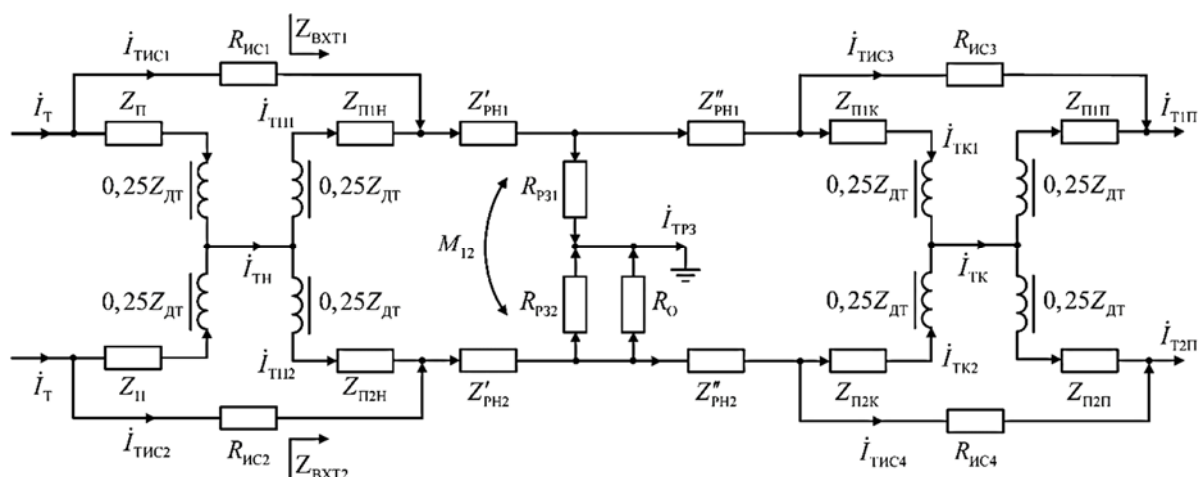


Рис. 1. Схема растекания тягового тока по неразветвленной РЦ

Продольные сопротивления рельсовых нитей могут изменяться по их длине. В таких случаях $Z'_{рн} \neq Z''_{рн}$.

Расчеты показывают, что при замещении рельсовой нити Т-образным трехполюсником можно не учитывать с погрешностью 5 % распределенность ее продольного и поперечного сопротивления на частоте 50 Гц до длины, равной 0,4 км [15]. С ростом частоты гармоники тягового тока эта длина уменьшается. Поэтому при повышении частоты гармоники и/или длины РЦ в схеме замещения каждая рельсовая нить представляется последовательным соединением Т-образных схем.

Разность величин тяговых токов в рельсовых нитях в определенной точке рельсовой линии $\dot{I}_{Al}(x) = \dot{I}_{T1}(x) - \dot{I}_{T2}(x)$, где $\dot{I}_{T1}(x)$ и $\dot{I}_{T2}(x)$ – тяговые токи в соответствующей точке x первой и второй рельсовых нитей, называют асимметрией тягового тока.

Относительную величину этого параметра количественно оценивают коэффициентом асимметрии тягового тока

$$k_{Al}(x) = \frac{\dot{I}_{T1}(x) - \dot{I}_{T2}(x)}{\dot{I}_{T1}(x) + \dot{I}_{T2}(x)}. \quad (1)$$

Для РЦ интересна асимметрия тягового тока на ее концах, где к рельсам подключается передающая или приемная аппаратура.

При электротяге постоянного тока утечку тягового тока из рельсов в землю минимизируют из-за его коррозионного действия на подземные сооружения увеличением сопротивления между рельсовыми линиями и землей [16].

В тяговых сетях переменного тока удельное сопротивление рельсов по отношению к земле меняется от минимальной величины, равной 0,5 Ом/км, до максимально возможного его значения 18,0 Ом/км [17]. Для переменного тягового тока частотой 50 Гц сопротивление рельсов примерно в 4 раза больше, чем для тягового постоянного тока. Эта разница увеличивается с ростом частоты гармоники тягового тока.

Продольное сопротивление рельсовых нитей с течением времени увеличивается вследствие роста электрического сопротивления элементов в стыках рельсовых звеньев. Несимметричное изменение продольных сопротивлений Z_{pn1} и Z_{pn2} является одной из основных причин появления асимметрии тягового тока.

Переменный тяговый ток активно стекает в землю так, что при талом грунте в рельсах остается примерно 10 % тягового тока электровоза на расстоянии 4–5 км от него. И чем больше продольное сопротивление рельсовой нити Z_{pn1} или Z_{pn2} , тем сильнее тяговый ток стекает из нее в землю при том же сопротивлении рельсов по отношению к земле соответственно R_{pz1} или R_{pz2} , что увеличивает влияние асимметрии поперечных сопротивлений рельсовой линии на величину асимметрии тягового тока в ней.

В цепях заземления опор контактной сети, подключаемых к рельсам, для увеличения их сопротивлений R_0 устанавливаются искровые промежутки ИПМ-56М [18]. Надежность их относительно невысока, а проверка их состояния трудоемка [19]. Практически проверку состояния искровых промежутков проводят обычно только на участках, где растет интенсивность сбоев РЦ и/или автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). Поэтому данные цепи заземления могут быть в течение достаточно долго-

го времени дополнительными цепями утечки тягового тока из рельсов в землю, увеличивая его асимметрию.

Изолирующие стыки относятся к самым ненадежным элементам из элементов РЦ [20]. При ухудшении их электроизолирующих свойств тяговый ток через них растет. Несимметричное уменьшение сопротивления изолирующих стыков $R_{ис1}$ и $R_{ис2}$ или $R_{ис3}$ и $R_{ис4}$ вызывает изменение асимметрии тягового тока в рельсовой линии.

Разветвленные РЦ могут быть оборудованными несколькими ДТ [21], поэтому схема растекания тяговых токов в них сложнее. В зоне подключения к рельсовой тяговой сети отсасывающих линий тяговых подстанций тяговый ток может втекать из земли в рельсовые нити [22].

Устойчивость работы и РЦ, и АЛС определяется соотношением «сигнал:помеха» на входе их приемников. При уменьшении сопротивлений рельсов по отношению к земле $R_{рз1}$ и $R_{рз2}$ растет утечка сигнального тока по длине рельсовой линии и уменьшается его величина на входе путевого приемника и в рельсах под приемными катушками АЛС. Увеличение продольного сопротивления рельсовых нитей приводит к росту падения сигнального напряжения на них, что также ухудшает соотношение «сигнал:помеха» на входе приемников. В результате приемники становятся более чувствительными к помехам.

3. Первопричина возникновения асимметрии тягового тока

Несимметричное увеличение в рельсовых нитях сопротивлений токопроводящих, изолирующих стыков и/или дроссельных перемычек вызывает продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии.

Поперечная асимметрия сопротивления рельсовой линии возникает при несимметричности изменения сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле. Появляется она обычно при отказах в цепях заземления опор контактной сети и других конструкций, подключаемых к внешней рельсовой нити как к распределенному заземлителю. В рельсовых линиях с железобетонными шпалами поперечная асимметрия может быть также следствием несимметричного уменьшения электрического сопротивления изолирующих элементов шпал.

