

Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей

П. С. Пинчуков✉, С. И. Макашева

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

Резюме

Статья посвящена актуальной проблеме повышения устойчивости функционирования рельсовых цепей железных дорог переменного тока. Установлено, что при регулярном движении тяжеловесных поездов повышение потенциала «рельс – земля» служит не только причиной сбоев в работе рельсовых цепей, но и вызывает различные нарушения в работе всех профильных служб железной дороги, участвующих в организации движения поездов. Для исследования работы рельсовых цепей была разработана имитационная модель электрифицированной железной дороги переменного тока в среде Matlab на примере участка Завитая – Короли Забайкальской железной дороги. Проведена оценка степени влияния параметров путевых дроссель-трансформаторов и переходного сопротивления балластного слоя на величину потенциалов «рельс – земля». В имитационную модель были заложены параметры системы тягового электроснабжения участка и реального графика движения поездов при условии нахождения на четном пути максимально возможного количества поездов повышенной массы. На основании исполненных в программном комплексе «Кортэс» тяговых расчетов определены токи поездов, величины обратного тягового тока и токов по участкам электрической цепи межподстанционной зоны. Проведенное имитационное моделирование показало, что на распределение по длине пути потенциала «рельс – земля» существенное влияние оказывает активное сопротивление путевых дроссель-трансформаторов. При этом под воздействием значительных по величине тяговых токов тяжеловесных поездов при неизменном сопротивлении балластного слоя происходит формирование потенциалов «рельс – земля», превышающих по своей величине пробивное напряжение искровых промежутков опор контактной сети. Выявлено, что рост потенциала в значительной степени связан с повышением активного сопротивления путевых дроссель-трансформаторов. Отмечено, что в условиях эксплуатации изменение состояния балластного слоя при его увлажнении и промерзании также приводит к появлению потенциалов, превышающих пробивное напряжение искровых промежутков, что является существенным ограничением для дальнейшего наращивания масс поездов и интенсивности движения по железнодорожным участкам Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, рельсовая цепь, путевой дроссель-трансформатор, обратный тяговый ток, потенциал «рельс – земля»

Для цитирования

Пинчуков П.С. Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 40–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).00-

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.08.2021, поступила после рецензирования: 07.09.2021, принята к публикации: 17.09.2021

Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation

P. S. Pinchukov✉, S. I. Makasheva

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

Abstract

The paper deals with the urgent problem of increasing the stability of the functioning of the AC railways electric track circuits. It was found that under the regular heavy haul traffic the "rail-ground" potential increase not only results in failures of the rail circuits operation, but also leads to various breaches in the work of all railway departments involved in the organization of train traffic. A simulation model of an AC electrified section on the example of the Zabaikalskaya railway has been developed based on MATLAB software platform. Influence of track impedance bond parameters and the ballast transient resistance on the rail potential value was estimated. The simulation model included the power supply system parameters for the section considered and the real train schedule, provided that the maximum possible number of heavy trains is on the track. Based on the traction calculations performed in the KORTES software the train currents, the reverse traction current and currents in the track sections of inter substation zone are calculated. A research of track impedance bond parameters influence on the rail potentials (RPs) has been carried out. The simulation modeling showed that the distribution of the "rail-ground" potential along the length of the substation

zone is significantly influenced by the active resistance of the track throttle transformer impedance bond. At the same time, with the constant value of the ballast resistance, a change in the resistance of the track impedance bond due to humidification and freezing under the influence of large traction currents causes the appearance of potentials exceeding the disruptive voltage of the spark gaps. It was revealed that the rail potential growth is largely associated with the track impedance bond's active resistance increase. It is noted that humidification and freezing of the ballast layer also leads to the appearance of potentials exceeding the breakdown voltage of spark gaps, which is a significant limitation for the further increase of train weight and traffic intensity for the Siberian and the Far Eastern railways.

Keywords

power supply system, track circuit, track impedance bond, traction return current, rail potential

For citation

Pinchukov P. S., Makasheva S. I. Analiz vliyaniya obratnogo tyagovogo toka na rabotu rel'sovyh cepej [Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 3 (71), pp. 40–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).40-49

Article info

Received: 30.08.2021, Revised: 07.09.2021, Accepted: 17.09.2021

Введение

На российский железнодорожный транспорт по данным за 2019 г. приходится 46 % всего грузооборота страны. Без учета трубопроводного транспорта, который в большей степени ориентирован на экспорт, доля железнодорожного транспорта России составляет уже 87 %, или порядка 1 млрд т в год [1]. Растущие показатели грузооборота на железной дороге в настоящее время достигаются повышением весовых норм, длин поездов и интенсивности их движения, что приводит к значительному росту тяговых токов.

Протекание по элементам системы тягового электроснабжения и рельсовым цепям (РЦ) величин токов, значительно превосходящих проектные значения, затрудняет работу элементов тяговых подстанций, контактной сети, устройств релейной защиты и автоматики, устройств сигнализации, централизации и блокировки [2–7].

Актуальность проблемы и постановка задачи

Ходовые рельсы в системе тягового электроснабжения используются в качестве обратного проводника для возврата (канализации) тяговых токов на питающие тяговые подстанции. Преимуществом такого технического решения является отсутствие дополнительных проводников для канализации тока и возможность заземления токопроводящих конструкций на рельс для обеспечения условий электробезопасности, а недостатками – проблемы с возникающими нежелательными потенциалами рельса относительно земли по длине межподстанционной зоны и паразитными токами утечки через переходное сопротивление «рельс – земля» [6–8].

