

Т. Н. СЕРДЮК (ДИИТ)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК ТЯГОВОГО ТОКА ПО ДЛИНЕ ФИДЕРНОЙ ЗОНЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Розглянуто питання електромагнітної сумісності тягової мережі з рейковими колами. Розроблена математична модель для оцінки розподілу гармонік тягового струму по довжині фідерної зони та визначення величини блукаючих струмів. Наведені результати моделювання для гармонік 50 і 100 Гц, які містяться в зворотному тяговому струмі.

Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости тяговой сети с рельсовыми цепями. Разработана математическая модель для оценки распределения гармоник тягового тока по длине фидерной зоны и определения величины блуждающих токов. Представлены результаты моделирования для гармоник 50 и 100 Гц, содержащихся в обратном тяговом токе.

The article considers issues of electromagnetic compatibility of traction network with the rail circuits. A mathematic model is elaborated for evaluation of distribution of harmonics of traction current on the length of feeder zone and determination of the value of stray currents. The results of modeling are represented for 50 and 100 Hz harmonics of return traction current.

Введение

Устройства, обеспечивающие безопасность движения поездов и соединенные с рельсами, подвергаются постоянному воздействию помех со стороны тягового электроснабжения. Таким образом, рельсовые цепи (РЦ) оказываются под непосредственным влиянием помех со стороны тягового тока. Гармонический состав тягового тока обычно известен или в результате теоретических, или экспериментальных исследований.

Для оценки воздействия помех на путевые приемники рельсовых цепей необходимо разработать математическую модель, описывающую динамические электромагнитные процессы, протекающие в тяговой сети.

Проанализируем существующие схемы замещения тягой сети. Самой распространенной теорией в этой области является построение математической модели на основе теории четырехполюсника, в котором одна длинная линия представляет собой контактную сеть, а вторая – рельсовую сеть [1; 2].

Такое представление тяговой сети позволяет определить напряжение в любой точке контактной сети в пределах фидерной зоны для любой гармоники при одностороннем или двустороннем питании, но не учитывает индуктивные и емкостные зависимости между контактной сетью, линиями продольного электроснабжения и рельсами для создания более полной картины электромагнитной обстановки на данном участке.

В работе [3] системы внешнего и тягового электроснабжения рассматриваются как многопроводные, а в линиях с распределенными параметрами учитываются индуктивные и емкостные связи. Но предложенный авторами метод многополюсника применим только для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ, поскольку предполагает выделение участка, на котором происходит электропотребление, в отдельный многополюсник.

Таким образом, расчет ведется только для данного участка фидерной зоны. В системе тягового электроснабжения 3 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного тока электропотребление происходит по длине всей фидерной зоны. К тому же предлагаемая авторами [3] методика позволяет вести расчет коэффициента асимметрии токов и напряжений в системе внешнего электроснабжения, которая возникает в результате неравномерной загрузки фаз, но не определяет степень воздействия системы внешнего и тягового электроснабжения на работу рельсовых цепей.

С целью учета влияния всех видов помех на работу рельсовых цепей и системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), необходимо разработать математическую модель системы тягового электроснабжения, которая позволила бы оценить распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны и определить величину токов утечки при различных величинах сопротивления балласта и изоляции контактной сети.

Таким образом, целью работы является экспериментальное определение частотных характеристик путевых приемников рельсовых цепей, выявление опасных и мешающих помех с точки зрения нормального функционирования рельсовых цепей, создание математической модели, описывающей динамические процессы в тяговой и рельсовой сети, которая позволит учитывать влияние различных факторов на распределение напряжения и токов гармоник в рельсах.

Результаты эксперимента

В результате экспериментальных исследований были определены частотные характеристики путевых приемников кодовых рельсовых цепей 25, 50, 75 Гц и станционных рельсовых цепей 25 и 50 Гц.