При анализе особенностей протекания тяговых токов по рельсовой линии рельсовые нити рассматриваются как две однопроводные электрические линии рельсы – земля, которые обладают взаимной индуктивностью, вызываемой их внешней индуктивностью [23–25]. Удельное сопротивление взаимной индуктивности этих линий $z_M = j\omega M_{12}$, где M_{12} – величина взаимной индуктивности рельсовых нитей, ω – частота тягового тока или его соответствующей гармоники.

Для стационарных РЦ наиболее характерна продольная асимметрия сопротивлений рельсовых нитей, поэтому в первом приближении поперечную асимметрию можно не учитывать. В перегонных РЦ с поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей можно не считаться при замерзшем балласте и отсутствии цепей заземления на рельсы опор контактной сети.

В таких случаях распределение падения напряжения $\dot{U}_{T1}$ и $\dot{U}_{T2}$ по элементам рельсовых нитей рельсовой линии длиной l , в которых протекают тяговые токи соответственно $\dot{I}_{T1}$ и $\dot{I}_{T2}$,

$$\dot{U}_{T1} = \dot{I}_{T1} z_{P1} l + \dot{I}_{T2} z_M l + \dot{I}_{T1} n z_{дт}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{T2} = \dot{I}_{T2} z_{P2} l + \dot{I}_{T1} z_M l + \dot{I}_{T2} n z_{дт}, \quad (3)$$

где z_{P1} , z_{P2} – удельные сопротивления рельсов с учетом сопротивлений рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2, z_M – удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсов в рельсовых нитях как однопроводных линий при протекании по ним тяговых токов, $z_{дт}$ – сопротивление секции основной обмотки ДТ для тягового тока, n – коэффициент, принимаемый равным единице при анализе рассматриваемых помех в аппаратуре АЛС и равным количеству ДТ в РЦ – при анализе помех в ее аппаратуре.

При анализе помех в РЦ за длину l принимается полная ее длина, а при исследовании помех под катушками АЛС – это длина от первой колесной пары головного локомотива до места подключения к рельсам передатчика сигнальных токов.

Уравнения (2) и (3) справедливы при отсутствии асимметрии тягового тока в рельсовой линии, т. е. когда $\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{T2}$. Если это равенство не выполняется и, например, $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$, то эти уравнения можно записать в следующем виде [26]:

$$\dot{U}_{T1} = \dot{I}_{T1} \left(z_{P1} l + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M l + n z_{дт} \right); \quad (4)$$

$$\dot{U}_{T2} = \dot{I}_{T2} \left(z_{P2} l + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M l + n z_{дт} \right). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) удельные сопротивления рельсовых нитей в рассматриваемых условиях при наличии асимметрии тягового тока

$$\frac{\dot{U}_{T1}}{\dot{I}_{T1}l} = z_{ph1} = z_{P1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M + n z_{dT} / l; \quad (6)$$

$$\frac{\dot{U}_{T2}}{\dot{I}_{T2}l} = z_{ph2} = z_{P2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M + n z_{dT} / l. \quad (7)$$

Сопротивления рельсовых нитей зависят от частоты тока ω , протекающего по ним. С учетом этого формулы (6) и (7) можно записать в следующем виде:

$$z_{ph1} = r_{P1} + j\omega L_{P1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} j\omega M_{12} + nj\omega L_{dT} / l; \quad (8)$$

$$z_{ph2} = r_{P2} + j\omega L_{P2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} j\omega M_{12} + nj\omega L_{dT} / l, \quad (9)$$

где r_{P1}, r_{P2} – суммарные удельные активные сопротивления рельсов с учетом сопротивлений рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2; L_{P1}, L_{P2} – удельные индуктивности рельсов с учетом индуктивностей рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2; L_{dT} – индуктивность секции основной обмотки ДТ.

Из уравнений (8) и (9) видно, что с ростом частоты тока в рельсовой линии все члены этих уравнений, кроме первых, растут пропорционально частоте тока. Это необходимо учитывать при анализе уровней помех, создаваемых разными гармониками тяговых токов.

4. Влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей на асимметрию тягового тока

Как видно из формул (6) и (7), на продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии влияет не только асимметрия удельных сопротивлений рельсов и рельсовых стыковых соединителей сопротивлений рельсовых нитей, но и возникающая асимметрия взаимной индуктивности рельсовых нитей. В случаях, когда контролируемым (выходным) параметром рельсовой линии как объекта контроля является асимметрия тягового тока, необходимо учитывать, что рельсовая линия обладает своеобразной положительной обратной связью, создаваемой взаимной индуктивностью рельсовых нитей [26].

Для более четкого разделения составляющих асимметрии тягового тока в рельсовой линии по факторам, ее вызывающим, введем понятие дей-

ствующего удельного сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей, обозначив его z'_M . Из формул (6) и (7) для рельсовых нитей 1 и 2 при $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$

$$z'_{M1} = \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M; \quad z'_{M2} = \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M. \quad (10)$$

Введем также следующие термины: коэффициент асимметрии удельных сопротивлений рельсов в рельсовых нитях k_{AP} и коэффициент асимметрии действующих удельных сопротивлений от взаимной индуктивности рельсовых нитей k_{AM} . Тогда с учетом принятого соотношения тяговых токов в рельсовых нитях $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$

$$k_{AP} = \frac{z_{P2} - z_{P1}}{z_{P1} + z_{P2}}, \quad k_{AM} = \frac{z'_{M2} - z'_{M1}}{z'_M + z'_{M2}} = \frac{2k_{AI}}{1 + k_{AI}^2}. \quad (11)$$

В пределах РЦ или отрезков рельсовых линий от первой колесной пары головного электровоза до конца РЦ падение тягового напряжения на рельсовых нитях $\dot{U}_{T1} = \dot{U}_{T2}$. Следовательно, $\dot{I}_{T1} z_{PH1} = \dot{I}_{T2} z_{PH2}$. Отсюда $\dot{I}_{T1} / \dot{I}_{T2} = z_{PH2} / z_{PH1}$ и $k_{AI} = k_{AP}$. Таким образом, тяговые токи в рельсовых нитях в общем случае обратно пропорциональны входным сопротивлениям рельсовых нитей в РЦ или входным сопротивлениям отрезков рельсовых нитей, лежащих впереди головного электровоза поезда.

На рис. 2 показаны найденные зависимости соотношения k_{AM} / k_{AP} от абсолютного значения удельного сопротивления рельсов $|z_P|$ при разных значениях коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} в рельсовой линии. Видно, что при малых значениях удельного сопротивления рельсов асимметрия тягового тока формируется в основном под действием асимметрии сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей. Рост удельного сопротивления рельсов и увеличение асимметрии тягового тока вызывают уменьшение влияния асимметрии взаимной индуктивности рельсов на величину асимметрии тягового тока.

