

УДК 656.256.3(088.8)

В. И. Шаманов, д-р техн. наук

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

РАСЧЕТЫ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА В НЕОДНОРОДНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЯХ

На электрифицированных участках железных дорог рельсовые цепи и автоматическая локомотивная сигнализация работают неустойчиво из-за действия помех от тягового тока. Процесс возникновения помех многофакторный, поэтому выявить причины помех с недопустимым уровнем довольно непросто. Измерения в условиях эксплуатации для оценки электромагнитной обстановки в тяговой рельсовой сети и на электровозах относительно сложны и требуют больших затрат времени и средств на их проведение. Электромагнитная обстановка может быстро меняться, а результаты таких измерений затруднительно экстраполировать на другие условия по интенсивности движения и/или на другие веса и скорости движения поездов на этом участке, а также на другие участки железных дорог. Поэтому актуальны теоретические исследования в данной области с разработкой методов расчета уровня помех на рассматриваемые устройства железнодорожной автоматики и телемеханики в различных условиях эксплуатации.

Помехи на эти устройства от тягового тока появляются, когда возникает асимметрия продольного и/или поперечного сопротивления рельсовых нитей рельсовой линии. В статье приводятся некоторые результаты разработки расчетных методов, обеспечивающих выявление характера изменения уровня помех от тяговых токов по длине неоднородных рельсовых линий, оборудованных рельсовыми цепями. Длинные рельсовые нити отрезков рельсовой линии при этом представляются как последовательно соединенные трехполюсники. Длина этих отрезков выбирается из условия обеспечения требуемой точности расчетов. Анализ процесса возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии усложняется из-за взаимной индуктивности между ее рельсовыми нитями. Поэтому для вычисления коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовой линии используются найденные взаимозависимости с коэффициентом асимметрии электрических сопротивлений рельсовых нитей. При расчетах учитываются гармоники тягового тока, создающие помехи, и зависимость электрического сопротивления рельсов от их температуры и величины протекающего по ним тягового тока. В результате находится изменение величины асимметрии тягового тока под приемными катушками автоматической локомотивной сигнализации при движении поезда и величины этой асимметрии в местах подключения к рельсам аппаратуры рельсовых цепей.

Такие расчеты позволяют определять вклад тяговых токов в уровень помех на аппаратуре рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Разработанный алгоритм удобен для расчетов на компьютерах. Дополнительный учет взаимных индуктивностей рельсовых нитей с нитями и контактными проводами других рельсовых линий, а также с проводами линий продольного электроснабжения обеспечивает возможность использования методики для проведения расчетов на многопутных перегонах и на станциях. Расчеты могут применяться как при

оценке электромагнитной обстановки на конкретном участке пути в текущее время (или в других условиях эксплуатации), так и для прогнозирования ее изменения при увеличении интенсивности движения и/или веса поездов.

Рельсовые цепи, автоматическая локомотивная сигнализация, рельсовые нити, электрические сопротивления, взаимные индуктивности, тяговый ток, асимметрия, помехи, расчеты

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267

Введение

В системах интервального регулирования движения поездов все шире используется спутниковое позиционирование и цифровые радиоканалы [1–3]. Однако рельсовые цепи (РЦ) на большинстве участков железных дорог мира остаются основным источником информации о свободности от подвижного состава участков пути и целостности их рельсов. Они также используются как индуктивные линии связи между напольными и локомотивными устройствами автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [4–7]. Условия эксплуатации РЦ и АЛС наиболее сложны на участках с электротягой, поэтому там устойчивость их работы наихудшая. Вызвано это тем, что на таких участках по рельсовым линиям одновременно пропускаются сигнальные токи и превосходящие их по величине на два и более порядка тяговые токи, создающие помехи [8].

Тяговый постоянный ток становится источником помех на четных гармониках тока промышленной частоты, а переменный тяговый ток — на частотах нечетных его гармоник. На участках с электротягой переменного тока помехи отличаются более высоким уровнем и более широким частотным спектром. Поэтому при переменном тяговом токе интенсивность сбоев в работе РЦ и АЛС может быть в десятки раз больше, чем на участках с электротягой постоянного тока [8].

Помехи вызывают появление кратковременных самовосстанавливающихся отказов (сбоев) в работе аппаратуры РЦ и АЛС, приводящих к переключению огней напольных и/или локомотивных светофоров на ложные запрещающие показания, которые требуют снижения скорости движения поезда или экстренного торможения.

Ложные переключения светофоров с разрешающих показаний на запрещающее требуют применения экстренного торможения. В результате увеличивается психофизиологическая нагрузка на поездные бригады, снижается участковая скорость движения с соответствующим уменьшением пропускной способности участков железных дорог, ухудшается безопасность движения поездов. Если ложные переключения ламп локомотивного светофора происходят часто, поездной бригаде разрешено отключать аппаратуру АЛС, что увеличивает вероятность аварий и крушений из-за ошибок машиниста. Эта проблема актуальна и для метрополитена [10].

Первоисточником рассматриваемых помех является асимметрия сопротивлений рельсовых нитей рельсовой линии [11].

Этот параметр является основным при оценке электромагнитной обстановки на участке железной дороги.

Однако электромагнитная обстановка зависит от многих других факторов и может достаточно быстро изменяться, что затрудняет определение степени влияния тяговых токов на устойчивость работы РЦ и АЛС в задачах контроля и диагностики [12].

Тяговый ток на входном для него конце РЦ и перед головным электровозом распределяется по рельсовым нитям обратно пропорционально их входным сопротивлениям. Для РЦ величина этих сопротивлений зависит от значений сопротивлений всех токопроводящих и изолирующих элементов в каждой рельсовой нити с учетом влияния взаимных индуктивностей рельсовых нитей с другими токонесущими элементами тяговой сети.

Асимметрия сопротивлений рельсовых нитей на устойчивость работы путевых приемников РЦ сказывается меньше вследствие того, что различия в величинах сопротивлений элементов рельсовых нитей по полной длине неоднородной рельсовой линии в определенной степени сглаживаются. А сопротивления подключенных по концам РЦ секций основных обмоток дроссель-трансформаторов играют роль балластных сопротивлений.

Для локомотивной аппаратуры АЛС величина входного сопротивления рельсовой нити определяется сопротивлениями всех ее элементов на отрезке от движущегося головного электровоза до места подключения к рельсам источника сигнальных токов. В результате в неоднородных рельсовых линиях при движении поезда асимметрия тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС меняется, а балластными будут только сопротивления секций основных обмоток дроссель-трансформаторов (ДТ) на выходном конце РЦ. Поэтому на одних и тех же участках устойчивость работы АЛС заметно меньше по сравнению с РЦ. И для выявления причин неустойчивой работы АЛС требуется знать детальное распределение асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии.

Экспериментальные исследования для выяснения характера такого распределения относительно дороги и сложны организационно, требуют больших затрат времени на их проведение и анализ результатов измерений. Величина рассматриваемых сопротивлений зависит от быстро изменяющихся амплитуд частотного спектра тягового тока, протекающего не только по рельсовой нити, но и по соседним линиям тяговой сети [8]. В результате одномоментное выяснение характера распределения величин сопротивления токопроводящих и изолирующих элементов или распределения по длине РЦ асимметрии тягового тока под катушками АЛС не всегда позволяет экстраполировать полученные результаты на другой интервал времени, на другие условия эксплуатации или на другие рельсовые линии.

Все это определяет актуальность развития в задачах оценки электромагнитной обстановки расчетных методов и компьютерных экспериментов с разработкой корректных математических моделей рельсовых линий как электрических линий с распределенными параметрами, подверженных влиянию магнитных полей, создаваемых другими токонесущими линиями.

1. Особенности формирования асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в неоднородных рельсовой линиях

Процесс формирования помех на работу РЦ и АЛС от тягового тока, текущего по рельсовой линии, достаточно сложен, что видно из приведенного ниже анализа этого процесса при наличии в неразветвленной РЦ только продольной асимметрии сопротивления неоднородной рельсовой линии, ограниченной изолирующими стыками с двумя дроссель-трансформаторами (ДТ).

Падение тягового напряжения $\dot{U}_{РЦ}$ в такой РЦ равно падению напряжения между средними точками ДТ. По элементам рельсовых нитей длиной $l_{РЦ}$, в которых протекают тяговые токи соответственно $\dot{I}_{Т1}$ и $\dot{I}_{Т2}$, это падение распределяется следующим образом:

$$\dot{U}_{РЦ} = \dot{I}_{Т1} z_{РН1} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т2} z_{М12} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т1} 0,5 Z_{ДТ}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{РЦ} = \dot{I}_{Т2} z_{РН2} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т1} z_{М12} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т2} 0,5 Z_{ДТ}, \quad (2)$$

где $z_{РН1}; z_{РН2}$ – удельные продольные сопротивления рельсовых нитей 1 и 2 с учетом в них сопротивлений рельсовых стыковых соединений; $z_{М12}$ – удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей; $Z_{ДТ}$ – сопротивление секции основной обмотки ДТ для тягового тока.

Удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей в однопроводных рельсовых линиях при протекании по ним тяговых токов $z_{М12} = j\omega M_{12}$, где M_{12} – величина взаимной индуктивности рельсовых нитей, ω – частота соответствующей гармоника тягового тока.

Разделим все элементы в формуле (1) на $\dot{I}_{Т1}$, а в формуле (2) на $\dot{I}_{Т2}$:

$$\frac{\dot{U}_{РЦ}}{\dot{I}_{Т1}} = z_{РН1} l_{РЦ} + \frac{\dot{I}_{Т2}}{\dot{I}_{Т1}} z_{М12} l_{РЦ} + 0,5 Z_{ДТ}; \quad (3)$$

$$\frac{\dot{U}_{РЦ}}{\dot{I}_{Т2}} = z_{РН2} l_{РЦ} + \frac{\dot{I}_{Т1}}{\dot{I}_{Т2}} z_{М12} l_{РЦ} + 0,5 Z_{ДТ}. \quad (4)$$

Таким образом, в неоднородных рельсовых линиях сопротивление взаимной индуктивности между рельсовыми нитями линии зависит также от соотноше-

ния величин тяговых токов в нитях. Изменения в асимметрии электрических сопротивлений рельсовых нитей тягового тока приводят к изменению сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей линии.

Обозначим удельное сопротивление взаимной индуктивности в первой рельсовой нити через z_{M1} , а во второй рельсовой нити через z_{M2} . Пусть, например, в рельсовой линии $I_{T1} < I_{T2}$, т. е. $z_{PH1} > z_{PH2}$. Тогда удельные сопротивления взаимной индуктивности у первой z_{M1} и второй z_{M2} рельсовых нитей с учетом влияния соотношения тяговых токов в них:

$$z_{M1} = \frac{\dot{I}_{T2}}{\dot{I}_{T1}} j\omega M_{12}; \quad z_{M2} = \frac{\dot{I}_{T1}}{\dot{I}_{T2}} j\omega M_{12}. \quad (5)$$

Следовательно, в рассматриваемом случае удельное сопротивление взаимной индуктивности у первой рельсовой нити z_{M1} увеличивается, а у второй величина z_{M2} уменьшается, за счет чего асимметрия тягового тока в рельсовой линии растет.

Теория РЦ в настоящее время разработана на высоком уровне [13, 14]. Поэтому желание использовать эту теорию для создания методики расчета мешающего влияния тягового тока на РЦ и устройства АЛС будет вполне естественным.

Основными параметрами в этой теории являются токи и напряжения в местах подключения источника и приемника сигнальных токов РЦ. Данные параметры находят при использовании телеграфных уравнений, описывающих дифференциальными уравнениями в частных производных электрические процессы в рельсовых линиях как электрических с распределенными параметрами. Если рельсовые линии неоднородны, то при расчетах используются усредненные значения удельных величин их продольного и поперечного сопротивлений.

Теория использована и для приближенной оценки или расчета мешающего влияния тягового тока на РЦ и на АЛС с учетом сопротивлений взаимной индуктивности в [15]. Однако представление отрезков неоднородной рельсовой линии однородными отрезками при использовании этой теории в определенной степени загроубляет расчеты и затрудняет конкретизацию причин изменения устойчивости работы АЛС при движении поезда на определенном участке рельсовой линии.

Интересна также схема замещения рельсовых линий с использованием лестничных схем Кауэра, построенных на двухполюсниках, в которых роль продольного сопротивления играет сопротивление рельсовых нитей, а в качестве поперечной проводимости рассматривается сопротивление рельсов по отношению к земле [16]. Входные сопротивления для этих схем вычисляются с использованием непрерывных (лестничных) дробей [17]. Представление рельсовых нитей рельсовой линии такими двухполюсниками обеспечило возможность

получения интересных данных о характере изменения асимметрии тягового тока по длине рельсовой линии при различных численных значениях ее электрических параметров [18]. Однако в этой методике не учитывалось влияние сопротивлений взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии.

Более продуктивной для решения задачи представляется схема замещения рельсовых линий тяговой рельсовой сети с использованием последовательного и параллельного соединения Т-образных трехполюсников [16].

2. Расчетная модель отрезка рельсовой линии

Анализ изменений асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине неоднородной рельсовой линии удобно проводить, разделив ее на отдельные отрезки, по длине которых продольные и поперечные сопротивления рельсовых нитей изменяются относительно мало. Моделировать эти отрезки удобно с использованием в их схемах замещения трехполюсников с обеспечением требуемой точности расчетов [19].

На рисунке 1 показана схема замещения отрезка рельсовой линии длиной $l_{ол}$ параллельным соединением двух трехполюсников. Трехполюсник, моделирующий первую рельсовую нить, имеет выводы $1_1, 2_1, 3_1$, а у трехполюсника, моделирующего вторую рельсовую нить, выводы $1_2, 2_2, 3_2$. Выводы 3_1 и 3_2 объединены. Сопротивлениями R_{p3} моделируются электрические сопротивления отрезков рельсовых нитей по отношению к земле.

Величины продольных сопротивлений первой Z'_1, Z''_1 и второй Z'_2, Z''_2 рельсовых нитей в общем случае неодинаковы по длине трехполюсника и состоят из сопротивлений сплошных рельсов Z_{CP} , соответствующих сопротивлений токопроводящих стыков в звеньевом пути $Z'_{TC1}; Z''_{TC1}$ и $Z'_{TC2}; Z''_{TC2}$, а также сопротивлений взаимной индуктивности $Z'_{M1}; Z''_{M1}$ и $Z'_{M2}; Z''_{M2}$. Из этих составляющих только сопротивления сплошных рельсов одинаковы у разных трехполюсников, имеющих одинаковую длину. Величины сопротивлений токопроводящих стыков зависят от их состояния на конкретном отрезке рельсовой нити, а величины сопротивлений взаимной индуктивности — от соотношения величин тяговых токов в отрезках рельсовой линии.

Часть тяговых токов \dot{I}_{TH1} и \dot{I}_{TH2} , втекающих в рельсовые нити, может стекать в землю \dot{I}_{Y1} и \dot{I}_{Y2} при соответствующем сопротивлении между рельсами и землей. В таких случаях тяговые выходные токи \dot{I}_{TK1} и \dot{I}_{TK2} не равны соответствующим входным \dot{I}_{TH1} и \dot{I}_{TH2} в соответствующих рельсовых нитях. А величины токов утечки из рельсов в землю \dot{I}_{Y1} и \dot{I}_{Y2} определяются не только величинами сопротивлений R_{p31} и R_{p32} , но и соотношениями этих величин со значениями соответствующих продольных сопротивлений, расположенных справа от них на рисунке 1.

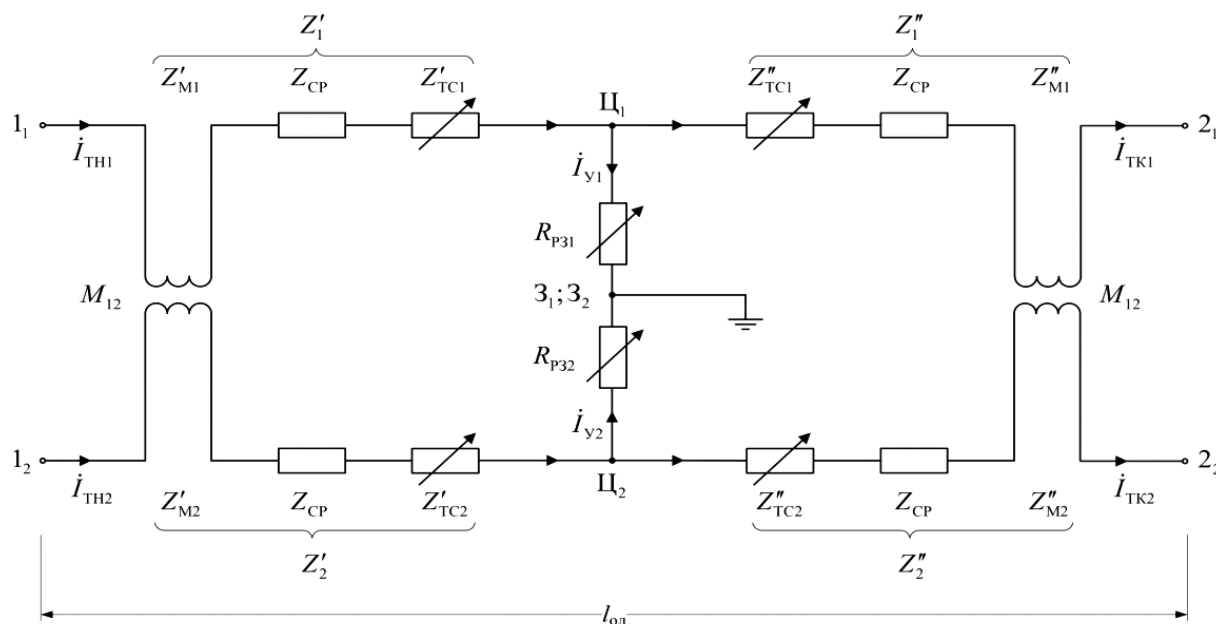


Рис. 1. Схема замещения отрезка рельсовой линии

Величина сопротивления сплошных рельсов $Z_{CP} = l_{OL} z_{CP}$ зависит от длины рассматриваемого отрезка рельсовой линии l_{OL} и величины удельного сопротивления сплошных рельсов z_{CP} . Последнее не меняется по длине рельсовой линии и зависит от типа рельсов, температуры окружающей среды, амплитуды и частоты гармоники тягового тока.