Значительные тяговые нагрузки при тяжеловесном движении становятся причиной появления повышенных потенциалов «рельс – земля» по длине пути, что затрудняет функционирование устройств, относящихся к службе путевого хозяйства (ПЧ), а также нарушает требования электробезопасности [5, 6, 8].

При росте потенциалов «рельс – земля» ухудшаются условия функционирования заземленного на рельс оборудования службы электрификации и электроснабжения (ЭЧ), учащаются проблемы, связанные с работой устройств заземления опор контактной сети и других заземленных устройств [2, 3, 5, 6, 8]. Так, повышение потенциалов «рельс – земля» по длине пути особенно негативно проявляется вблизи опор контактной сети (КС), имеющих в цепи заземления искровые промежутки (ИП) и газоразрядные приборы защиты (ГРПЗ). При тяжеловесном движении в нормальном режиме работы значения формирующихся потенциалов «рельс – земля» могут превысить номинальные значения напряжения срабатывания для ИП и ГРПЗ и вызвать их пробой. В этом случае опора КС «разземляется», и при возникновении короткого замыкания на ней релейная защита фидера контактной сети (ФКС) может не сработать. Такая ситуация для ЭЧ крайне нежелательна, так как вынужденный перерыв в электроснабжении приводит к срыву графика движения поездов [5, 6, 10, 11].

Пробой приводит к опасной утечке тока с рельсов через арматуру и бетон опоры и переходное сопротивление «рельс – земля», что вызывает асимметрию тягового тока и образует ряд проблем в работе устройств, относящихся и к другим службам железной дороги.

РЦ используют в качестве проводника рельсовых нитей железнодорожного пути, они являются частью систем автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и авторегулировки для контроля состояний занятости участков пути и целостности рельсовой линии [9–11]. Возникновение при тяжеловесном движении сверхнормативной асимметрии обратного тягового тока негативно сказывается на работе устройств АЛС, затрудняя передачу кодовых сигналов на борт локомотива и усложняя работу локомотивной службы (ТЧ) [7].

Для канализации обратного тягового тока в обход изолирующих стыков рельсовой линии применяются дроссель-трансформаторы (ДТ), которые имеют различные конструкции и номинальные мощности в зависимости от величин протекающих обратных тяговых токов [7–11]. К вторичной сигнальной обмотке ДТ подключается аппаратура РЦ, относящаяся к службе сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ) [6–12].

Неустойчивая работа аппаратуры РЦ может приводить к ложной смене показаний напольных светофоров, в результате чего поезд будет ложно замедлять ход, вызывая снижение пропускной способности участков железных дорог [12–14].

Перекрытие же показаний путевого светофора перед движущимся поездом приводит к авто-стопному торможению, вызывающему дискомфорт у пассажиров (что чревато травмами различной тяжести от испуга, падения и т. п.). В грузовом движении резкие торможение и остановка поезда могут вызывать дефекты на колесах («ползуны»), а в ряде случаев при неудачном формировании поезда вероятны случаи выдавливания легких вагонов из состава поезда [12–14].

Таким образом, устойчивость функционирования электрических рельсовых цепей касается как минимум четырех служб железной дороги и необходима для обеспечения безопасности, бесперебойности и надежности перевозочного процесса. Задачей проводимого исследования является оценка степени влияния обратного тягового тока на параметры элементов рельсовых цепей для поиска решений по уменьшению числа отказов РЦ.

Поскольку наиболее острые проблемы в работе службы электрификации и электроснабжения, вызванные протеканием обратного тягового тока по

РЦ сопряжены с работой ИП и ГРПЗ, объектом исследования становится РЦ, содержащая ДТ, а предметом исследования – формирование потенциала по длине межподстанционной зоны с учетом тяжеловесного движения.

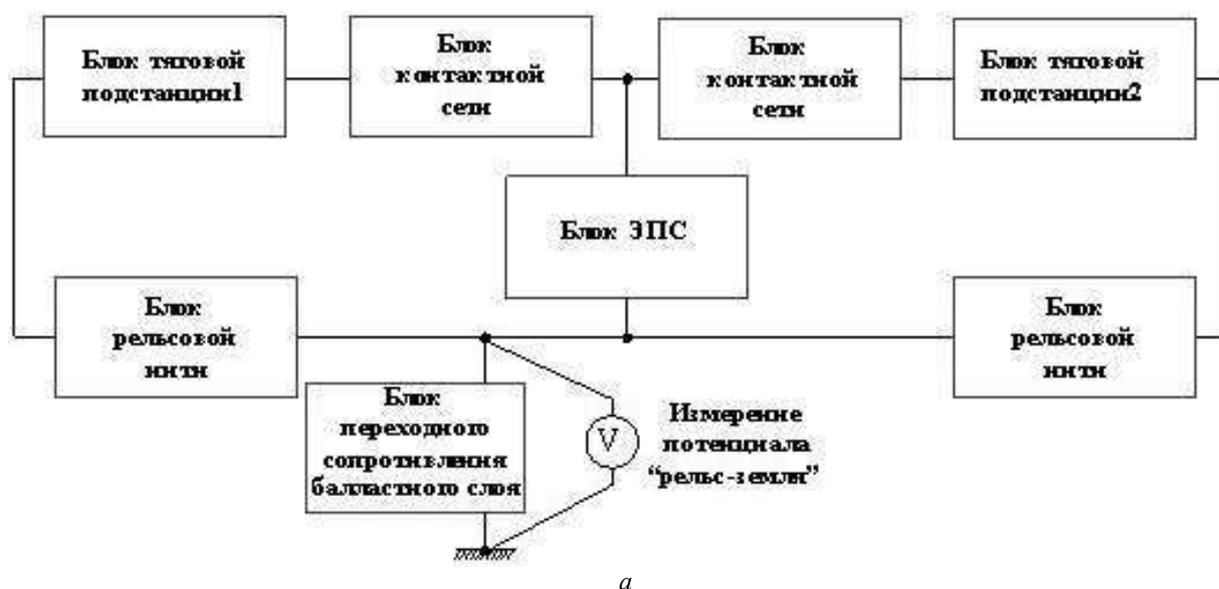
Применяемые методы исследования и этапы построения имитационной модели