При низких температурах окружающей среды и невысоких значениях тягового тока в рельсах асимметрия сопротивления рельсовых нитей k_{AP} является причиной появления не более 20 % асимметрии тягового тока в рельсовой линии, измеряемой относительной величиной – коэффициентом асимметрии тягового тока k_{AI} .

С ростом температуры и/или величины тягового тока влияние асимметрии сопротивления рельсовых нитей на асимметрию тягового тока рас-

тет. При движении тяжеловесных поездов, когда температура окружающей среды составляет около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, асимметрией сопротивления рельсовых нитей вызывается рост коэффициента асимметрии тягового тока до 30 %.

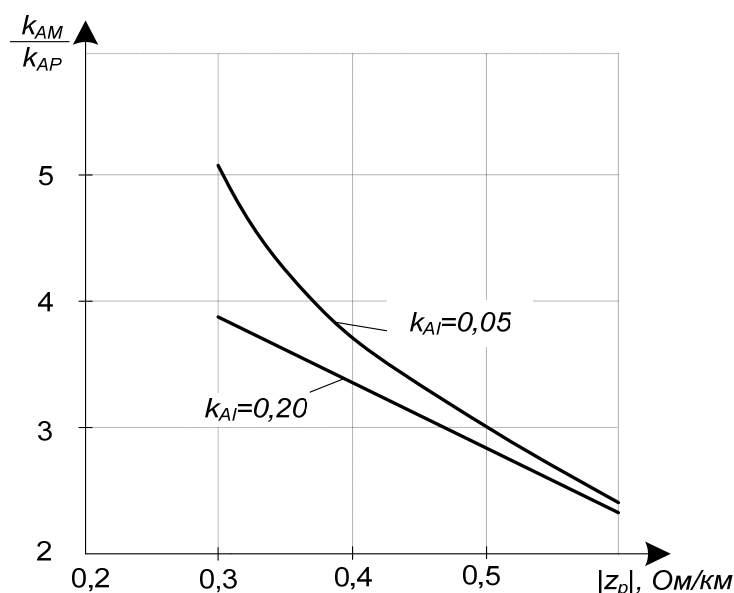


Рис. 2. Влияние величины сопротивления рельсов на зависимость асимметрии тягового тока от асимметрии взаимной индуктивности рельсов

Рассмотрим случай, когда поперечная асимметрия отсутствует и в рассматриваемый момент времени t тяговый ток в первой рельсовой нити $\dot{I}_{T1}$ больше тягового тока во второй рельсовой нити $\dot{I}_{T2}$, т. е. соотношения сопротивления рельсовых нитей $z_{pn2} > z_{pn1}$, а сопротивления рассматриваемых переходов $r_{n2} > r_{n1}$. Тогда выражения для вычисления удельных сопротивлений рельсовых нитей с учетом [6] и формул (6), (7) можно записать в следующем виде:

$$z_{pn1} = z_{pn}(0) + r_{n1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M; \quad (12)$$

$$z_{pn2} = z_{pn}(0) + r_{n2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M, \quad (13)$$

где $z_{pn}(0)$ — удельное расчетное сопротивление рельсовой нити в начальный момент времени сразу после проведения капитального ремонта пути.

Из формул (12) и (13) выражение для вычисления коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рассматриваемый момент времени

$$k_{AZ} = \frac{z_{pH2} - z_{pH1}}{z_{pH2} + z_{pH1}} = \frac{r_{n2} - r_{n1} + 4 \frac{k_{AI}}{1 - k_{AI}^2} z_M}{2z_{pH}(0) + r_{n2} + r_{n1} + 2 \frac{1 + k_{AI}^2}{1 - k_{AI}^2} z_M}. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовых линиях обладает своеобразной положительной обратной связью. Действительно, асимметрия сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ} вызывает появление асимметрии тягового тока k_{AI} . Но величина асимметрии тягового тока влияет в свою очередь на величину асимметрии сопротивления рельсовых нитей. Вызвано это действием взаимной индуктивности рельсовых нитей.

Таким образом, процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии можно представить в виде системы с положительной обратной связью, схема которой показана на рис. 3.

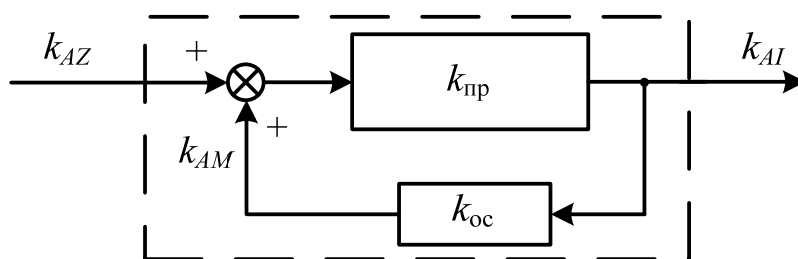


Рис. 3. Модель процесса формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии

Коэффициент передачи у этого процесса k_{IZ} по каналу *коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей – коэффициент асимметрии тягового тока* можно найти по формуле

$$k_{IZ} = \frac{k_{AI}}{k_{AZ}} = \frac{k_{пр}}{1 - k_{ос} k_{пр}}, \quad (15)$$

где $k_{пр} = k_{AI} / (k_{AZ} + k_{AM})$ – коэффициент передачи в прямом канале; $k_{ос} = k_{AM} / k_{AI}$ – коэффициент обратной связи.

Проведенные исследования показали, что в рельсовой линии с рельсами типа Р65 при токе частотой 50 Гц коэффициент обратной связи в системе мало зависит от электрических параметров рельсовых нитей и его среднее значение $k_{ос} = 1,96$. Коэффициент передачи в прямом канале $k_{пр}$ является функцией сопротивления рельсов. Величина этого коэффициента

изменяется в диапазоне от 0,423 до 0,357 при изменении удельного сопротивления рельсов в диапазоне от 0,3 до 0,6 Ом/км [27].

При отсутствии утечки тяговых токов из рельсов в землю тяговые токи распределяются по рельсовым нитям РЦ обратно пропорционально их сопротивлениям. Асимметрия тягового тока под катушками АЛС вызывается разницей тяговых токов, утекающих вперед от головного электровоза поезда, поэтому значения этих токов обратно пропорциональны величинам входных для них сопротивлений лежащих впереди отрезков рельсовых нитей.

Следовательно, коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в обоих рассматриваемых случаях в определенный момент времени рассчитывается по формуле $k_{AZ} = \left| (z_{рн1} - z_{рн2}) / (z_{рн1} + z_{рн2}) \right|$. Поэтому для данных случаев при $r_{п2} > r_{п1}$ можно записать:

$$k_{AI} = \frac{r_{п2} - r_{п1} + 4 \frac{k_{AI}}{1 - k_{AI}^2} z_M}{2z_{рн}(0) + r_{п2} + r_{п1} + 2 \frac{1 + k_{AI}^2}{1 - k_{AI}^2} z_M}. \quad (16)$$

Уравнение для вычисления коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовой линии в требуемый момент времени для рассматриваемых случаев с учетом формулы (16)

$$a_3 k_{AI}^3 + a_2 k_{AI}^2 - a_1 k_{AI} - a_0 = 0, \quad (17)$$

где $a_3 = a_1 = 2z_M - 2z_{рн}(0) - r_{п2} - r_{п1}$; $a_2 = a_0 = r_{п2} - r_{п1}$.