Величины сопротивлений взаимной индуктивности соответствующих отрезков рельсовых нитей неоднородной рельсовой линии Z'_{M1} , Z'_{M2} и Z''_{M1} , Z''_{M2} определяются длиной этих отрезков, а также величинами взаимной индуктивности рельсовых нитей M_{12} и частоты исследуемой гармоники тягового тока ω :

$$Z'_{M1} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TH2}}{\dot{I}_{TH1}} \omega M_{12}; \quad Z'_{M2} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TK2}}{\dot{I}_{TK1}} \omega M_{12}; \quad (6)$$

$$Z'_{M2} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TH1}}{\dot{I}_{TH2}} \omega M_{12}; \quad Z'_{M1} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TK1}}{\dot{I}_{TK2}} \omega M_{12}. \quad (7)$$

Величины сопротивлений токопроводящих стыков зависят от их конструкции, срока эксплуатации, качества технического обслуживания и могут заметно различаться по длине отрезка рельсовой нити. Поэтому на схеме (рис. 1) слева и справа от центров трехполюсников Π_1 и Π_2 используются разные обозначения — сопротивления Z'_{TC1} , Z''_{TC1} и Z'_{TC2} , Z''_{TC2} .

Диапазоны изменения величины рассматриваемых сопротивлений приведены в [20]. Например, при расчетах удельное сопротивление Z_{CP} сплошных

рельсов типа Р65 при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ на частоте тока 50 Гц можно принять в рельсовой нити равным $0,3 e^{j70^{\circ}}$ Ом/км [21].

Сопротивления токопроводящих стыков Z_{TC} на участках с электротягой постоянного тока не должно увеличивать сопротивление рельсовой нити больше чем на 20 % [22]. Это требование распространяется и на участки, электрифицированные на переменном токе. С учетом этого расчетное удельное продольное сопротивление рельсовой нити звеньевое пути принято равным $0,4 e^{j65^{\circ}}$ Ом/км [23].

Рельсовые нити как однопроводные электрические линии обладают также взаимными индуктивностями с другими рельсовыми нитями тяговой рельсовой сети, с контактными проводами и с линиями продольного электроснабжения. Это вызывает появление в продольном удельном сопротивлении рельсовой нити удельных сопротивлений взаимной индуктивности рельсовой нити с другими рельсовыми нитями, контактными проводами, несущими тросами, линиями продольного электроснабжения, контурами «рельс — земля». Величины удельных сопротивлений $z_{Mik} = j\omega M_{ik}$ зависят от величин взаимной индуктивности M_{ik} между рельсовыми нитями и другими токонесущими линиями [24–26].

С ростом величины и частоты гармоник тягового тока удельное продольное сопротивление рельсовых нитей увеличивается. Фактически продольное сопротивление рельсовых нитей может увеличиваться на 4–30 % [20].

Поперечное сопротивление рельсовых нитей на рисунке 1 включает в себя распределенное по длине сопротивление рельсов по отношению к земле, а также сопротивления цепей заземления опор контактной сети, подключенных к рельсам. Удельное сопротивление рельсов по отношению к земле может изменяться в диапазоне от 0,5 до 18,0 Ом·км [27]. Сопротивление сигнальному току цепей заземления опор контактной сети при их подключении непосредственно к рельсу должно быть не менее 100 Ом [28]. Фактически при пробое искровых промежутков это сопротивление неопределенно долго может иметь величину на порядок меньше.

При неравномерном и неодинаковом изменении с течением времени величины сопротивлений у токопроводящих и изолирующих элементов продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей рельсовая линия становится неоднородной.

Переменный тяговый ток активно стекает из рельсов в землю. Величина тягового тока по длине рельсовых нитей рельсовой линии может меняться неодинаково, когда их сопротивления по отношению к земле R_{P31} и R_{P32} различны. Неравномерность стекания появляется и при изменении соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей на разных участках рельсовой линии. Поэтому в общем случае тяговые токи в рельсах в начале $\dot{I}_{TH1}, \dot{I}_{TH2}$ и в конце $\dot{I}_{TK1}, \dot{I}_{TK2}$ соответствующего отрезка рельсовой нити могут иметь разные значения.

Для более простого восприятия схемы замещения РЦ и уменьшения длины формул при расчетах распределения асимметрии тягового тока по длине неоднородной рельсовой линии приняты следующие условные обозначения. Для левого и правого на схеме отрезков продольного сопротивления у трехполюсника первой рельсовой нити:

$$Z_1' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC1}' + Z_{M1}'; \quad Z_1'' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC1}'' + Z_{M1}''; \quad (8)$$

у трехполюсника второй рельсовой нити:

$$Z_2' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC2}' + Z_{M2}'; \quad Z_2'' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC2}'' + Z_{M2}'' \quad (9)$$

Представление отрезков рельсовых нитей рельсовой линии, обладающей распределенными параметрами, в виде последовательного соединения трехполюсников, содержащих элементы с сосредоточенными параметрами, не должно вносить в расчеты погрешности недопустимой величины. Величина этой погрешности зависит от выбранной длины отрезка рельсовой линии l_{OL} , от величины ее продольного и поперечного сопротивлений, а также от частоты исследуемой гармоники тягового тока [16, 19].

Максимально допускаемая по требованиям обеспечения необходимой точности расчетов длина данных отрезков с увеличением удельного сопротивления рельсов по отношению к земле растет, а с ростом частоты гармоники тягового тока уменьшается. Проведенные исследования показали, что погрешность расчетов на частоте 50 Гц не превышает 5 % при минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле, равном 0,5 Ом·км, если длина отрезка рельсовой нити меньше 400 м. При частоте 150 Гц длина отрезка должна быть не больше 170 м [16].

3. Схема замещения рельсовой цепи

Распределение асимметрии тягового тока по длине рельсовой линии удобно начинать с рельсовой цепи (РЦ), прилегающей к тяговой подстанции. Схема замещения такой РЦ при работе в нормальном режиме представлена на рисунке 2. Остальные k рельсовых цепей на участке между тяговыми подстанциями показаны условно. Считается, что тяговый ток вырабатывается источником тока (ИТ).

РЦ ограничена изолирующими стыками с дроссель-трансформаторами. Сигнальный ток \dot{I}_C вырабатывается путевым генератором (ПГ). Приемник сигнального тока РЦ обозначен как ПП. К концам рельсовых нитей РЦ подключены дроссельными перемычками с сопротивлениями $Z_{ДПН1}$, $Z_{ДПН2}$ и $Z_{ДПК1}$, $Z_{ДПК2}$ и секции основных обмоток дроссель-трансформаторов с сопротивлениями $Z_{ДТ} / 4$. За длину рельсовой цепи для тягового тока $l_{РЦ}$ принято расстояние между средними точками дроссель-трансформаторов. Асимметрия сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии для аппаратуры АЛС рас-

считывается в отдельных точках, расположенных от конца РЦ на расстояниях $l_1 \dots l_n$.

Разница между $l_{РЦ}$ и l_n объясняется тем, что при вступлении электровоза на РЦ он своими колесными парами шунтирует дроссель-трансформатор, установленный на входном конце рельсовой цепи, вместе с его дроссельными перемычками $Z_{ДПН1}$ и $Z_{ДПН2}$. В результате сопротивления эти элементы не входят в цепь протекания тягового тока по рельсовой линии в режиме АЛС, отчего величины асимметрии тягового тока на этом конце в режиме АЛС и в нормальном режиме работы РЦ различаются.

Рельсовая линия в пределах РЦ делится на n отрезков, нумерация которых ведется от выходного для тягового тока ее конца. За начало отрезка рельсовой линии принято место втекания в нее тягового тока. Отрезки рельсовых нитей рельсовой линии для тягового тока представлены в виде трехполюсников с нумерацией их выводов в соответствии с рисунком 1. Первая цифра в номере вывода трехполюсника обозначает номер рельсовой нити, вторая — его номер по длине рельсовой линии.

За расчетные точки для определения асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками движущегося по РЦ электровоза приняты начала соответствующих отрезков рельсовой линии. На рисунке 2 длина от этих точек первого отрезка рельсовой линии до конца РЦ обозначена как $l_1, l_2 \dots l_n$.