Работу РЦ на участках электрической тяги переменного тока характеризуют быстроизменяющиеся в широком диапазоне и резкопеременные параметры, оценку которых целесообразнее всего вести с применением имитационного моделирования на основе современных программных комплексов, к примеру, при помощи системы компьютерной математики Matlab, включающей расширение Simulink.

На примере участка Короли – Завитая Забайкальской железной дороги была разработана модель двухпутного участка тягового электроснабжения протяженностью 51,1 км, напряжением 25 кВ, 50 Гц с кодовыми РЦ, работающими на сигнальной частоте 25 Гц.

При выборе параметров схем замещения для реализации элементов имитационной модели были приняты допущения [10–12, 15–17]. Упрощенная структурная схема имитационной модели, состоящая из модульных блоков элементов системы тягового электроснабжения сети и РЦ, а также схема расположения электроподвижных составов (ЭПС) приведены (рис. 1).

Дополнительный учет тяговых токов электровазов дает более широкие возможности при моделировании распределения обратных тяговых токов в рельсах и потенциалов «рельс – земля» [15], поэтому важным было моделирование поездной



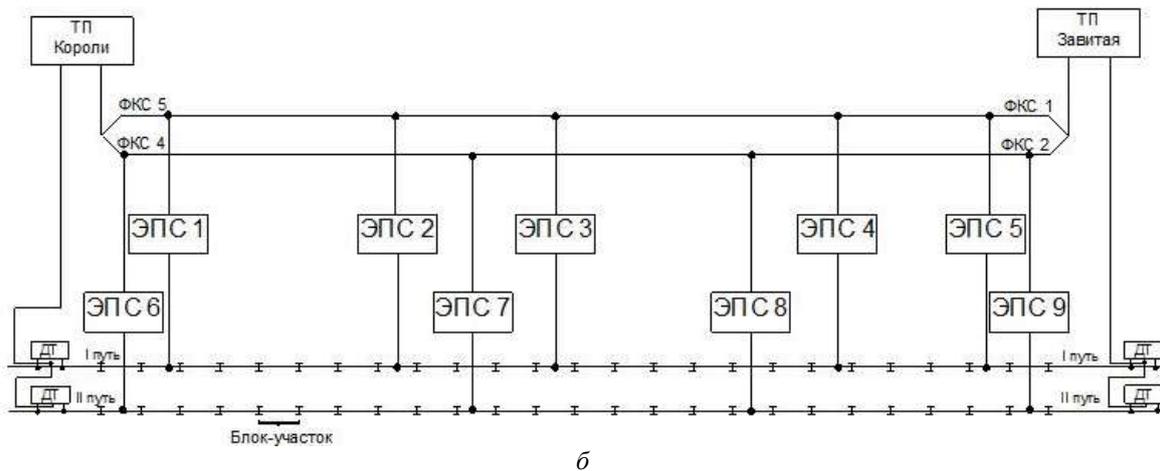


Рис. 1. Этапы построения имитационной модели участка железной дороги переменного тока:
 а – упрощенная структурная схема модели; б – моделирование поездной ситуации

Fig. 1. Stages of creating a simulation model of an AC railway section:
 a – a simplified structural model scheme; b – train situation simulation

ситуации, максимально приближенной к реальным условиям эксплуатации.

Для задания нагрузок необходимо было выбрать расчетный график движения поездов (ГДП), задать местоположение и величину тяговых нагрузок. Для этого из автоматизированной системы ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» [18] в работу был взят реальный график движения поездов (рис. 2).



Рис. 2. Фото расчетного графика движения поездов

Fig. 2. Photo of the train's schedule

Для рассмотрения была взята тяжелая поездная ситуация на межподстанционной зоне Короли – Завитая Забайкальской железной дороги, где одновременно находится девять поездов:

– пять поездов на нечетном пути (обозначены номерами 1–5) (см. рис. 1, б), ЭПС получают питание от пятого фидера контактной сети (ФКС 5);

– четыре поезда на четном пути (обозначены номерами 6–9) (см. рис. 1, б), ЭПС получают питание от ФКС 4.

При моделировании РЦ была разбита на отдельные блок-участки длиной 1–2,5 км каждый.

Марка контактной подвески ПБСМ-95+МФ-100, марка рельса – Р65. На рассматриваемом участке эксплуатируются ДТ-1-300. В имитационной модели для опор контактной сети предусмотрено наличие ИП-3 при присоединении к рельсу.