Представляется интересным исследование вклада взаимной индуктивности рельсовых нитей в величину асимметрии тягового тока. На рис. 4 показаны графики найденных зависимостей отношения асимметрии тягового тока в рельсовой линии k_{AI} к величине продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в ней k_{AZ} от величины модуля их расчетного удельного сопротивления $z_{рн}$. Поскольку процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии обладает обратной связью (см. рис. 1), исследования проводились при разных значениях коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} .

Из графиков на рис. 4 видно, что за счет действия внешней индуктивности рельсов асимметрия тягового тока в рельсовых линиях может возрасти в 2,5 раза. С ростом удельного сопротивления рельсовых нитей и с увеличением коэффициента асимметрии тягового тока влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей на величину асимметрии тягового тока ослабляется.

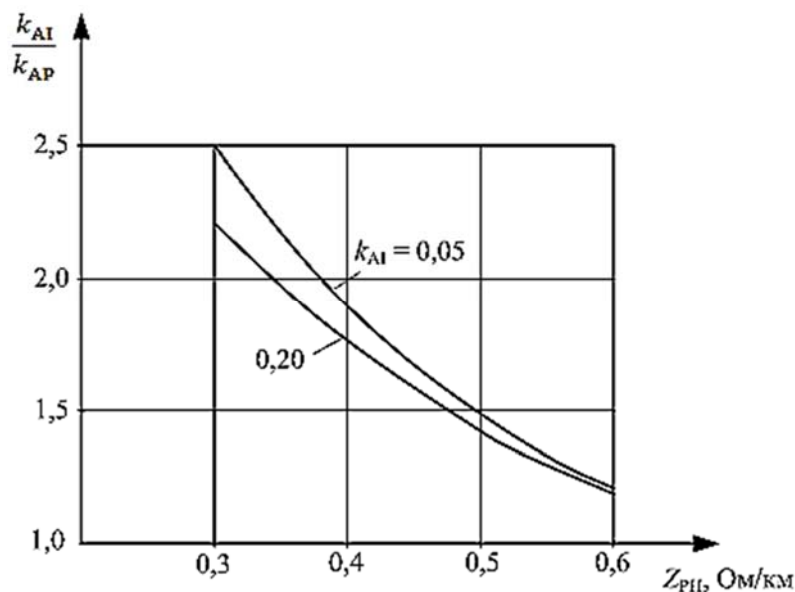


Рис. 4. Зависимость степени действия внешней индуктивности рельсов на асимметрию тягового тока от величины удельного сопротивления рельсовых нитей

Первое определяется тем, что с ростом удельного электрического сопротивления эксплуатируемых рельсовых нитей $z_{pn}(0)$ растет его численное значение в знаменателе формулы (16) при неизменном численном значении соотношения $(r_{n2} - r_{n1}) / (r_{n2} + r_{n1})$. Второе вызвано тем, что с ростом коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} уменьшается в определенной степени действие положительной обратной связи.

При исследовании распределения асимметрии тягового тока по длине РЦ следует учитывать, что если есть утечка тяговых токов из рельсов в землю, то коэффициент асимметрии тягового тока изменяется по длине рельсовой линии. Поэтому вычисление в таких условиях коэффициента асимметрии тягового тока на выходном для этого тока конце рельсовой линии в месте установки аппаратуры РЦ представляет более сложную задачу.

Таким образом, первопричиной возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии является появление продольной и/или поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Действие взаимной индуктивности рельсовых нитей усиливает этот процесс, и при наличии только продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии может привести к увеличению коэффициента асимметрии тягового тока в 1,2–2,5 раза в зависимости от величины текущего значения сопротивлений рельсовых нитей.

С ростом сопротивления рельсов влияние асимметрии сопротивлений рельсовых нитей на асимметрию тягового тока уменьшается. Поэтому увеличение тягового тока в рельсах при движении тяжеловесных поездов и в

районах тяговых подстанций не приводит к пропорциональному росту количества сбоев в работе РЦ и АЛС.

Полученные результаты обеспечивают возможность разработки технических мер, обеспечивающих снижение уровня помех на РЦ и АЛС, создаваемых тяговыми токами в рельсах.

5. Влияние взаимных индуктивностей с другими электрическими линиями

Магнитные связи рельсовых нитей с рельсовыми нитями других РЦ, с контактными проводами и высоковольтными линиями электроснабжения обусловлены влиянием магнитных полей. Конечно, взаимные влияния вызываются в действительности действием единого электромагнитного поля, а такое раздельное рассмотрение действия только магнитного поля используется только из соображений удобства исследования.

Магнитная связь определяется отношением электродвижущей силы, наведенной в соответствующей точке рельсовой нити, к току во влияющей цепи с обратным знаком. Магнитные связи содержат активную и реактивную составляющие. Активная составляющая магнитных связей на рассматриваемых частотах в тяговой рельсовой сети по аналогии с воздушными линиями связи находится в диапазоне до десяти миллиомов [28]. Поэтому данные связи можно считать чисто индуктивными.

Рассмотрим магнитные связи для рельсовых нитей РЦ двухпутного перегона на участке с электротягой переменного тока. РЦ длиной $l_{\text{РЦ}}$ ограничены изолирующими стыками с ДТ. На рис. 5 для такого случая показаны взаимные индуктивности между рельсовыми нитями, контактными проводами и линиями продольного электроснабжения (ЛЭП), размещенными на опорах контактной сети [29]. Там же показано распределение тяговых токов по этим элементам. Рельсовые линии и контактные провода нумеруются слева направо.

Сопротивления рельсовых нитей Z_{1x} , Z_{2x} , Z_{3x} и Z_{4x} включают в себя продольные и поперечные электрические сопротивления, которые в общем случае не остаются неизменными по длине x рельсовых линий. Продольные сопротивления РН включают в себя сопротивления сплошных рельсов, стыковых соединителей, дроссельных перемычек и секций основных обмоток ДТ. Причинами изменения во времени продольных сопротивлений РН являются повреждения и старение стыковых соединителей и дроссельных перемычек.

Поперечные сопротивления рельсовой линии включают в себя сопротивления шпал и поверхностного слоя балласта R_{12x} , R_{34x} , сопротивления рельсов по отношению к земле R_{13x} , R_{23x} , R_{33x} , R_{43x} и входные сопротивления цепей заземления опор контактной сети R_{10x} , R_{40x} . Для уменьшения

потерь мощности в рельсовой тяговой сети и выравнивания тяговых токов в рельсовых линиях вдоль перегона устанавливаются междупутные перемычки, не показанные на рис. 5.