На вход путевого приемника рельсовой цепи частотой 50 Гц с реле ИВМШ-110 и фильтром ЗБФ-1 подавались синусоидальные сигналы частотой 20...120 Гц от генератора звуковой частоты напряжением 24, 18,5, 15 и 10 В. Путевое реле становилось под ток при напряжении 2,6...2,8 В и частоте 35...37 Гц, практически не завися от напряжения питания приемника. Что касается напряжения обесточивания реле, то оно составляло порядка 2,4 В. Частота, при которой происходило отпадание якоря реле, сильно зависит от напряжения на входе приемника и может достигать 115 Гц. Следовательно, частоты 50, 75, 100 Гц, найденные в спектре обратного тягового тока, являются опасными для путевых приемников перегонных рельсовых цепей 50 Гц и могут привести к ложному срабатыванию реле [4].

Таким образом, путевое реле РЦ 50 Гц срабатывает при токе в рельсах 1,3...1,6 А частотой 50 Гц, отпускает якорь при токе в два раза меньшем тока срабатывания (примерно 0,6 А). Путевое реле срабатывает при токе в рельсах 3,8 А частотой 75 Гц и 5 А частотой 100 Гц.

Что же касается рельсовых цепей 75 Гц, то здесь наиболее опасными являются помехи

с частотой 60...90 Гц, которые проходят через фильтр и расшифровываются дешифратором как полезный сигнал и могут вызвать нарушения в работе рельсовых цепей. Причиной возникновения помех с данной частотой могут быть напольные устройства СЦБ (блуждающие токи соседних блок-участков), несимметрия питающего напряжения тяговых подстанций, работа тяговых двигателей электровоза и их импульсных преобразователей и др.

Исследование аппаратуры релейного конца кодовой РЦ 25 Гц, защищенной фильтром ФП-25, показало, что реле надежно отпускает свой якорь при напряжении 2,2 В при частотах 31,5, 33, 36 Гц и напряжении на входе 10, 15 и 20 В соответственно. Таким образом, опасной в данном случае будет являться помеха с частотой 25 Гц. От остальных частот путевого приемник надежно защищен.

Также была снята зависимость напряжения срабатывания и отпускания реле ИВМШ-110 от частоты. Для этого сигнал разной частоты подавался на вход реле. В результате было получено, что при частоте 20...150 Гц напряжение срабатывания реле медленно увеличивалось 3...3,4 В. Напряжение отпускания якоря составило 2,4 В. Вообще, реле ИВМШ-110 срабатывает в достаточно широком диапазоне частот (до десятков килогерц). При этом напряжение срабатывания незначительно увеличивается с ростом частоты до 3,7 В, что связано с потерями в сердечнике.

При электротяге постоянного тока на кодируемых и стрелочных участках используются фазочувствительные рельсовые цепи с питанием и кодированием током частотой 50 Гц. На релейном конце таких рельсовых цепей применено путевое реле ДСШ-12. Параллельно путевой обмотке реле включен конденсатор С емкостью 4 мкФ, который уменьшает реактивную мощность цепи и улучшает фазовые соотношения. Для исследования частотных характеристик релейного конца таких рельсовых цепей воспользуемся схемой, представленной на рис. 1.

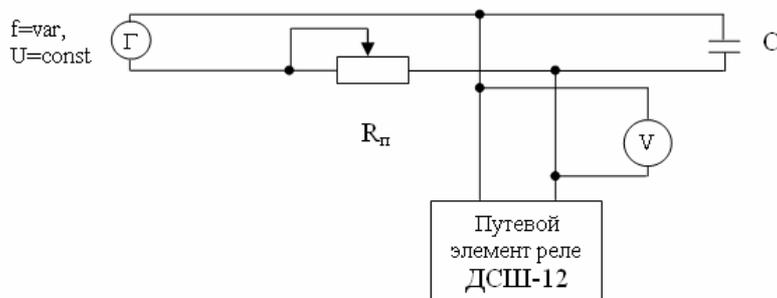


Рис. 1. Схема для исследования частотных характеристик приемного конца рельсовых цепей с реле ДСШ-12

Подстроечное переменное сопротивление $R_{\text{п}}$ предназначено для создания необходимого уровня напряжения срабатывания реле. На путевой элемент подавалось напряжение 10, 25, 60 В. На местный элемент реле ДСШ подавалось напряжение 220 В частотой 50 Гц.