Зная местоположения и массы поездов на рассматриваемом участке, а также типы ЭПС и параметры схемы тягового электроснабжения, далее были проведены расчеты в программном комплексе «Кортэс» и определены тяговые токи, потребляемые ЭПС в схеме (см. рис. 1, а).

Рассчитанные значения тяговых токов были занесены в разработанную имитационную модель.

Фрагмент итоговой имитационной модели участка Завитая – Короли Забайкальской железной дороги представлен на (рис. 3), блок моделирования нагрузки ЭПС – на (рис. 4).

Для измерения потенциала «рельс – земля» и дальнейшего формирования потенциальных диаграмм по длине межподстанционной зоны по каждому из путей были намечены для измерений выходных характеристик 25 контрольных точек, равномерно разбивающих межподстанционную зону. В каждой такой точке соответствующего пути установлены измерительные приборы (амперметры и вольтметры) (рис. 5).

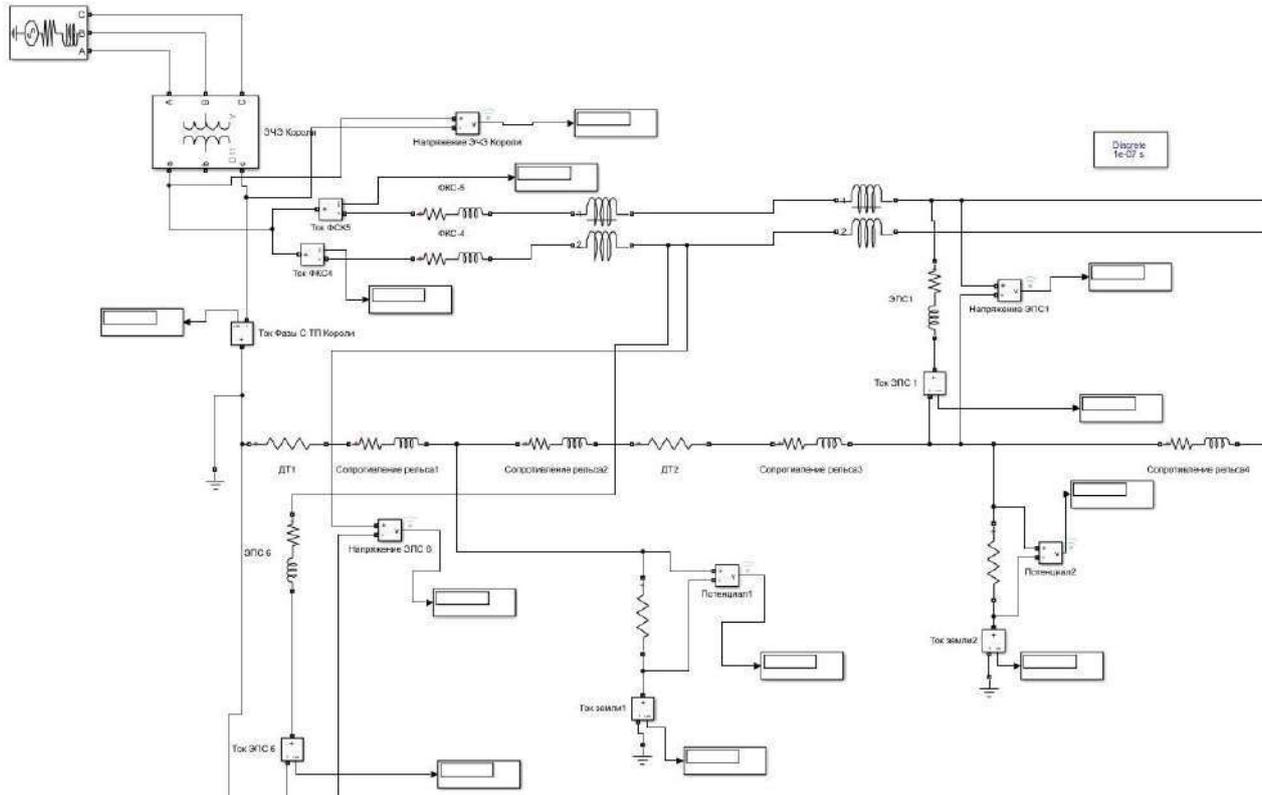


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели участка тяговой сети с рельсовыми цепями
 Fig. 3. Fragment of a simulation model of the traction network's section with a track circuit