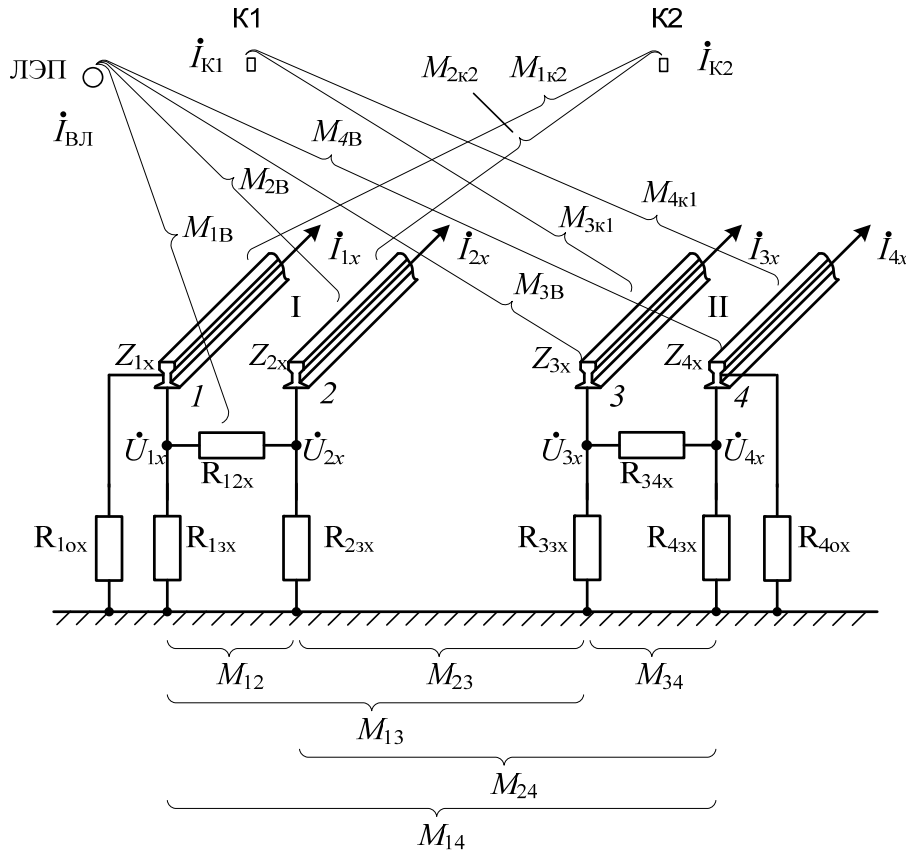


Рис. 5. Электрические и магнитные параметры рельсовых линий двухпутного электрифицированного участка железной дороги

Величины сопротивлений R_{12x} и R_{34x} изменяются при ухудшении состояния электроизолирующих элементов железобетонных шпал или при увлажнении поверхности загрязненных деревянных шпал. Величины сопротивлений R_{13x} , R_{23x} , R_{33x} и R_{43x} зависят от состояния балласта. Величины сопротивлений R_{10x} и R_{40x} уменьшаются при ухудшении состояния электроизолирующих элементов в цепях заземления опор контактной сети.

Величины тяговых токов в рельсовых нитях i_{1x} , i_{2x} , i_{3x} и i_{4x} изменяются по длине РН, если меняется интенсивность стекания тяговых токов из рельсов в землю. Происходит это при изменении соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений РН ее длине. Тяговые токи в контактных проводах К1 и К2 обозначены i_{K1} и i_{K2} , а ток в линии продольного электроснабжения ЛЭП обозначен $i_{ВЛ}$. Все эти токи изменяются во времени.

Взаимные индуктивности обозначены: между рельсовыми нитями своего и соседнего путей $M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{13}, M_{14}, M_{34}$; между РН и контактными проводами соседних путей $M_{1К2}, M_{2К2}, M_{3К1}, M_{4К1}$; между соответствующими РН и проводами ЛЭП $M_{1В}, M_{2В}, M_{3В}, M_{4В}$. Симметричные взаимные индуктивности между контактными проводами $M_{1К1}, M_{2К1}$ и РН собственных рельсовых линий $M_{3К2}, M_{4К2}$ на рис. 5 не показаны, чтобы не загромождать схему.

Если пренебречь радиусами эквивалентных проводов, равных периметру сечения рельсов, контактных проводов или проводов ЛЭП ввиду их относительной малости по сравнению с учитываемыми расстояниями, то удельные взаимные индуктивности между электрическими линиями можно вычислять с учетом [25] по формуле, Гн/км,

$$M_{12} = \left[1 + 2 \ln \frac{2}{1,78 l_{ij} \sqrt{4\pi\sigma f}} - j \frac{\pi}{2} \right] \cdot 10^{-4},$$

где f – частота соответствующей гармоники тягового тока; l_{ij} – расстояние между осями i -й влияющей и j -й электрическими линиями, обладающими взаимной индуктивностью; σ – удельная проводимость земли, См/м.

Величина удельной взаимной индуктивности между электрическими линиями обратно пропорциональна расстоянию между ними. Однако темп уменьшения этой индуктивности заметно меньше темпа увеличения рассматриваемого расстояния.

Например, на частоте тягового тока 50 Гц при расстоянии между рельсовыми нитями с рельсами типа Р50, равном 1,52 м, величина удельной взаимной индуктивности РН равна $1,35 e^{-j\tau^\circ}$ мГн/км [8]. При высоте подвески контактного провода над верхом головки рельса 6,55 м удельная взаимная индуктивность контактного провода и рельсовой нити в тех же условиях составляет $1,07 e^{-j9^\circ}$ мГн/км [23]. Следовательно, при увеличении расстояния между однопроводными электрическими линиями в 4,31 раза взаимная индуктивность между ними на частоте 50 Гц уменьшается только в 1,26 раза.

Удельные сопротивления взаимной индуктивности i -й и j -й электрических линий $z_{Mij} = j\omega M_{ij}$, где ω – частота соответствующей гармоники тягового тока. Расстояния между РН соседних путей и от контактных проводов и ЛЭП до каждой из РН соответствующей рельсовой линии различны. Поэтому различны и соответствующие удельные сопротивления взаимной индуктивности $z_{M13} \neq z_{M14}, z_{M23} \neq z_{M24}, z_{M1К2} \neq z_{2К2}, z_{M1В} \neq z_{M2В}, z_{M3К1} \neq z_{M4К1}, z_{M3В} \neq z_{M4В}$.

Взаимные индуктивности рельсовых нитей конкретной РЦ с другими электрическими линиями могут как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в рассматриваемой РЦ. Это зависит от соотношения величин тягового тока во влияющей линии и подверженных влиянию рельсовых нитей, а также от соотношения расстояний между ними.

6. Влияние гармонического состава тягового тока на рельсовые цепи

Форма сигнального тока может существенно искажаться от действия помех [3]. Гармонический состав помех от тягового тока может существенно влиять на устойчивость работы РЦ и АЛС.

Искажения синусоидальности кривой напряжения (тока) в соответствии с ГОСТ [30] характеризуются коэффициентом этих искажений, равным отношению действующего значения суммы гармонических составляющих к действующему значению основной составляющей переменного напряжения. Другим показателем служит коэффициент нелинейных искажений, определяющий вес высших гармоник переменного напряжения по отношению к напряжению основной гармоники.