На рисунке 2 приняты следующие условные обозначения:

$Z_{ВХ}^{РЦ}$ — входное сопротивление РЦ для тягового тока;

$Z_{ВХН1}^{РН}, Z_{ВХН2}^{РН}$ — входные сопротивления для тягового тока соответственно в началах первой и второй рельсовых нитей;

$Z_{ВХ11} \dots Z_{ВХ1n}; Z_{ВХ21} \dots Z_{ВХ2n}$ — входные сопротивления для тягового тока первой и второй рельсовых нитей под катушками АЛС при вступлении электровоза на соответствующий отрезок рельсовой линии;

$Z_{ВХЦ11} \dots Z_{ВХЦ1n}; Z_{ВХЦ21} \dots Z_{ВХЦ2n}$ — входные сопротивления для тягового тока центральных точек соответствующих трехполюсников;

$R_{Р311} \dots R_{Р31n}; R_{Р321} \dots R_{Р32n}$ — сопротивления отрезков рельсовых нитей от первого до n -го по отношению к земле соответственно у первой и второй рельсовых нитей;

$Z'_{11}, Z''_{11} \dots Z'_{1n}, Z''_{1n}; Z'_{21}, Z''_{21} \dots Z'_{2n}, Z''_{2n}$ — сопротивления продольных плеч трехполюсников в отрезках рельсовых нитей от первого до n -го соответственно в первой и второй рельсовых нитях;

$R_{ОЛ}, R_{ЗП}$ — сопротивления соответственно отсасывающей линии и контура заземления тяговой подстанции.

По концам рельсовых нитей в продольные плечи трехполюсников включены сопротивления соответствующих дроссельных перемычек $Z_{ДП}$ и секций основных обмоток дроссель-трансформаторов $Z_{ДТ}$.

Величина сопротивления отсасывающей линии тяговой подстанции при расчетах может приниматься равной 0,5 Ом. Сопротивление контура заземле-

ния тяговой подстанции на участках с электротягой переменного тока может изменяться в пределах от 0,5 до 5,0 Ом [26]. За ноль при расчетах на схеме принята точка, в которой соединяются тяговые токи, возвращающиеся на тяговую подстанцию по рельсовым линиям и по земле.

Величина сигнального тока уменьшается по длине РЦ из-за его утечек через сопротивление изоляции рельсовой линии. Поэтому на схеме сигнальный ток во входном для него конце РЦ обозначен как \dot{I}_{CH} , а сигнальные токи на концах соответствующих отрезков рельсовой линии — \dot{I}_{C1} , \dot{I}_{C2} , и т. д.

Для составляющих тягового тока, протекающих по элементам рельсовой линии, приняты следующие условные обозначения:

\dot{I}_{TH} — тяговый ток, втекающий в РЦ;

\dot{I}_{TH1} , \dot{I}_{TH2} ; \dot{I}_{TK1} , \dot{I}_{TK2} — тяговые токи в дроссельных перемычках и в секциях основных обмоток дроссель-трансформаторов в начале и в конце соответствующих рельсовых нитей;

$\dot{I}_{P11} \dots \dot{I}_{P1n}$; $\dot{I}_{P21} \dots \dot{I}_{P2n}$ — тяговые токи в рельсах в конце соответствующих расчетных отрезков рельсовых нитей;

$\dot{I}_{Y11}, \dots, \dot{I}_{Y1n}$; $\dot{I}_{Y21}, \dots, \dot{I}_{Y2n}$ — тяговые токи, стекающие из рельсов в землю из соответствующих отрезков первой и второй рельсовых нитей.

Тяговые токи в начале РЦ \dot{I}_{TH1} и \dot{I}_{TH2} распределяются по рельсовым нитям обратно пропорционально их входным сопротивлениям Z_{BXH1}^{PH} и Z_{BXH2}^{PH} . Тяговые токи, текущие под приемными локомотивными катушками АЛС при вступлении головного электровоза на РЦ, распределяются обратно пропорционально входным сопротивлениям Z_{BX1n} и Z_{BX2n} , а при движении по i -му отрезку рельсовой линии — обратно пропорционально входным сопротивлениям Z_{BX1i} и Z_{BX2i} . Для схемы на рисунке 2 входные сопротивления — это сопротивления рельсовых нитей от начала РЦ или от первой колесной пары головного электровоза до нулевой точки. При расчетах для каждой из остальных РЦ в зоне между тяговыми подстанциями к ее выходу подключается входное сопротивление следующей по ходу тягового тока рельсовой цепи.

4. Расчет распределения коэффициента асимметрии тягового тока под катушками автоматической локомотивной сигнализации

Величина помех на рассматриваемую аппаратуру зависит от абсолютного значения разности (асимметрии) тяговых токов $\dot{I}_{AI} = \dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}$ в рельсовых нитях под приемными локомотивными катушками АЛС или в месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ. Эта асимметрия, в свою очередь, зависит от абсолютного значения разности сопротивлений рельсовых нитей $z_{PH1} - z_{PH2}$ в указанных точках рельсовой линии. При проведении контроля и расчетов более удобны относительные значения этих показателей — коэффициент асимметрии тягового тока в рельсовой линии k_{AI} и коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ} , вычисляемые по формулам:

$$k_{AI} = \frac{\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}}{\dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2}} = \frac{\dot{I}_{AI}}{\dot{I}_T}, \quad k_{AZ} = \frac{z_{PH1} - z_{PH2}}{z_{PH1} + z_{PH2}} = \frac{\Delta k_{AZ}}{z_{PH1} + z_{PH2}}; \quad (10)$$

где \dot{I}_T – тяговый ток в рельсовой линии в рассматриваемой точке.

Знак «плюс» или «минус» этих коэффициентов показывает, что в первой рельсовой нити сопротивление или тяговый ток соответственно больше или меньше.

Тяговый ток растекается по рельсовым нитям из дроссель-трансформатора, установленного на входном для тягового тока конце РЦ, или утекает вперед от головного электровоза под приемными локомотивными катушками АЛС обратно пропорционально входным сопротивлениям рельсовых нитей в этих точках рельсовой линии. Поэтому в таких точках $k_{AI} = k_{AZ}$.

Это равенство может нарушаться в других точках рельсовой линии, где условия протекания тягового тока зависят не только от асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, лежащих впереди по его ходу, но и от асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, по которым тяговый ток попадает в рассматриваемую точку.

При известных значениях коэффициентов асимметрии абсолютное значение разности сопротивлений рельсовых нитей находится по формуле $\Delta k_{AZ} = k_{AZ}(z_{PH1} + z_{PH2})$. На аппаратуру АЛС и РЦ мешающее влияние оказывает абсолютное значение разности тяговых токов в рельсовых нитях $\Delta \dot{I}_T$, которое называется асимметрией тягового тока и вычисляется по формуле $\Delta \dot{I}_T = \dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2} = k_{AI} \dot{I}_T = k_{AI}(\dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2})$.

Начинать расчеты распределения асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС по длине неоднородной рельсовой линии с входного для поезда конца РЦ невозможно. Для такого расчета надо знать, как меняются входные сопротивления рельсовых нитей по мере движения поезда. Но величина этих входных сопротивлений зависит от неизвестного пока характера распределения асимметрии тягового тока по длине лежащего впереди отрезка рельсовой линии и от величины переменного тягового тока в рельсах, которая может заметно меняться по длине этого отрезка.

Было показано, что из-за действия взаимной индуктивности рельсовых нитей процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии обладает своеобразной положительной обратной связью (рис. 3) [11].

Это обеспечило возможность вычислять коэффициент асимметрии тягового тока k_{AI} при известной величине коэффициента асимметрии электрического сопротивления рельсовых нитей k_{AZ} по простой формуле:

$$k_{AI} = k_{AZ} \frac{k_{ПР}}{1 - k_{ОС} k_{ПР}}, \quad (11)$$

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

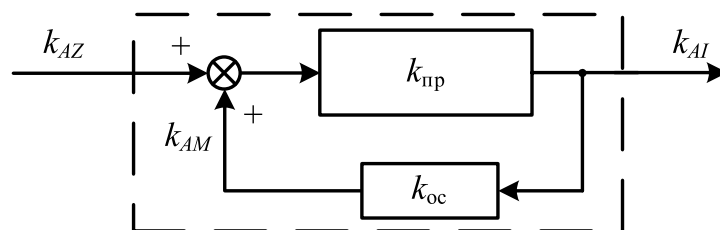


Рис. 3. Модель процесса формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии

Проведенные исследования показали, что в рельсовой линии с наиболее распространенными рельсами типа Р65 при токе частотой 50 Гц коэффициент обратной связи $k_{ос}$ в системе мало зависит от электрических параметров рельсовых нитей. При изменении удельного сопротивления рельсовых нитей в диапазоне от 0,3 до 0,6 Ом/км величина его отклоняется от среднего его значения $k_{ос} = 1,96$ на $\pm 0,03$.

Коэффициент передачи в прямом канале $k_{пр}$ является функцией сопротивления рельсов, изменяясь в диапазоне от 0,423 до 0,357.