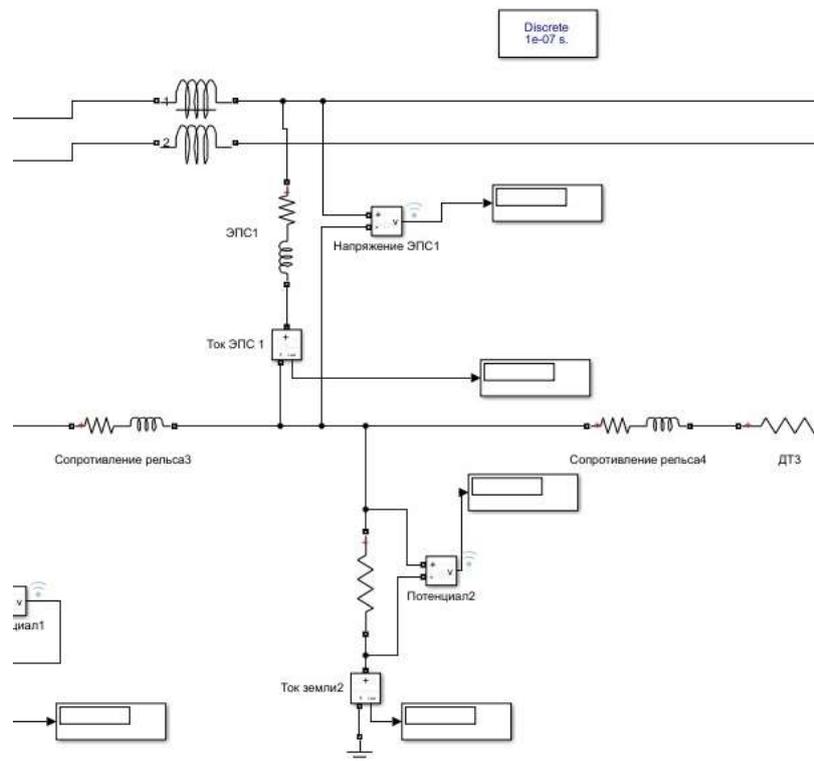


Рис. 4. Фрагмент имитационной модели блока нагрузки электроподвижного состава
 Fig. 4. Fragment of a simulation model of the electric locomotive

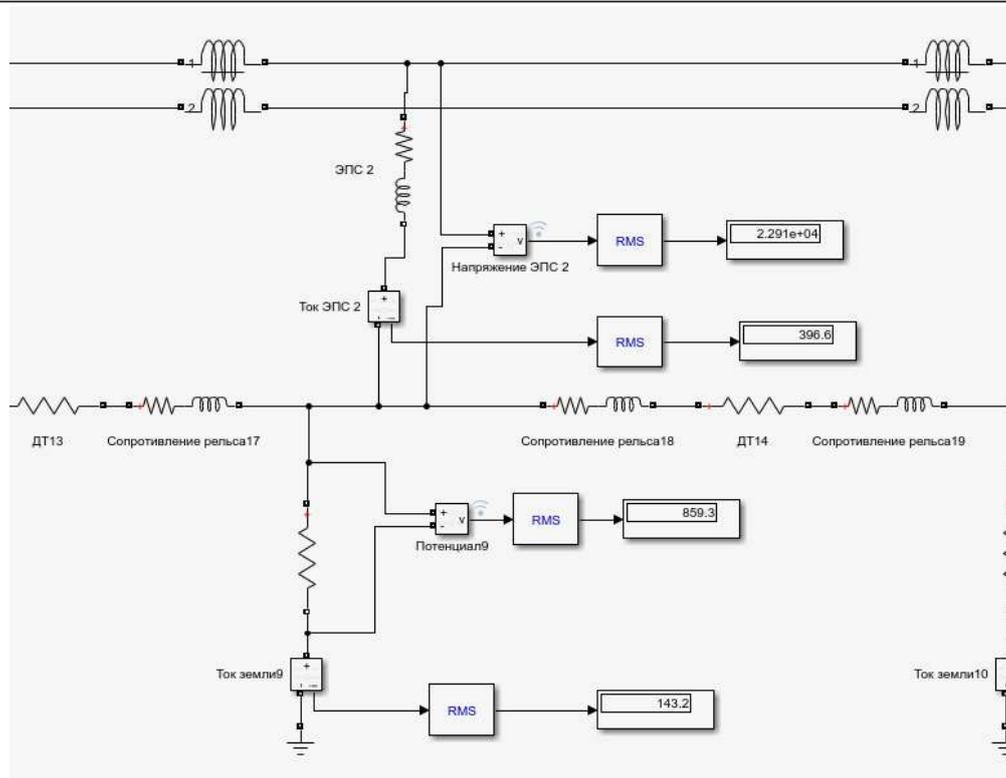


Рис. 5. Фрагмент имитационной модели в процессе расчета и измерения потенциала
Fig. 5. Fragment of a simulation model in the process of calculating and measuring the potential

Далее была проведена серия расчетов при неизменных местоположениях и величинах тяговых нагрузок для заданного ГДП, но с поочередными изменениями следующих параметров: активное сопротивление ДТ $R_{ДТ}$, Ом; переходное сопротивление балластного слоя $R_{бал}$, Ом·км.

Зафиксированные в каждой из намеченных точек результаты измерений послужили исходной информацией для построения расчетных потенциальных диаграмм по длине пути межподстанционной зоны Завитая – Короли.

Результаты и обсуждение

Важность роли ДТ в снижении асимметрии в РЦ за счет изменения и улучшения их конструкции

в последнее время подчеркивается отечественными и зарубежными исследователями [7, 8, 16, 17, 19], поэтому влияние ДТ на изменение потенциальных диаграмм по длине пути в проводимом исследовании рассмотрено более детально. Далее приведены потенциальные диаграммы для первого и второго путей, полученные по результатам измерений потенциалов в расчетных точках имитационной модели при различных активных сопротивлениях ДТ, $R_{ДТ} = 0 - 10$ Ом (рис. 6).