Исследования показали, что максимальный электромагнитный момент якорь-сектор реле ДСШ развивается при номинальном напряжении 10 В на его путевом элементе и частоте 50 ± 10 Гц. При частотах 10...40 Гц и 60...90 Гц электромагнитный момент резко снижается, поэтому помехи с данной частотой могут оказывать на реле только мешающее действие. С увеличением

напряжения, подаваемого на путевой элемент реле ДСШ, электромагнитный момент якоря увеличивается прямо пропорционально, но область частот, в которой происходит срабатывание реле, остается той же.

На рис. 2 представлена зависимость относительного момента, развиваемого якорем реле ДСШ-12 при подаче на путевой элемент напряжения различного уровня (10, 25 и 60 В) от частоты. Относительный момент представляет собой отношение текущего значения электромагнитного момента к максимальному при напряжении на путевом элементе 10 В и частоте 50 Гц.

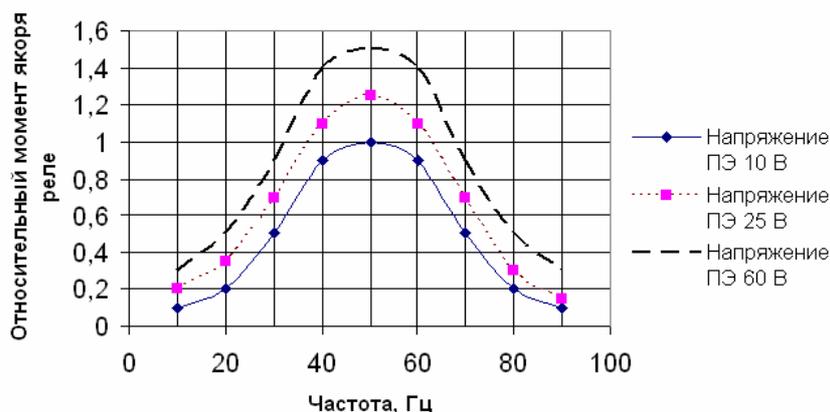


Рис. 2. Зависимость относительного момента якоря реле ДСШ-12 от напряжения и частоты на путевом элементе

Аналогичные исследования были проведены для релейного конца фазочувствительной РЦ 25 Гц с реле ДСШ-13. Реле ДСШ-13 надежно защищено от основной гармоники 50 Гц. Само реле ДСШ представляет собой электромеханический фильтр и его якорь-сектор будет надежно притягиваться лишь в области частот 25 ± 10 Гц при достижении помехами соответствующей величины по амплитуде и совпадении по фазе с сигнальным током. Такие помехи могут привести к опасному воздействию (лож-

ному срабатыванию путевого реле). Также следует учитывать суммарное действие нескольких помех, поскольку при этом амплитуда мешающего напряжения увеличивается.

На рис. 3 приведена зависимость относительного момента от напряжения на путевом элементе (10, 20 и 50 В) и частоты. Под относительным моментом понимается отношение текущего момента к максимальному при частоте 25 Гц и номинальном напряжении на путевом элементе реле ДСШ 10 В.

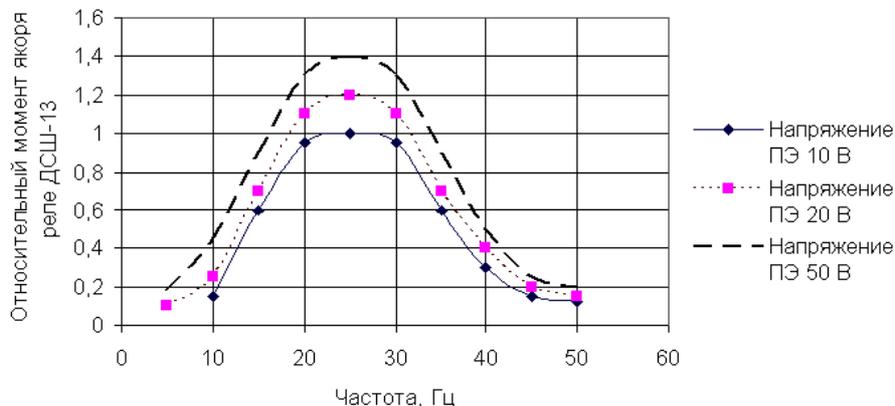


Рис. 3. Зависимость относительного момента якоря-сектора реле ДСШ-13 от напряжения на путевом элементе и частоты