Чем меньше коэффициент нелинейных искажений, тем ближе форма кривой напряжения к чистой синусоиде. Если коэффициент нелинейных искажений меньше 3 %, то искажения почти незаметны.

Для электроподвижного состава в качестве показателя степени этого искажения используют коэффициент гармонической составляющей тока, вычисляемый как отношение действительного значения n -й гармонической составляющей тягового тока к действительному значению первой гармонической составляющей тягового тока одной секции электровоза или одиночного электровоза [24].

При электротяге переменного тока в тяговом токе обычно присутствуют нечетные гармоники частоты 50 Гц. На участках с электротягой постоянного тока в тяговом токе появляются четные гармоники этой частоты от пульсаций выпрямленного тока и при нарушениях нормальной работы выпрямительных установок на тяговой подстанции [31].

Степень искажения формы тягового тока зависит от серии электровоза, степени нагрузки на него, количества электровозов в зоне между тяговыми подстанциями [24, 32]. Если на электровозах в качестве тяговых используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при частотном регулировании их скорости вращения, то в тяговом токе может присутствовать весь спектр рабочих частот РЦ и АЛС [33].

Насыщения сердечников ДТ при больших токах асимметрии также вызывают искажения формы кривой сигнального тока или напряжения [15].

На рис. 6 показано, как изменялась форма напряжения на дополнительной обмотке ДТ в фазочувствительной РЦ с реле типа ДСШ-13 при

приближении поезда к горловине станции Половина Восточно-Сибирской железной дороги, электрифицированной на переменном токе. В этой горловине расположена тяговая подстанция, сбои в работе РЦ были относительно часты.

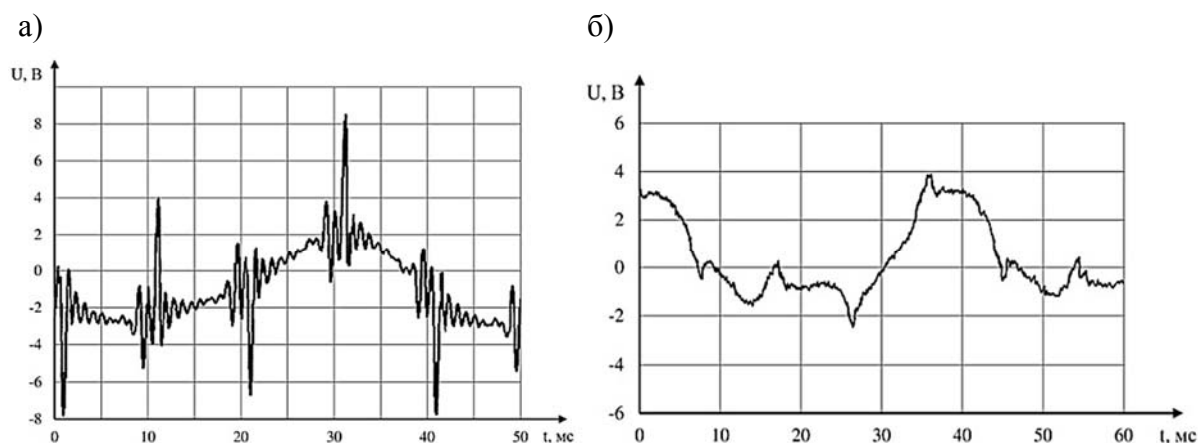


Рис. 6. Напряжения на дополнительной обмотке ДТ

Изменения режимов работы тяговых двигателей на приближающемся электровозе и одновременные изменения поездной ситуации в зонах между тяговыми подстанциями существенно влияли на степень искажения синусоидальности кривой сигнального напряжения. Например, в записанной цифровым осциллографом кривой напряжения на рис. 6,а видны импульсы с частотой 450 Гц. На рис. 6,б основное искажение синусоидальности сигнального тока происходит из-за первой гармоники тягового тока.

Используемые в таких РЦ защитные блоки типа ЗБ-ДСШ эффективны только для ослабления тока помехи частотой 50 Гц через путевую обмотку реле ДСШ. Поэтому помехи, содержащие в своем составе достаточно большие токи других гармоник тягового тока, вызывают ложное отпадение секторов этих реле [1].

Тональные РЦ наименее чувствительны к помехам. Однако на перевальном участке через Северобайкальский хребет фиксировались сбои в работе и этих РЦ при движении тяжеловесных поездов [3]. На рис. 7 приведен фрагмент записи сигнального напряжения с частотой 480 Гц и частотой модуляции 8 Гц на входе путевого приемника ППЗ. Осциллограмма на рис. 7,а записана при величине переменного тягового тока в рельсах 57 А и его асимметрии в месте подключения путевого приемника 2,8 А. На рис. 7,б приведена осциллограмма, записанная при движении тяжеловесного поезда, когда ток в рельсовой линии был 473 А, а ток асимметрии составлял 20,0 А.

Уровень помех от тягового тока, соответствующий их амплитудам в интервалах между импульсами сигнального тока, в обоих случаях примерно одинаков. Однако разный частотный спектр этих помех определил го-

раздо большее искажение формы сигнальных импульсов, зафиксированных на рис. 7,б.

Следовательно, даже многократная фильтрация сигнальных токов в приемниках тональных РЦ не гарантирует их устойчивой работы при повышенном уровне помех. Таким образом, вопрос о повышении эффективности фильтров, используемых в РЦ, остается актуальным.

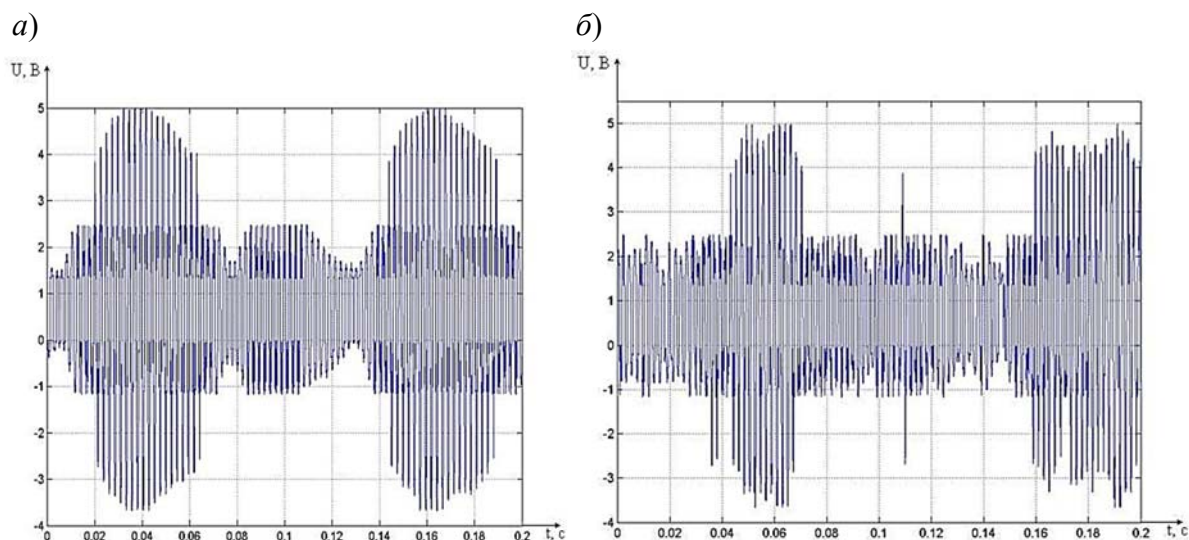


Рис. 7. Напряжение на путевом приемнике тональной РЦ

Заключение

Определено, что первоисточником появления асимметрии тягового тока в рельсовых линиях является возникновение асимметрии продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовых нитей в них.