Пики потенциальных диаграмм, изображенных на (рис. 6), соответствуют местам нахождения ЭПС на участке. Кроме того, ранее проведенные исследования [5, 6, 10, 11] доказали, что на величину потенциала рельса значительное влияние оказы-

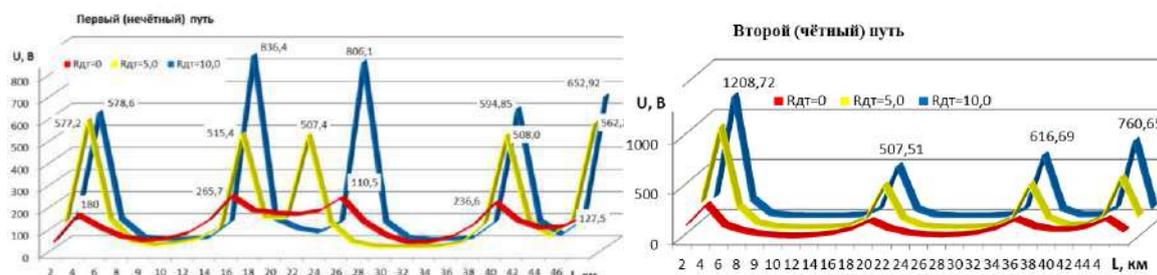


Рис. 6. Зависимости потенциала «рельс-земля» от длины пути для четного и нечётного путей участка Завитая-Короли при мокром балласте ($R_{бал}=1$ Ом·км)

Fig. 6. The function of the rail potentials on the length for first and second way of the Zavitaya-Koroly zone with wet ballast ($R_{бал}=1$ Ом км)

вает переходное сопротивление «рельс – земля», зависящее от состояния балластного слоя (балласт сухой, мокрый или промерзший). Переходное сопротивление «рельс – земля» может принимать следующие значения (Ом·км):

- при мокром балласте – 1;
- при влажном балласте – 2;
- при сухом, слабо промерзшем балласте – 50;
- при сильно промерзшем балласте – 50–100 [20].

Используемые в расчетах сопротивления балласта соответствуют слабому загрязнению поверхности балластного слоя и старым деревянным шпалам. Опыт эксплуатации на рассматриваемом участке подтверждает, что подавляющее большинство отказов РЦ происходит в период, когда балластный слой увлажнен или мокрый.

На участке Короли – Завитая большинство ДТ марки 2ДТ-1-300. В случае одинаковых (близких по величине) значений тягового тока магнитные поля обмоток ДТ компенсируют друг друга, стремясь к нулю. Однако под действием разности токов ДТ будет перегреваться, и активное сопротивление обмоток при протекании обратного тягового тока будет расти.

Дроссель-трансформаторы марки 2ДТ-1-300 рассчитаны на пропускание номинального переменного тока 300 А в электротяге через каждую секцию основной обмотки. Средний вывод обмотки расчи-

тан на ток 600 А. При повышении обратного тягового тока в РЦ растет и абсолютное значение его асимметрии в секциях основных обмоток ДТ, в результате чего увеличивается насыщение сердечников ДТ. В этом случае магнитопровод теряет свойства индуктивного элемента, т. е. согласно [15] сопротивление такого устройства стремится к чисто активному.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что при незначительной величине сопротивления мокрого балласта $R_{бал} = 1$ Ом·км и нормальной работе ДТ с сопротивлением ниже 5 Ом, формируемые по длине пути потенциалы «рельс – земля» не вызывают пробой искровых промежутков, так как расчетные значения формируемых потенциалов оказываются ниже, чем пробивное напряжение ИП, равное 800–1 200 В.

Однако, при превышении сопротивления ДТ величины 5 Ом значительно возрастают значения потенциалов «рельс – земля» на исследуемом участке, приближаясь к критическим величинам напряжения пробоя искровых промежутков. Особенно явно эта картина проявляется для второго (четного) пути грузового направления (см. рис. 6). Так, при $R_{ДТ} = 10$ Ом в месте нахождения ЭПС, ближайшего к ТП Короли, фиксируется значение потенциала свыше 1 200 В.

Проведя исследования степени влияния величины сопротивления балласта при неизменном ак-

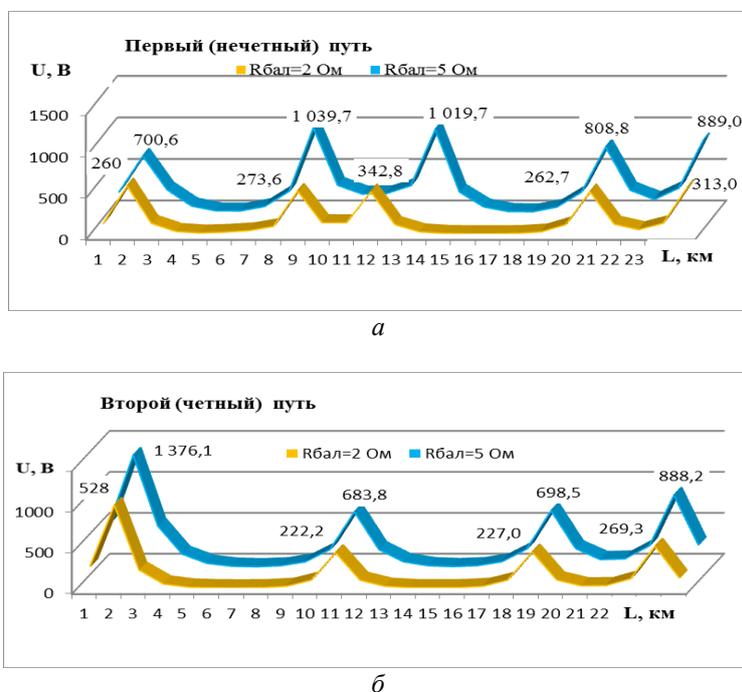


Рис. 7. Зависимости потенциала «рельс – земля» от длины пути и различного состояния балласта для нечетного (а) и четного (б) путей участка Завитая – Короли (сопротивление ДТ $R_{ДТ}=5$ Ом)