В общем случае длины отрезков рельсовой линии могут быть различными, что требует их нумерации. Полные входные сопротивления рельсовых нитей для тягового тока от средних точек трехполюсников Π_{11} и Π_{21} первого отрезка рельсовой линии с учетом (1) и (2):

$$Z_{ВХ\Pi_{11}}^{\Pi} = \frac{(R_{P311} + R_{3\Pi})(0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC11}'' + Z_{M11}'' + Z_{ДПК1} + 0,25Z_{ДТ} + R_{ОЛ})}{R_{P311} + R_{3\Pi} + 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC11}'' + Z_{M11}'' + Z_{ДПК1} + 0,25Z_{ДТ} + R_{ОЛ}}; \quad (12)$$

$$Z_{ВХ\Pi_{21}}^{\Pi} = \frac{(R_{P321} + R_{3\Pi})(0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}'' + Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{ОЛ})}{R_{P321} + R_{3\Pi} + 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}'' + Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{ОЛ}}. \quad (13)$$

На выходном конце РЦ $(Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{ОЛ}) \gg 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}''$. Поэтому асимметрия тягового тока здесь мала, и ею можно пренебречь. Это позволяет при расчетах сопротивлений $Z_{ВХ\Pi_{11}}^{\Pi}$ и $Z_{ВХ\Pi_{21}}^{\Pi}$ считать, что $Z_{M11}'' = Z_{M21}'' = 0,5l_{OL1}j\omega M_{12}$.

Поскольку асимметрия тяговых токов \dot{I}_{P12} и \dot{I}_{P22} пока неизвестна, сначала вычисляются входные сопротивления рельсовых нитей первого отрезка рельсовой линии без учета магнитных сопротивлений, входящих в Z'_{11} и Z'_{21} :

$$Z_{ВХ11}^P = 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z'_{TC11} + Z_{ВХ\Pi_{11}}; \quad Z_{ВХ21}^P = 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z'_{TC21} + Z_{ВХ\Pi_{21}}. \quad (14)$$

Находится коэффициент асимметрии k_{AZ1} этих входных сопротивлений $Z_{ВХ11}^P$ и $Z_{ВХ21}^P$, а затем по формуле (11) находится численное значение коэффициента асимметрии для тягового тока k_{AI1} в этой точке рельсовой линии. Для

облегчения решения последней задачи можно использовать найденные зависимости величины коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI1} от величины коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ1} . График такой зависимости, построенный для рассматриваемых условий, приведен на рисунке 4.

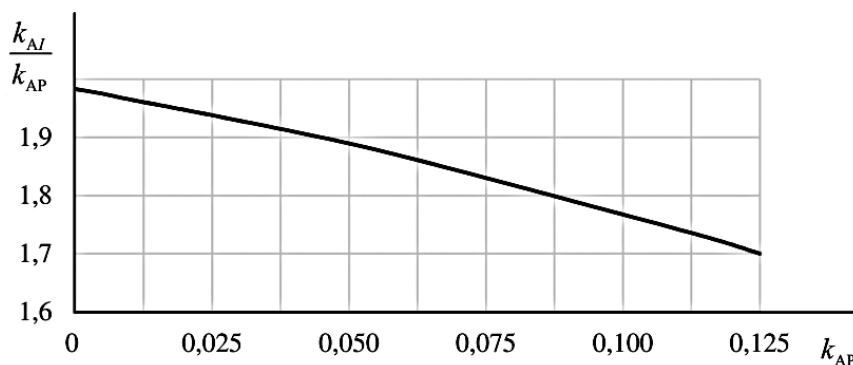


Рис. 4. Коэффициент асимметрии тягового тока в зависимости от величины коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей

Появление асимметрии суммы сопротивлений сплошных рельсов и сопротивлений токопроводящих стыков вызывает появление асимметрии сопротивлений их взаимной индуктивности, отчего асимметрия тягового тока в рельсовых нитях растет. При найденных значениях асимметрии тягового тока на входе первого отрезка рельсовой линии k_{AI1} сопротивления взаимной индуктивности, входящие в сопротивления Z'_{11} и Z'_{21} , при условии, например, когда $Z_{BX11}^P < Z_{BX11}^P$, можно найти по формулам:

$$Z_{M11} = 0,5l_{OL1} \frac{1-k_{AI}}{1+k_{AI}} z_M; \quad Z_{M21} = 0,5l_{OL1} \frac{1+k_{AI}}{1-k_{AI}} z_M. \quad (15)$$

Полные значения сопротивлений в левых плечах трехполюсников первого отрезка рельсовой линии:

$$Z'_{11} = 0,5l_{OL1} z_{CP} + Z'_{TC11} + Z_{M11}; \quad Z'_{21} = 0,5l_{OL1} z_{CP} + Z'_{TC12} + Z_{M21}. \quad (16)$$

С учетом этого входные сопротивления рельсовых нитей первого отрезков рельсовой линии:

$$Z_{BX11} = Z'_{11} + Z_{BX11}; \quad Z_{BX21} = Z'_{21} + Z_{BX21}. \quad (17)$$

В рассматриваемой модели рельсовой линии тяговые токи в рельсовых нитях между центральными точками смежных отрезков линии одинаковы. Поэтому можно считать, что асимметрия тягового тока по всей длине этих отрезков рельсовых нитей тоже одинакова. Это позволяет находить полные величины сопро-

тивлений Z_{12}'' и Z_{22}'' , используя формулы (15) и (16) и заменив в случае необходимости длину l_{OL1} на длину l_{OL2} . Тогда продольные для тягового тока сопротивления от средних точек Π_{12} и Π_{22} трехполюсников второго отрезка рельсовой линии:

$$Z_{\Pi_{12}}'' = Z_{TC12}'' + Z_{BX11}; \quad Z_{\Pi_{22}}'' = Z_{TC22}'' + Z_{BX21}. \quad (18)$$

Входные для тягового тока сопротивления от средних точек трехполюсников Π_{12} и Π_{22} второго отрезка рельсовой линии с учетом (1) и (2):

$$Z_{BX\Pi_{12}} = \frac{(R_{P312} + R_{3\Pi})(Z_{TC12}'' + Z_{BX11})}{R_{P312} + R_{3\Pi} + Z_{TC12}'' + Z_{BX11}}, \quad (19)$$

$$Z_{BX\Pi_{22}} = \frac{(R_{P322} + R_{3\Pi})(Z_{TC22}'' + Z_{BX21})}{R_{P322} + R_{3\Pi} + Z_{TC22}'' + Z_{BX21}}. \quad (20)$$

Далее расчеты проводятся по методике, рассмотренной для первого отрезка рельсовой линии, начиная от формулы (14).

Для остальных отрезков рельсовой линии расчеты проводятся тем же порядком, как и для второго отрезка этой линии. В результате находится характер изменения коэффициента асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС в отдельных точках по длине рельсовой линии.

Коэффициент асимметрии тягового тока в начале РЦ для случаев, когда $Z_{ДПН1} \neq Z_{ДПН2}$, находится по формуле:

$$k_{APЦ} = \frac{(Z_{ДПН1} + Z_{BX1n}) - (Z_{ДПН2} + Z_{BX2n})}{Z_{ДПН1} + Z_{BX1n} + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n} + Z_{ДТ} / 2}. \quad (21)$$

Как видно из (21), в схеме РЦ сопротивления секций основных обмоток ДТ, установленных на ее входном конце, играют роль балластных сопротивлений в схеме протекания тягового тока. Поэтому величина асимметрии тягового тока в месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ на входном конце меньше, чем величина асимметрии под приемными локомотивными катушками АЛС головного электровоза в момент его вступления на эту рельсовую цепь.

Входное сопротивление на рисунке 2 для тягового тока, вытекающего из рельсовой линии, это сопротивление воздушной отсасывающей линии тяговой подстанции R_{OL} . Для остальных РЦ, расположенных между тяговыми подстанциями, таким сопротивлением является входное сопротивление рельсовой цепи, расположенной дальше по ходу движения поездов. Таково входное сопротивление Z_{BX}^{PI} для предыдущей РЦ относительно рассматриваемой на рисунке 2:

$$Z_{BX}^{PI} = \frac{(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН1} + Z_{BX1n})(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n})}{Z_{ДПН1} + Z_{BX1n} + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n} + Z_{ДТ} / 2}. \quad (22)$$

Последовательно выполняемые расчеты позволяют находить распределение асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии при разных расстояниях от конкретной ее точки до конца РЦ. Этим обеспечивается возможность находить распределение асимметрии тягового тока под катушками АЛС движущегося по неоднородной рельсовой линии поезда.

На рисунке 5 приведен найденный график изменения коэффициента асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии длиной 1,6 м, оборудованной РЦ. При этом влияние на асимметрию тягового тока смежных рельсовых линий, контактных проводов и линий продольного электроснабжения не учитывалось для обеспечения чистоты компьютерного эксперимента.