Найдено, что влияние взаимной индуктивности между рельсовыми нитями приводит к увеличению асимметрии переменного тягового тока, причем степень этого увеличения зависит от величины продольного сопротивления рельсовых нитей и частоты гармоники тягового тока.

Взаимные индуктивности с рельсовыми нитями других близлежащих рельсовых цепей могут как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в рельсовой линии в зависимости от соотношения расстояний между влияющими и подверженными влиянию рельсовыми нитями, величин и гармонического состава тяговых токов в них.

Токи в продольных линиях электроснабжения, подвешенных на опорах контактной сети, могут оказывать заметное влияние на величину асимметрии тягового тока в перегонных рельсовых цепях.

Гармонический состав тягового тока определяет степень искажения синусоидальности сигнального тока, причем это искажение может быстро изменяться в зависимости от серии электровозов, режимов их ведения, их

количества на близком расстоянии от рассматриваемой РЦ и/или в зоне между тяговыми подстанциями.

Найденные особенности процесса формирования помех от тягового тока на рельсовые цепи обеспечивают возможность обоснованной разработки мер по повышению устойчивости их работы на электрифицированных участках железных дорог.

Библиографический список

1. Шаманов В. И. Эффективность фильтров в аппаратуре рельсовых цепей / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 1. – С. 2–5.
2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств : монография. – СПб. : Наука, 2018. – 151 с.
3. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики цепей / В. И. Шаманов – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.
4. Болотский Д. Н. Опыт внедрения систем интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала на железных дорогах пространства 1520 / Д. Н. Болотский // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2015. – № 1. – С. 72–76.
5. Розенберг Е. Н. Техничко-экономическая эффективность многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. И. Талалаев, В. И. Шаманов. – М. : Изд-во ВНИИАС, 2004. – 121 с.
6. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами цепей / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 223–240.
7. Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke // Signal und Draht. – 2016. – 108. – No 2. – S. 68.
8. Внедрение системы РТС завершается в 2020 году // Железные дороги мира. – 2016. – № 3. – С. 10.
9. Розенберг Е. Н. Инновационные технологии управления движением поездов / Е. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 10. – С. 2–4.
10. Büßmann F. Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büßmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // Signal und Draht. – 2016. – 108. – No 10. – S. 6–11.
11. Rosenbergen M. Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen / M. Rosenbergen, F. Pointer // Signal und Draht. – 2015. – 107. – No 6. – S. 6–8.
12. Sauer C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // Eisenbahningenieur. – 2014. – 65. – No 7. – S. 25–30.
13. Railway Operation and Control. 3rd edition. – Washington : VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. – 2014. – 284 p.
14. Watanabe I. Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit / I. Watanabe, T. Takashige // Quarterly Reports of RTRI. – 1989. – No 4. – Pp. 9–11.
15. Шаманов В. И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации цепей / В. И. Шаманов. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2005. – 236 с.
16. Лунев С. А. Исследование переходного сопротивления «рельсы – земля» на бесстыковом пути / С. А. Лунев, А. Г. Ходкевич, С. С. Сероштанов // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 5. – С. 35–36.

17. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М. : Транспорт, 1987. – 168 с.
18. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. № ЦЭ-191 / МПС РФ. – М., 1993. – 68 с.
19. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-техническая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям : справочник. – М. : Трансиздат, 2001. – 532 с.
20. Сапожников Вл. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие / Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.
21. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, В. С. Казеев, Ю. В. Ободовский. – М. : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с.
22. Котельников А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, А. П. Слободянюк. – М. : Транспорт, 1990. – 215 с.
23. Вахнин М. И. Устройства СЦБ при электротяге переменного тока / М. И. Вахнин, Н. Ф. Пенкин, М. А. Покровский, Д. К. Пугин, А. А. Талыков // Тр. ВНИИЖТ. – Вып. 126. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 220 с.
24. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
25. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
26. Shamanov V. I. The process of traction-current asymmetry generation in rail lines / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No 8. – Pp. 509–512.
27. Shamanov V. I. Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 8. – Pp. 509–512.
28. Акульшин П. К. Взаимные влияния на воздушных линиях связи / П. К. Акульшин. – М. : Связь, 1977. – 144 с.
29. Shamanov V. I. Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – No 10. – Pp. 566–571.
30. ГОСТ Р 54130–2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2012. – 36 с.
31. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.
32. Bestem'yanov P. F. A method of statistical modeling of electromagnetic interference in automatics and telemechanics channels in railway transport / P. F. Bestem'yanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 9. – Pp. 503–508.
33. Ogunsola A. Electromagnetic. Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin : Springer, 2013. – 600 p.

Victor I. Shamanov

«Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport» department
Russian University of Transport

Problems of electromagnetic compatibility of track circuits and traction network

The article is devoted to the issues of increasing the stability of the operation of track circuits under the influence of interference from alternating traction current. Track circuits are widely used on railways around the world to monitor the occupation by rolling stock and the integrity of rails on a railway section. In modern multilevel systems of interval regulation of train traffic using digital radio channels and satellite navigation, track circuits are also used.

It was found that the appearance of asymmetry of the longitudinal and / or transverse resistances of the rails is only the root cause of the asymmetry of the traction current. The mutual inductance of the rails in the rail line increases the value of the asymmetry of the traction current by several times. The degree of this increase depends on the temperature of the rails and the value of the traction current in them.

The mutual inductance of the rails of the rail line with the parallel rails of other track circuits can both increase and decrease the asymmetry of the traction current depending on the nature of the distribution of the traction current along the rails of the adjacent track circuits. The mutual inductance of rails with longitudinal power supply lines located on the supports of the contact network can noticeably affect the value of the asymmetry.

The degree of distortion of the signal current sinusoidality is determined by the harmonics of the asymmetry current. The harmonic composition of interference from traction current can quickly change over time and depends on the number, series and operating modes of traction equipment of electric locomotives moving in the area between traction substations. It is shown that electric filters used in track circuits do not always provide the required interference filtering efficiency.

track circuits, rail lines, mutual inductance, traction current, asymmetry, interference, harmonic composition, operation stability.