Fig. 7. Dependence of the «rail-track» potential upon track length and difference in the condition of the ballast for the odd (a) and even (b) tracks of the section Zavitaya – Koroli ($R_{ict}=5$ Ом)

тивном сопротивлении ДТ на потенциал, формируемый по длине пути, были получены графические зависимости, представленные для первого и второго пути (рис. 7).

При неизменной величине активного сопротивления ДТ $R_{дт}=5$ Ом и увеличении сопротивления балластного слоя наблюдается увеличение потенциала по длине пути по грузовому и не грузовому направлениям более, чем в три раза.

В этом случае формируются опасные для пробоя ИП напряжения как в местах нахождения ЭПС в середине межподстанционной зоны первого пути, так и при нахождении ЭПС вблизи подстанций по второму пути. Можно отметить, что по первому пути условия для пробоя искрового промежутка, что в итоге приведет к нарушению нормальной работы рельсовой цепи, складываются в 4 точках с пиками потенциальных диаграмм выше 800 В, а по четному пути – в трех точках.

Учитывая одновременность происходящего повышения потенциала в масштабе только одной реализации ГДП, можно отметить неблагоприятные с точки зрения эксплуатации системы тягового электроснабжения условия функционирования рельсовой цепи при мокром балластном слое.

Сочетание двух неблагоприятных факторов – роста активного сопротивления ДТ наряду с увлажнением (или загрязнением) балластного слоя значительно увеличивают потенциал по длине пути как грузового, так и негрузового направлений, создавая опасные условия для пробоя искровых промежутков, установленных на опорах контактной сети.

Одним из вариантов решения проблемы на рассматриваемом участке может стать замена ис-

кровых промежутков ИП-3 на защитные устройства с большим пробивным напряжением – на газоразрядные защитные устройства многократного действия ГРПЗ – 1У, у которых паспортное значение напряжения пробоя составляет 1400–1700 В.

Вторым вариантом решения проблемы роста потенциала может стать применение ДТ большей мощности и специальных конструкций, которые не будут нагреваться в процессе протекания по ним значительных величин тяговых токов, тем самым будут способны не увеличивать свое активное сопротивление.

Заключение

Проведенные исследования влияния обратного тягового тока при тяжеловесном движении и параметров отдельных элементов на работу рельсовых цепей позволяют заключить, что при повышении активного сопротивления ДТ тяговому току заметен существенный рост потенциалов «рельс – земля».

При повышении переходного сопротивления балластного слоя свыше 1,5–2 Ом·км происходит резкое увеличение потенциалов в точках нахождения нагрузки на межподстанционной зоне как грузового, так и не грузового направления.

Заблаговременное выявление критических значений и количественная оценка изменения потенциалов «рельс – земля» с использованием разработанной имитационной модели может быть полезна как в условиях эксплуатации существующих, электрифицированных участков железных дорог переменного тока, так и на стадии проектирования новых.

Список литературы

1. РЖД в цифрах // ОАО «РЖД»: сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/103290?id=17127#main-header> (дата обращения 20.07.2021).
2. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. 2018. № 8. С. 40–42.
3. Власевский С.В., Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехника. 2019. № 7. С. 49–52. DOI: 10.3103/S1068371219070137.
4. Puzina E.Y., Cherniga M.Y., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2020. 2020. С. 9271385. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
5. Makasheva S., Pinchukov P., Kostin A. Increasing the Functional Stability of Distance Relay Protection for Various Types of Catenary Support Grounding // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1115 AISC. С. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_17.
6. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7 (92). С. 27–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38.
7. Шаманов В.И., Пультяков А.В., Трофимов Ю.А. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛСН // Железнодорожный транспорт. 2009. № 5. С. 46–50.
8. Colella P., Pons E., Tortora A. Rail Potential Calculation: Impact of the Chosen Model on the Safety Analysis // 2018 AEIT International Annual Conference. 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2018.8577295.
9. Lee C.H., Wang H.M. Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems // Electric Power Applications, IEE Proceedings. 2001. P. 148–154. DOI: 10.1049/ip-epa:20010280.
10. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 272. С. 022071. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022071.