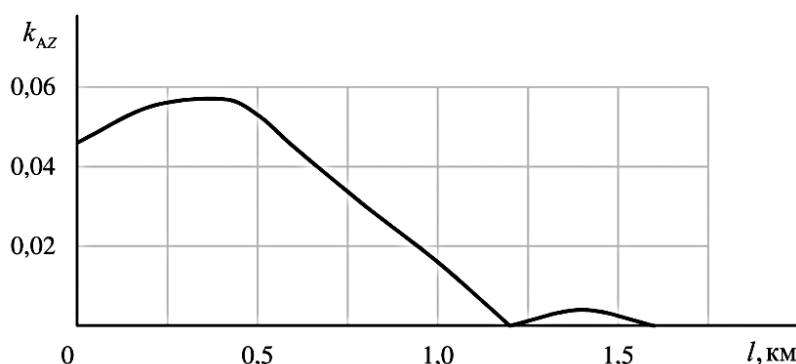


Рис. 5. Изменения коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей под приемными катушками АЛС при движении поезда

Рельсовая линия оборудована рельсами типа Р65 и дроссель-трансформаторами типа ДТ1-150. Температура рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, удельное сопротивление рельсов по отношению к земле $0,5\text{ Ом}\cdot\text{км}$, удельное сопротивление изоляции заземления контактных опор $2,0\text{ Ом}\cdot\text{км}$. На протяжении первых $0,4\text{ км}$ коэффициента асимметрии сопротивлений рельсов в рельсовых нитях равен нулю, а далее до конца РЦ равен $0,025$. На $0,6\text{ км}$ пробиты искровые промежутки в цепях заземления двух контактных опор, подключенных к рельсовой линии с меньшим продольным сопротивлением. На последних $0,4\text{ км}$ сопротивление рельсов больше у той рельсовой нити, к которой подключены заземления контактных опор.

В таких условиях коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей увеличивается от $0,045$ до $0,057$ при движении головного электровоза от начала РЦ до участка подключения к рельсам цепей заземления контактных опор с неисправными искровыми промежутками. Далее при движении поезда величина коэффициента асимметрии уменьшается до нуля за $0,4\text{ км}$ до конца РЦ за счет выравнивания утечек тягового тока из рельсовых нитей. На этом участке из рельсовой нити с большим продольным сопротивлением утечка тя-

гового тока в землю повышена через цепи заземления контактных опор, чем выравнивается его утечка из другой рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением.

При приближении к концу РЦ на величину сопротивлений отрезков рельсовых нитей растет выравнивающее действие суммарных сопротивлений секций основных обмоток дроссель-трансформаторов и дроссельных перемычек.

5. Расчет асимметрии тягового тока по длине неоднородной рельсовой линии

Абсолютное значение асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС \dot{I}_{AI} зависит от величины этого тока \dot{I}_T и коэффициента его асимметрии k_{AI} $\dot{I}_{AI} = k_{AI} \dot{I}_T$. Следовательно, график распределения величины асимметрии тягового тока под приемными катушками АЛС при движении поезда будет иметь вид графика, показанного на рисунке 5, только в другом масштабе.

Максимально допускаемая величина асимметрии переменного тягового тока для ДТ1-150, равная 15 А, найдена по условиям допускаемого их нагрева [29]. В соответствии с нормами [30] асимметрия переменного тягового тока не должна превышать 12 А в РЦ с дроссель-трансформаторами типа ДТ1-150 и 24 А в РЦ с дроссель-трансформаторами типа ДТ1-300. Какого-либо обоснования для этих норм нет. И непонятно, почему смена в РЦ дроссель-трансформаторов ДТ1-150 на ДТ1-300 сразу увеличивает в два раза предельную величину допускаемой помехи от тягового тока на аппаратуру АЛС и РЦ, т. е. повышает ее помехоустойчивость. Поэтому в качестве данной нормы обычно используется величина тока асимметрии 15 А [29].

Тяговый ток электровоза растекается по рельсовой линии в обе стороны от него, причем не всегда одинаково. При мерзлом грунте тяговый ток в рельсах под катушками АЛС и в местах подключения к рельсам аппаратуры РЦ может быть заметно больше тягового тока самого электровоза за счет тяговых токов других электровозов, движущихся в зоне между тяговыми подстанциями.

Путевые приемники РЦ могут находиться на ближнем для тягового тока конце, как показано на рисунке 2. Тогда при активном стекании переменного тягового тока из рельсов в землю по мере движения поезда к рельсовой цепи растут величина тягового тока в рельсах и абсолютное значение его асимметрии, что оказывает влияние на работу путевого приемника. В результате растет вероятность перекрытия на запрещающее показание светофора перед движущимся поездом.

Переменный тяговый ток активно стекает из рельсов в землю, поэтому при талом грунте ток электровоза в рельсах на расстоянии 3–4 км от него может быть меньше на порядок. Это способно вызывать заметные изменения величины сопротивления сплошных рельсов по длине рассматриваемого отрезка рельсовой

линии, отчего будут меняться условия протекания тягового тока, вызывая изменения коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

Если необходимо знать величину асимметрии тягового тока в рельсах на выходном для тягового тока конце для оценки ее влияния на расположенную там аппаратуру РЦ, то приходится проводить дополнительные расчеты. Асимметрия тягового тока на этом конце создается за счет постепенного изменения по длине рельсовых нитей величин тяговых токов и их разности из-за стекания токов из рельсов в землю. В неоднородных рельсовых линиях степень такого стекания меняется по длине рельсовых нитей, т. к. она является функцией соотношения продольного и поперечного сопротивлений нитей. Расчеты эти ведутся по ходу протекания тягового тока по рельсовой линии.

Тяговый ток \dot{I}_{TH} , втекающий в РЦ, распределяется по рельсовым нитям следующим образом:

$$\dot{I}_{TH1} = \dot{I}_{TH} \frac{(Z_{dT} / 4 + Z_{дпн2} + Z_{BX2n})}{Z_{дпн1} + Z_{BX1n} + Z_{дпн2} + Z_{BX2n} + Z_{dT} / 2}; \quad (23)$$

$$\dot{I}_{TH2} = \dot{I}_{TH} \frac{(Z_{dT} / 4 + Z_{дпн1} + Z_{BX1n})}{Z_{дпн1} + Z_{BX1n} + Z_{дпн2} + Z_{BX2n} + Z_{dT} / 2}. \quad (24)$$

Тяговые токи в рельсовых нитях в схеме на рисунке 2 между центральными точками n -го и $(n - 1)$ -го трехполюсников не меняются. Для следующего по ходу $(n - 1)$ -го отрезка первой рельсовой нити ток \dot{I}_{P1n} становится входным, как и для $(n - 1)$ -го отрезка второй рельсовой нити ток \dot{I}_{P2n} . Поэтому тяговые токи в рельсах на выходах n -х трехполюсников соответственно в первой и второй рельсовых нитях \dot{I}_{P1n} и \dot{I}_{P2n} можно находить по формулам:

$$\dot{I}_{P1n} = \dot{I}_{P1(n+1)} \frac{R_{P31n}}{R_{P31n} + Z_{1n}'' + Z_{BX1(n-1)}}; \quad (25)$$

$$\dot{I}_{P2n} = \dot{I}_{P2(n+1)} \frac{R_{P32n}}{R_{P32n} + Z_{2n}'' + Z_{BX2(n-1)}}. \quad (26)$$

Расчеты проводятся вплоть до получения численных значений величин выходных токов в рельсовых нитях \dot{I}_{TK1} и \dot{I}_{TK2} . Разность этих токов и является абсолютным значением величины асимметрии тягового тока в этом месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ.

При расчетах по этим формулам численные значения величин сопротивлений берутся из результатов расчетов в п. 4 входных для тягового тока сопротивлений от средних точек соответствующих трехполюсников.

Схема замещения рельсовой линии при этих расчетах представляет собой лестничную схему. Расчеты с ее использованием показывают, что, например,

при удельном сопротивлении изоляции рельсовой линии $1,0 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ в пределах РЦ с дроссель-трансформаторами длиной $1,5 \text{ км}$ в землю из рельсовой нити утекает почти две трети первой гармоники переменного тягового тока частотой 50 Гц , поступающего в нее. Такое изменение величины тягового тока приводит к уменьшению более чем в $1,5$ раза величины активного сопротивления рельсов, в то время как сопротивление токопроводящих стыков практически не меняется [21]. В результате коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей растет.

На участках железных дорог с большими переменными тяговыми токами их существенное уменьшение по длине рельсовой линии в пределах РЦ может вызвать необходимость использования итераций, т. е. повторения уточняющих расчетов по результатам найденного характера распределения величины тягового тока по длине рельсовой линии.

6. Вопросы нормирования уровня помех

Нормировать уровень помех от тягового в рельсах на АЛС только по величине тока асимметрии не очень корректно. При таком нормировании не учитывается гармонический состав тягового ток, который существенно влияет на устойчивость работы аппаратуры АЛС из-за разной эффективности его фильтров на разных частотах. К тому же амплитуда наводимого напряжения в приемных локомотивных катушках АЛС пропорциональна частоте гармоник тягового тока в рельсах. А устойчивость работы АЛС зависит еще и от серии электровоза, на котором работает эта аппаратура.