Таким образом, для стационарных фазочувствительных рельсовых цепей наиболее опасными являются помехи, совпадающие по частоте с сигнальной, т. е. 25 ± 10 Гц для РЦ с реле ДСШ-13 и 50 ± 10 Гц – с реле ДСШ-12. Стационарные рельсовые цепи 25 Гц надежно защищены от основной гармоники 50 Гц защитным фильтром ЗБ-ДСШ.

Опасное действие на путевой приемник может быть оказано лишь в том случае, когда на входе путевого и местного элемента появятся помехи одинаковые по частоте и достаточные по амплитуде для срабатывания реле ДСШ. Но это возможно при подаче несинусоидального

напряжения на местный элемент и появлении помехи соответствующей по частоте на путевом элементе от обратного тягового тока.

На неcodируемых участках пути и стрелочных секциях применяют однопериодные рельсовые цепи с путевыми реле типа ДСШ-12 или АНВШ-2. Реле АНВШ-2 включают по схеме однополупериодного выпрямления и защищают от гармоник тягового тока с помощью блока-фильтра РЗФШ-2. Блоки РЗФШ-2 защищают однопериодные РЦ от гармоник тягового постоянного тока. Схема, предназначенная для исследования частотных характеристик аппаратуры приемного конца рельсовой цепи, представлена на рис. 4.

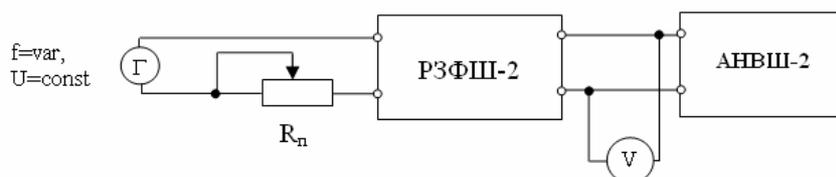


Рис. 4. Схема исследования частотной характеристики аппаратуры релейного конца однопериодной стационарной РЦ 50 Гц с реле АНВШ-2

При включении реле АНВШ-2 по однополупериодной схеме цепь оказывает гармоникам обратного тягового тока большее затухание в области частот 100...600 Гц, чем при двухполупериодном выпрямлении. Однако мощность, потребляемая реле в этом случае, значительно больше. Сам защитный блок-фильтр РЗФШ-2 снижает гармоники обратного тягового тока, которые возникают при неисправности фильтров тяговых подстанций, и кратны 300, 600, 900 Гц или 600, 1200, 1800 Гц, но полностью не ис-

ключает их. При этом гармоники тягового тока 50, 75, 100, 150 Гц, которые возникают при неисправностях в схеме выпрямления на тяговых подстанциях или в результате работы тяговых двигателей, могут оказывать как опасное, так и мешающее действие на работу данного вида рельсовых цепей.

Результаты исследования зависимости напряжения путевого реле АНВШ-2 однопериодной рельсовой цепи от частоты при включении защитного блока РЗФШ-2 представлены на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость напряжения на входе путевого реле АНВШ-2 стационарных однопериодных рельсовых цепей частотой 50 Гц от частоты

Из рис. 5 видно, что наиболее опасными являются гармоники 25...100 Гц. Особенно нежелательны помехи, совпадающие по частоте с сигнальной, 50 Гц. Такие гармоники могут оказывать опасное и мешающее действие на работу стационарных рельсовых цепей.

Также опасными окажутся ситуации при выходе из строя или обрыве цепи дросселя или конденсаторов. В таком случае реле оказывается под неблагоприятным воздействием достаточно широкого спектра частот и это приведет к его ложному срабатыванию.