11. Makasheva S., Pinchukov P. Return traction current system's operation in cold climate regions International // Geotechnical Symposium "Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region" (GCCETS 2018). MATEC Web of Conferences, 2019. Vol. 265. С. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201926502009.
12. Шаманов В.И. Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 160–185. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185.
13. Балуев Н.И. Рельсовые цепи – вчера, сегодня, завтра ... // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 30–31.
14. Ngamkhanong C., Kaewunruen S., Afonso Costa B. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring // Infrastructures, 2018. No. 3. P. 3. DOI: 10.3390/infrastructures3010003.
15. Рожкин Б.В., Паранин А.В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34.
16. Lucca G. Influence of railway line characteristics in inductive interference on railway track circuits. IET Sci. Meas. Technol., 2019. No. 13. Pp. 9–16. DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5021.
17. Andrusca M., Adam M., Dragomir A., Lunca E., Seeram R., Postolache O. Condition Monitoring System and Faults Detection for Impedance Bonds from Railway Infrastructure // Applied Sciences. 2020. No. 10. Pp. 61–67. DOI:10.3390/app10186167 10.3390/app10186167.
18. ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: Справочная система // ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: сайт. URL: <http://gidural.ru/doku.php> (дата обращения 22.07.2021).
19. Yang S., Roberts C., Chen L. Development and performance analysis of a novel impedance bond for railway track circuits // Electrical Systems in Transportation. 2013. Vol. 3. Pp. 50–55. DOI:10.1049/iet-est.2013.0004.
20. Аркатов В.С., Аркатов Ю.В., Казеев С.В., Ободовский Ю.В. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: ООО «МиссияМ», 2006. 496 с.

References

1. RZHD v cifrah [RZD in numbers] [Electronic media]. URL: <https://eng.rzd.ru/en/9961> (Accessed 20.07.2021).
2. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Ustrojstva relejnoj zashchity v usloviyah tyazhelovesnogo dvizheniya [Relay protection devices in heavy haul conditions] *Zheleznodorozhnyj transport [Railway Transport]*, 2018, No. 8, pp. 40–42.
3. Vlasevsky S.V., Grigoriev N.P., Trofimovich P.N. Vstrechnoe regulirovanie pokazatelej raboty v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka. [Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System]. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, No. 7, pp. 522–525. DOI: 10.3103/S1068371219070137.
4. Puzina E.Y., Cherniga M.Y., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2020*, 2020. p. 9271385. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
5. Makasheva S., Pinchukov P., Kostin A. Increasing the Functional Stability of Distance Relay Protection for Various Types of Catenary Support Grounding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1115, AISC. pp. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_17.
6. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Kompleksnaya ocenka raboty` relejnoj zashchity` tyagovoj seti peremennogo toka [Complex estimate of relay protection operation of AC traction circuit]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk state technical university]*, 2020, No. 7(92), pp. 27–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38.
7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Vliyanie uslovij ekspluatatsii na ustojchivost' raboty ALSN [Operating conditions influence on the stability of the automatic locomotive signaling]. *Zheleznodorozhnyj Transport [Railway Transport]*, 2009, No.5, pp. 46–50.
8. Colella P., Pons E., Tortora A. Rail Potential Calculation: Impact of the Chosen Model on the Safety Analysis *2018 AEIT International Annual Conference*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2018.8577295.
9. Lee C.H., Wang, H.M. Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*. 2001, pp. 148–154. DOI: 10.1049/ip-epa:20010280.
10. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 272, p. 022071. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022071.
11. Makasheva S., Pinchukov P. Return traction current system's operation in cold climate regions. *International Geotechnical Symposium "Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region" (GCCETS 2018). MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol. 265, p. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201926502009.
12. Shamanov V.I. Problemy elektromagnitnoj sovmestimosti rel'sovyh cepej s tyagovoj set'yu [Problems of electromagnetic compatibility of track circuits and traction network]. *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, 2019, June. Vol. 5, No. 2, pp. 160–185. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185.
13. Baluev N.I. Rel'sovye cepi – vchera, segodnya, zavtra ... [Track circuits – yesterday, today and tomorrow]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2019, No. 2, pp. 30–31.
14. Ngamkhanong C., Kaewunruen S., Afonso Costa B. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring. *Infrastructures* 2018. No. 3. P. 3. DOI: 10.3390/infrastructures3010003.
15. Rozhkin B.V., Paraniin A.V. Analiz uslovij raboty rel'sovoj linii na osnove modelirovaniya rastekaniya obratnogo tyagovogo toka [Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2018, No. 4(59), pp. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34.
16. Lucca G. Influence of railway line characteristics in inductive interference on railway track circuits. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019, No. 13, pp. 9–16. DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5021.

17. Andrusca M., Adam M., Dragomir A., Lunca E., Seeram R., Postolache O. Condition Monitoring System and Faults Detection for Impedance Bonds from Railway Infrastructure. *Applied Sciences*, 2020, No. 10, pp. 61–67. DOI: 10.3390/app10186167.

18. GID URAL-VNIIZHT: Spravochnaya sistema [Reference system]. URL: <http://gidural.ru/doku.php> (Accessed 22.07.2021).

19. Yang S., Roberts C., Chen L. Development and performance analysis of a novel impedance bond for railway track circuits. *Electrical Systems in Transportation*, 2013, Vol. 3, pp. 50–55. DOI:10.1049/iet-est.2013.0004.

21. Arkatov V.S., Arkatov Yu.V., Kazeev S.V., Obodovsky Yu.V. Rel'sovye cepi magistral'nyh zheleznih dorog: Spravochnik – 3-e izdanie, pererab. i dop. [Rail chains of the main Railways: reference Book-3rd edition, revised and additional]. Moscow: OOO «MissiyaM», 2006. 496 p.

Информация об авторах

Пинчуков Павел Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, директор Электроэнергетического института, доцент кафедры систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru

Макашева Светлана Игоревна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: smakasheva@gmail.com

Information about the authors

Pavel S. Pinchukov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Director of the Electric Power Institute, the Subdepartment of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Svetlana I. Makasheva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: smakasheva@gmail.com