Если рельсовая линия однородна, то локомотивная аппаратура АЛС работает в наихудших условиях при вступлении головного электровоза на РЦ, когда уровень сигнального тока под приемными локомотивными катушками минимален. В неоднородных рельсовых линиях картина не так однозначна, поскольку асимметрия входных для тягового тока сопротивлений рельсовых нитей и зависящая от нее асимметрия тягового тока могут сильно изменяться при движении поезда по РЦ. Это подтверждают результаты анализа мест возникновения сбоя АЛС.

Если не учитывать сопротивления токопроводящих стыков, то и для локомотивного приемника АЛС, и для путевого приемника РЦ наиболее благоприятными будут условия, когда сопротивление сплошных рельсов минимально, а сопротивление изоляции рельсовой линии максимально, т. е. при отрицательных температурах внешней среды. Однако при уменьшении сопротивления сплошных рельсов начинает сильнее сказываться неравномерность распределения по длине рельсовых нитей величин сопротивлений токопроводящих стыков. Это может вызывать рост асимметрии сопротивлений рельсовых нитей и тягового тока. Такие рассуждения справедливы, когда сигнальный ток и для РЦ, и для АЛС вырабатывается одним путевым генератором.

Увеличение неоднородности продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей по мере эксплуатации верхнего строения пути увеличивает различия величины утечек тягового тока из рельсов в землю по длине рельсовой линии.

Условия протекания тягового и сигнального токов по рельсовой линии различны. На сигнальный ток не действуют сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей между собой или с другими токонесущими линиями. А поперечным сопротивлением для него является распределенная по длине рельсовой линии проводимость изоляции между рельсовыми нитями. Но степень утечки сигнального тока из одной рельсовой нити в другую зависит также от распределения по длине рельсовой линии соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений.

Наихудшее условие для устойчивости работы локомотивного приемника АЛС — когда головной электровоз вступает на РЦ. Поэтому при расчетах и регулировке РЦ в режиме АЛС должно выполняться требование, при котором ток АЛС на входном для поезда конце РЦ (на выходном ее конце для тока АЛС) не меньше нормативного — тогда локомотивный приемник работает устойчиво. Величина этого тока через нормативный поездной шунт сопротивлением 0,06 Ом зависит от рода тяги и частоты сигнального тока. Расчеты проводятся для однородных рельсовых линий при наихудших для режима АЛС условиях с использованием теории четырехполюсников [13, 14]. При расчетах могут использоваться усредненные по длине РЦ величины продольного и поперечного сопротивлений неоднородной рельсовой линии [15].

По мере движения поезда к месту установки путевого генератора сигнальный ток АЛС растет. Следовательно, растет и величина его напряжения на приемных локомотивных катушках. Уровень помех от тягового тока в рельсах при этом тоже может повышаться, если рельсовая линия неоднородна. Если темп нарастания на локомотивных катушках напряжения помех выше темпа нарастания сигнального напряжения на них, то при нормальной регулировке РЦ в режиме АЛС растет вероятность сбоев в работе локомотивной аппаратуры. Причем эта вероятность зависит еще от серии электровоза и режимов работы его силового электрооборудования [8].

Более объективным считается нормирование уровня помех на аппаратуру РЦ и АЛС по величине отношения сигнал/помеха. Это обеспечивает разработку обоснованных требований к эффективности фильтров, используемых в аппаратуре АЛС и РЦ, а также требований к качеству содержания токопроводящих и электроизолирующих элементов в рельсовых линиях. Но такое нормирование связано с учетом большего количества факторов, влияющих на устойчивость работы АЛС и РЦ.

В силу ограниченного объема статьи рассмотрена методика проведения расчетов только для однопутного перегона. Расчеты для многопутных перегонов или для станций принципиально не отличаются, но приходится учитывать боль-

шее количество влияющих линий из-за наличия взаимной индуктивной связи с ними [25].

Расчеты входных сопротивлений отрезков рельсовых нитей, распределения вдоль неоднородной рельсовой линии величины тяговых токов и их асимметрии имеют алгоритмический характер, что удобно для программирования и использования при расчетах цифровых ЭВМ.

Проведенные расчеты с использованием предложенной методики показали хорошее совпадение результатов расчетов с результатами измерений в условиях эксплуатации.

Заключение

Основным источником помех на работу аппаратуры рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации на участках железных дорог с электротягой являются тяговые токи в тяговой сети. Возникают помехи при появлении асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии, вызывающей асимметрию тягового тока в ней.

Величина асимметрии тягового тока зависит от многих факторов и может быстро меняться вследствие изменения электромагнитной обстановки на участке пути, а уровень помех на аппаратуру автоматической локомотивной сигнализации в значительной степени определяется еще и электромагнитной обстановкой на электровозе. Поэтому относительно сложная экспериментальная оценка электромагнитной обстановки на определенном участке железной дороги не всегда обеспечивает достоверное определение причин сбоев в работе аппаратуры и не дает возможности прогнозировать изменение этой обстановки.

Автором статьи на основе анализа электрических и электромагнитных процессов разработана методика расчетов асимметрии тяговых токов под приемными локомотивными катушками автоматической локомотивной сигнализации при движении поезда по длине неоднородной рельсовой линии. Создана также методика расчетов асимметрии тяговых токов в местах подключения к рельсам неоднородной рельсовой линии аппаратуры рельсовых цепей. Рассмотрены вопросы нормирования уровня помех в рассматриваемой аппаратуре.

Расчеты входных сопротивлений отрезков рельсовых линий, распределения величины тяговых токов и их асимметрии по длине рельсовой линии имеют алгоритмический характер, что позволяет проводить расчеты на цифровых ЭВМ.

Методика позволяет оценивать электромагнитную обстановку на конкретных участках железных дорог и обеспечивает возможность прогнозирования изменения обстановки при изменении интенсивности движения и/или веса поездов.

Библиографический список

1. *Vantuono W.* Train control systems in the United States / W. Vantuono // *Internationale Railway Journal*. – 2009. – N 10. – P. 32–36.
2. *Büssmann F.* Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büssmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // *Signal und Draht*. – 2016. – Vol. 108, N 10. – P. 6–11.
3. *Шаманов В. И.* Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В. И. Шаманов // *Автоматика на транспорте*. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 223–240.
4. *Розенберг Е. Н.* Инновационные технологии управления движением поездов / Е. Н. Розенберг // *Автоматика, связь, информатика*. – 2017. – № 10. – С. 2–4.
5. *Sauer C.* Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtliding / C. Sauer // *Eisenbahningenieur*. – 2014. – Vol. 65, N 7. – P. 25–30.
6. *Pachl J.* Railway Operation and Control. 3rd edition / J. Pachl. – Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014. – 284 p.
7. *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. – N 4. – P. 9–11.
8. *Shamanov V.I.* Influence of traction currents on stability of work equipment of railway automation / V.I. Shamanov // *Sciences of Europe*. – 2019. – Vol. 1, N. 37. – P. 53–59.
9. *Бадер М. П.* Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
10. *Bestem'yanov P.F.* On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanics channels of subway lines / P.F. Bestem'yanov, I. G. Gorlin // *Russian Electrical Engineering*. – 2016. – Vol. 87, N. 9. – P. 493–497.
11. *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, September 14–17. – 2018. – P. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018*
12. *Котляренко Н. Ф.* Электрические рельсовые цепи / Н. Ф. Котляренко. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.
13. *Брылеев А. М.* Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
14. *Лисенков В. М.* Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход) / В. М. Лисенков. – М.: ВИНТИ РАН, 2014. – 202 с.
15. *Кравцов Ю. А.* Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики / Ю. А. Кравцов, П. Е. Мащенко, Е. Г. Щербина. – М.: МИИТ, 2012. – 117 с.
16. *Шаманов В. И.* Компьютерное моделирование динамики переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – Иркутск: ИрГУПС, 2008. – № 1. – С. 55–60.
17. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.
18. *Карни Ш.* Теория цепей. Анализ и синтез / Ш. Карни. – М.: Связь, 1985. – 368 с.
19. *Зевеке Е. Г.* Основы теории цепей / Е. Г. Зевеке, П. А. Ионкин. – М.: Энергия, 1975. – 751 с.

20. *Аркатов В. С.* Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
21. *Шаманов В. И.* Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты / В. И. Шаманов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2018. – 304 с.
22. ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Издательство стандартов, 2010. – 55 с.
23. Свод правил «Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования». СП 235.1326000.2015. – Утв. приказом Минтранса России № 205 от 06.07.2015 г. – 176 с.
24. *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. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – Вып. 126. – 220 с.
25. *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, N. 8. – P. 509–512.
26. *Shamanov V.I.* Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls / V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, N 10. – P. 566–571.
27. *Карякин Р. Н.* Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1987. – 168 с.
28. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – М.: ТРАНСИЗДАТ, 2002. – 184 с.
29. *Котельников А. В.* Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, А. П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
30. Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 22 с.