References

1. Shamanov V. I. (2017). The effectiveness of filters in the equipment rail circuits [Effektivnost' fil'trov v apparature rel'sovykh tsepey], Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 1. – Pp. 2–5.
2. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. (2018) Hamming Codes in Concurrent Error Detection Systems of Logic Devices [Kody Hemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv]. – St. Petersburg : Nauka, 2018. – 151 p.
3. Shamanov V. I. (2013). Electromagnetic Compatibility of Systems of Railway Automation and Telemechanics [Elektromagnitnaya sovmestimost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki tsepey]. Moscow, Educational and methodical center for education on the railway transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2013. – 244 p.
4. Bolotsky D. N. (2015). Experience in the implementation of interval traffic control systems on the basis of radio channel on the Railways of 1520 [Opyt vnedreniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na baze radiokanala na

- zheleznikh dorogakh prostranstva 1520], News of the Academy of electrotechnical Sciences [Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk], issue 1. – Pp. 72–76.
5. Rosenberg E. N., Talalaev V. I., Shamanov V. I. (2004). Technical and economic efficiency of multi-level control system and train safety [Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' mnogourovnevnoy sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov]. – Moscow, VNIIS [ВНИИАС]. – 121 p.
 6. Shamanov V. I. (2018) Train interval control systems with digital radio channels [Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov s tsifrovymi radiokanalami], Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 4, issue 2. – Pp. 223–240.
 7. Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke (2016). Signal und Draht, vol. 108, issue 2. – S. 68.8. The implementation of the PTC system is completed in 2020 (2016) [Vnedreniye sistemy PTC zavershayetsya v 2020 godu], Railways of the world [Zheleznyye dorogi mira], issue 3. – Pp. 10.
 8. Rosenberg E. N. (2017). Of innovative technology for train traffic control [Innovatsionnyye tekhnologii upravleniya dvizheniyem poyezdov], Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 2–4.
 9. Bu.. ssmann F., Scheier B., Brinkmann F., Ja der B. (2016). Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stu. zten ERTMS fu.. r deutsche Regionalstrecken. Signal und Draht, vol. 108, issue 10. – S. 6–11.
 10. Rosenbergen M., Pointer F. (2015). Hochverfu. gbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lo.. sungen. Signal und Draht, vol. 107, issue 6. – S. 6–8.
 11. Sauer C. (2014). Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur. Eisenbahningenieur, vol. 65, issue 7. – Pp. 25–30.
 12. Railway Operation and Control. 3rd edition. – Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014. – 284 p.
 13. Watanabe I., Takashige T. (1989). Moving Bloc Train Shutting Impedance of the Track Circuit. Quarterly Reports of RTRI, issue 4. – Pp. 9–11.
 14. Shamanov V. I. (2005). Interference and interference immunity of automatic locomotive signaling circuits [Pomekhi i pomekhoustoychivost' avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii tsepey]. Irkutsk, IRGUPS [ИрГУПИС]. – 236 p.
 15. Lunev S. A., Chodkiewicz A. G., Seroshtanov S. S. (2008). Study of the transition resistance «rails – to-earth» in seamless way [Issledovaniye perekhodnogo soprotivleniya «rel'sy – zemlya» na besстыkovom puti]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 5. – Pp. 35–36.
 16. Karyakin R. N. (1987). Traction network of alternating current [Tyagovyye seti peremennogo toka]. Moscow, Transport Publ., 1987. – 168 p. 18. Instructions for grounding power supply devices on electrified Railways No TSE-191 / Ministry of railways Russian Federation [Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznikh dorogakh. No TSE-191. Ministerstvo putey soobshcheniya]. Moscow, MPS, 1993. – 68 p.
 17. Contact network and air lines. Normative and technical documentation for the operation of the contact network and high-voltage air lines: Reference. [Kontaknfya set'i vozdushnyye linii. Normativno-tekhnicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoy seti i vysokovol'tnym vozdushnym liniyam: Spravochnik]. Moscow, Transizdat, 2001. – 532 p.
 18. Sapozhnikov Vl. V., Sapozhnikov Val. V., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017). Reliability of railway automation, and remote control and communication systems [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi]. Ed by

- VI. V. Sapozhnikov, Moscow, Educational and methodical center for education on the railroad transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2017. – 318 p.
19. Arkatov V. S., Arkatov Yu. V., Kazeev V. S., Obodovsky Yu. V. (2006). Rail circuits under the influence of grounding devices [Rel'sovyye tsepi magistral'nykh zheleznikh dorog: Spravochnik]. Moscow, Publishing OOO Missiya-M, 2006. – 496 p.
 20. Kotelnikov A. V., Naumov A. V., Slobodyanyuk A. P. (1990). Rail circuits under the influence of grounding devices [Rel'sovyye tsepi v usloviyakh vliyaniya zazemlyayushchikh ustroystv]. Moscow, Transport Publ., 1990. – 215 p.
 21. Vakhnin M. I., Penkin N. F., Pokrovsky M. F., Pugin D. K., Talykov A. A. (1956). The devices of the SCB for electric alternating current traction [Ustroystva STSB pri elektrotzage peremennogo toka]. Moscow, Transzheldorizdat, 1956 – 220 p.
 22. Markvardt K. G. (1982). Power Supply of electrified Railways [Markvardt K. G. Elektropitaniye zheleznikh dorog]. Moscow, Transport Publ., 1982. – 528 p.
 23. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepensky B. M. (1990). Rail circuits. Analysis of work and maintenance [Rel'sovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye]. Moscow, Transport Publ., 1990. – 295 p.
 24. Shamanov V. I. (2014). The process of traction-current asymmetry generation in rail lines, Russian Electrical Engineering, vol. 85, issue 8. – Pp. 509–512.
 25. Shamanov V. I. (2015). Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control, Russian Electrical Engineering, vol. 86, issue 8. – Pp. 509–512.
 26. Akulshin P. K. (1977). Mutual influences on air communication lines [Vzaimnyye vliyaniya na vozdukhnykh liniyakh svyazi]. Moscow, Svyaz' Publ., 1977. – 144 p.
 27. Shamanov V. I. (2016). Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls, Russian Electrical Engineering, vol. 8, issue 10. – Pp. 566–571.
 28. Bader M. P. (2002). Electromagnetic compatibility [Elektromagnitnaya sovместимость]. Moscow, Educational and methodical center for education on the railway transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2002. – 638 p.
 29. Ogunsola A., Mariscotti A. (2013). Electromagnetic. Compatibility in Railways: Analysis and Management, Berlin, Springer, 2013. – 600 p.
 30. Bestem'yanov P. F. A method of statistical modeling of electromagnetic interference in automatics and telemechanics channels in railway transport, Russian Electrical Engineering, vol. 86, issue 9. – Pp. 503–508.
 31. GOST R 54130–2010. Quality of electrical energy. Terms and definitions [GOST R 54130–2010. Kachestvo elektricheskoy energii. Terminy i opredeleniya]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. – 36 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко
Поступила в редакцию 04.12.2018, принята к публикации 21.02.2019*

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта;

e-mail: shamanov_vi@mail.ru

© Шаманов В. И., 2019