Математическая модель

Для определения влияния гармоник тягового тока на работу рельсовых цепей использовалась схема замещения тяговой сети, в которой

контактная сеть (к), включая контактный провод и несущий трос, представлена одним проводом, рельсовая сеть вторым проводом (р), а в качестве обратного провода использовалась земля (з) [5] (рис. 6).

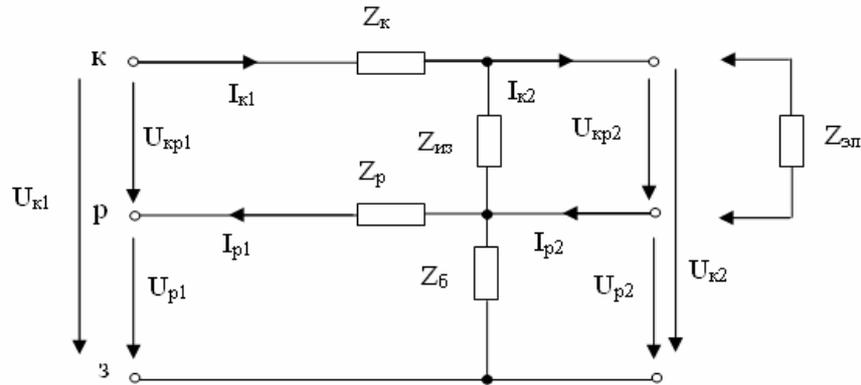


Рис. 6. Схема замещения тяговой сети:

$\dot{U}_{kp1}, \dot{U}_{kp2}$ – напряжение контактная сеть – рельсы; $\dot{U}_{p1}, \dot{U}_{p2}$ – напряжение между рельсами и землей; $\dot{U}_{к1}, \dot{U}_{к2}$ – напряжение в контуре контактная сеть – земля; $\dot{I}_{к1}, \dot{I}_{к2}$ – ток в контактной сети; $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}$ – ток в рельсовой сети (обратный тяговый ток) в начале и в конце линии соответственно; Z_k – сопротивление контактной сети, с учетом сопротивления взаимоиндукции; Z_p – сопротивление рельсовой сети с учетом сопротивления взаимоиндукции в контуре рельсовые нити – контактная сеть; $Z_{из}$ – сопротивление изоляции контактной сети, учитывающее заземление на рельсы различных железнодорожных конструкций; $Z_б$ – сопротивление балласта, оказываемое току утечки от рельсовых нитей через шпалы, балласт и земляное полотно

Таким образом, с помощью предложенной математической модели могут быть определены распределения напряжения и токов вдоль рельсовой и контактной сети для всех гармоник при различных значениях сопротивления изоляции. Данной моделью удобно пользоваться, когда источником гармоник в обратном тяговом токе являются выпрямители, сглаживающие фильтры тяговых подстанций постоянного тока или электродвигатели постоянного тока электропоездов.

Результаты моделирования

Для упрощения расчетов [5; 6] принимаем (Ом)

$$R_{эл} = 0,5, \quad X_{эл} = 2\pi f \cdot 20.$$

Также для выполнения расчетов принимаем следующие значения сопротивлений рельсов:

- для рельсовой цепи с рельсами Р65 (Ом/км)

$$Z_p = 0,11 + j2\pi f 8,021 \cdot 10^{-4};$$

- для балласта (Ом·км)

$$Z_б = 100;$$

- для изоляции опор (Ом·км)

$$Z_{из} = 100 \quad \text{и} \quad Z_{из} = 1000;$$

- для контактной подвески типа ПБСМ95+МФ-100 (Ом/км)

$$Z_k = 0,159 + j2\pi f 9,772 \cdot 10^{-4}.$$

Значение тока гармоники частотой 50 Гц принимаем 10 А, а частотой 100 Гц – 10 А [8]. Для расчета берем только гармоники 50 и 100 Гц, поскольку именно эти помехи могут оказать опасное действие и привести к ложному срабатыванию путевого приемника рельсовых цепей. Также при моделировании будем полагать, что тяговая сеть однородная, сопротивление балласта по длине всей фидерной зоны одинаковое, питание участка одностороннее и на нем находится один поезд.