V.I. Shamanov

*The department of "Automation, Remote Control and Telecommunication on Railway Transport",
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

CALCULATIONS OF INTERFERENCE FROM TRACTION CURRENT IN NONHOMOGENEOUS TRACK LINES

Track circuits and automatic cab signaling are not stable at the electrified railway sections due to interference effect caused by traction current. The process of noise generation depends on a variety of factors that is why it is quite difficult to identify the reasons for generation of unacceptable noise level. The process of noise measurement under service conditions for the assessment of electromagnetic environment in the electric traction network and electric locomotives is complicated and demands considerable amount of time and resources on its fulfillment. Electromagnetic environment may change rapidly, while the results of such measurement are hard to extrapolate to other conditions of traffic intensity or/and different weight and speed of trains at this section, as well as other railway sections. The above-mentioned proves that the theoretical research and the elaboration of noise level calculation methods for railway automation and remote control facilities in question under different service conditions are topical in the given field of study.

Interference from traction current in these facilities appears when asymmetry of longitudinal and/or lateral resistance of track ways takes place. Some results of elaboration of calculation methods were stated in the article identifying the behavior of change in the level of noise from traction current along non-homogenous track lines equipped with track circuits. Electrically long track ways are presented as a cascade of three-terminal devices. The length of these segments is selected on condition that the required accuracy of calculations is provided. The analysis of traction current asymmetry occurrence in the track line becomes complicated due to mutual inductance between its track ways. That is why for calculation of the traction current asymmetry coefficient in a track line the obtained interconnections of the former with an asymmetry coefficient of the track way electrical resistance are used. Harmonic components of traction current that create interference, as well as the dependency of electrical resistance of track from its temperature and the amount of traction current in them are taken into account during calculations. As a result, variation in the traction current asymmetry under sending coils of automatic cab signaling during train operation was found. Moreover, magnitudes of the given asymmetry in places where the track circuit equipment is connected with the track were determined.

Such calculations make it possible to find out the contribution of traction currents in the track into the noise level of track circuit and automatic cab signaling equipment. The elaborated algorithm is convenient for computer calculations. The fact that mutual induction of the track ways with track ways and contact wires of other track lines, as well as with longitudinal power supply lines, is taken into account makes it possible to apply the elaborated method in calculations at multi-lane blocks and stations. Calculations in question may be applied both during the assessment of electromagnetic environment at a specific track section in the present period or other operating conditions and for the prediction of changes in the environment in case of alterations in traffic intensity or/and weight of trains.

Track circuits, automatic cab signaling, track ways, electrical resistance, mutual induction, traction current, asymmetry, interference, calculations.

DOL: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267

References

1. Vantuono W. (2009) Train control systems in the United States. *International Railway Journal*, 2009, no. 10, pp. 32–36.
2. Büssmann F., Scheier B., Brinkmann F. & Jäder B. (2016) Wirtschaftlichkeit eines satellitengestützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken. *Signal und Draht*, 2016, vol. 108, no. 10, pp. 6–11.
3. Shamanov V.I. (2018) Sistemy intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s tsifrovymy radiokanalami [Interval train control systems with digital radio channels]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 223–240. (In Russian)
4. Rosenberg E.N. (2017) Innovatsionniye tekhnologii upravleniya dvizheniyem poezdov [Innovative technologies for train dispatching]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, telecommunication, information science]*, 2017, no. 10, pp. 2–4. (In Russian)
5. Sauer C. (2014) Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimhaltung. *Eisenbahningenieur*, 2014, vol. 65, no. 7, pp. 25–30.
6. Pacht J. (2014) Railway Operation and Control. 3rd edition. Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace Publ., 2014, 284 p.
7. Watanabe I. & Takashige T. (1989) Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit. *Quarterly Reports of RTRI*, 1989, no. 4, pp. 9–11.

8. *Shamanov V.I.* (2019) Influence of traction currents on stability of work equipment of railway automation. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 1, no. 37, pp. 53–59.
9. *Bader M.P.* (2002) Elektromagnitnaya sovместimost [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS [Educational and Methodological Office of the Ministry of Railways] Publ., 2002, 638 p. (In Russian)
10. *Bestem'yanov P.F. & Gorlin I.G.* (2016) On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanics channels of subway lines. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 9, pp. 493–497.
11. *Shamanov V.* (2018) 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, September 14–17, 2018, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018
12. *Kotlyarenko N.F.* (1961) Elektricheskiye relsovyye tsepy [Electric track circuits]. Moscow, Transzheldorizdat, 1961, 327 p. (In Russian)
13. *Bryleev A.M., Kravtsov Yu.A. & Shishlyakov A.A.* (1978) Teoriya, ustroystvo i rabota relsovykh tsepey [Theory, structure and functioning of track circuits]. Moscow, Transport Publ., 1978, 344 p. (In Russian)
14. *Lisenkov V.M.* (2014) Metody analiza i sinteza relsovykh tsepey (statisticheskii podkhod) [Methods of analysis and synthesis of track circuits (statistical approach)]. Moscow, VINITI RAN [All-Union Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2014, 202 p. (In Russian)
15. *Kravtsov Yu.A., Mashchenko P.E. & Shcherbina E.G.* (2012) Elektromagnitnoye vliyaniye perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki [Electromagnetic influence of an advanced electric stock on railway automation facilities]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2012, 117 p. (In Russian)
16. *Shamanov V.I. & Trofimov Yu.A.* (2008) Kompyuternoye modelirovaniye dinamiki peremennogo tyagovogo toka v relsakh pod katushkami ALSN [Computer modeling of alternating traction current dynamics in rails under CACS coils]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2008, no. 1, pp. 55–60. (In Russian)
17. *Bessonov L.A.* (2000) Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektricheskiye tsepy [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2000, 638 p. (In Russian)
18. *Karni Sh.* (1985) Teoriya tsepey. Analiz i sintez [Circuit theory. Analysis and synthesis]. Moscow, Svyaz [Telecommunication] Publ., 1985, 368 p. (In Russian)
19. *Zeveke E.G. & Igolkin P.A.* (1975) Osnovy teorii tsepey [Foundations of the circuit theory]. Moscow, Energiya [Power] Publ., 1975, 751 p. (In Russian)
20. *Arkatov V.S., Kravtsov Yu.A. & Stepenskiy B.M.* (1990) Relsoviye tsepy. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye [Track circuits. Performance support and maintenance operation]. Moscow, Transport Publ., 1990, 295 p. (In Russian)
21. *Shamanov V.I.* (2018) Pomekhy na apparaturu relsovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Disturbances in signal track circuit and automatic train control equipment. Security facilities]. Moscow, “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte” [“Training and Methodology Centre for Railway Transport”], 2018, 304 p. (In Russian)
22. GOST 9.602–2005. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemniye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii* [State Standard 9.602–2005. Unified system of protection from corrosion and ageing. Underground structures. General

- regulations to protection from corrosion]. Moscow, Izdatelstvo standartov [Publishing House of Standards], 2010, 55 p. (In Russian)
23. *Svod pravil "Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proektirovaniya"* [Set of rules «Railway automation and remote control. Design norms»]. SP [Set of Rules] 235.1326000.2015. Utverzhden prikazom Mintransa Rossii [Approved by the order of the Russian Federation Ministry of Transport] № 205 dated July 6th, 2015, 176 p. (In Russian)
 24. *Vakhnin M. I., Penkin N. F., Pokrovskiy M. A., Pugnn D. K. & Talykov A. A.* (1956) *Ustroistva STsB pry elektrodyage peremennogo toka* [Signaling arrangement under the electric traction of alternating current]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. Moscow, Transzheldorizdat, 1956, iss. 126, 220 p. (In Russian)
 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*, 2015, vol. 86, no. 8, pp. 509–512.
 26. *Shamanov V. I.* (2016) Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 10, pp. 566–571.
 27. *Karyakin R. N.* (1987) *Tyagoviye sety peremennogo toka* [Alternating current traction network]. Moscow, Transport Publ., 1987, 168 p. (In Russian)
 28. *Pravila ustroistva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy sety elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868)* [Rules for design and maintenance of catenary for electrified railways (TsE-868)]. Moscow, TRANSIZDAT, 2002, 184 p. (In Russian)
 29. *Kotelnikov A. V., Naumov A. V. & Slobodyanyuk A. P.* (1990) *Relsoviye tsepy v usloviyakh vliyaniya zazemlyayushchikh ustroystv* [Track circuits under the influence of grounding devices]. Moscow, Transport Publ., 1990, 215 p. (In Russian)
 30. *Ustroistva i element relsovykh liniy i tyagovoy relsovoy sety. Tekhnicheskiye trebovaniya i normy sodержaniya* [Facilities and elements of track lines and electric traction network. Technical requirements and maintenance standards]. Moscow, ОАО "Russian Railways" Publ., 2010, 22 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 20.03.2020, принята к публикации 26.03.2020*

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., 2020