Падение напряжения в цепи электропоезда определялось по формуле

$$\dot{U}_{kp2} = \dot{I}_{к2} Z_{эл}. \quad (1)$$

Ток в контактной сети в начале линии

$$\dot{I}_{к1}(x) = \dot{I}_{к2} + \frac{\dot{U}_{kp2}}{Z_{из}(x)}. \quad (2)$$

Ток утечки через изоляцию опор представляет собой линейную зависимость и описывается выражением

$$\dot{I}_{уиз}(x) = \frac{\dot{U}_{к2}}{Z_{из}(x)}. \quad (3)$$

Обратный тяговый ток в рельсах в районе тяговой подстанции определяется выражением

$$\dot{I}_{p1}(x) = \dot{I}_{\kappa 2} + \dot{I}_{yuz}(x) - \dot{I}_y \quad (4)$$

Потенциал рельсов возле электровоза

$$\dot{U}_{p2}(x) = \dot{I}_y \cdot Z_6(x) \quad (5)$$

Потенциал рельсов возле тяговой подстанции

$$\dot{U}_{p1}(x) = -\dot{I}_{p1}(x) \cdot Z_p(x) + \dot{U}_{p2}(x) \quad (6)$$

Для участка линии длиной 10 км распределение гармоник тока частотой 50 и 100 Гц в контактной сети в начале вдоль фидерной зоны имеет вид (рис. 7). Чем дальше электровоз находится от тяговой подстанции, тем больший ток он потребляет. Это связано с увеличением потерь электрической энергии в контактной сети. С увеличением расстояния полное сопротивление тяговой сети увеличивается и, таким образом, от подстанции будет потребляться больший ток. С увеличением частоты наблюдается увеличение тока в контактной сети.

Зависимость величины тока утечки частотой 50 и 100 Гц через изоляцию опор контактной сети показана на рис. 8 для различных сопротивлений балласта. С увеличением расстояния между электровозом и тяговой подстанцией суммарный ток утечки через изоляцию опор контактной сети будет больше. С увеличением частоты величина тока утечки возрастает.

На рис. 9, 10 показано изменение потенциала рельсов в начале и в конце фидерной зоны в зависимости от расстояния между электровозом и тяговой подстанцией, которая находится на 0 км. Нелинейность характеристики (рис. 9) определяется удельным сопротивлением балласта, которое с увеличением расстояния уменьшается. О зависимости потенциала рельса в начале линии (возле тяговой подстанции) можно сказать следующее. В первой четверти длины питающей зоны наблюдается снижение потенциала рельсов, поскольку падение напряжения в рельсовой линии незначительно ввиду малости сопротивления рельсов. Далее по мере удаления от тяговой подстанции на втором участке фидерной зоны потенциал рельсов изменяется менее интенсивно и имеет практически линейный характер.

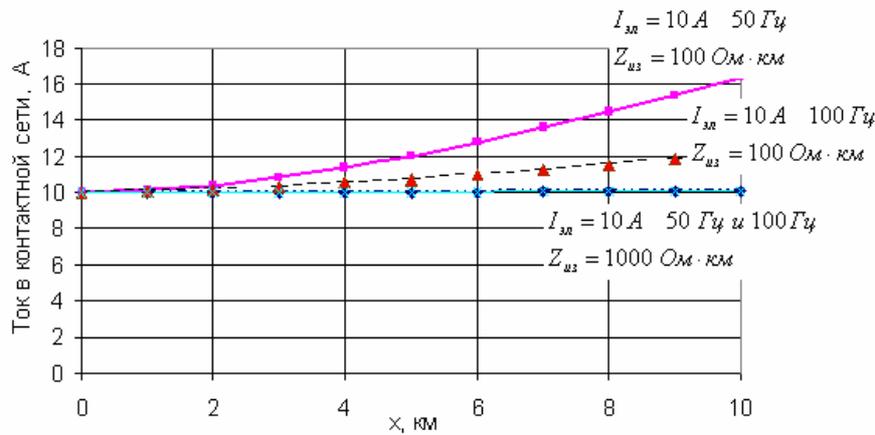


Рис. 7. Распределение тока контактной сети по длине фидерной зоны

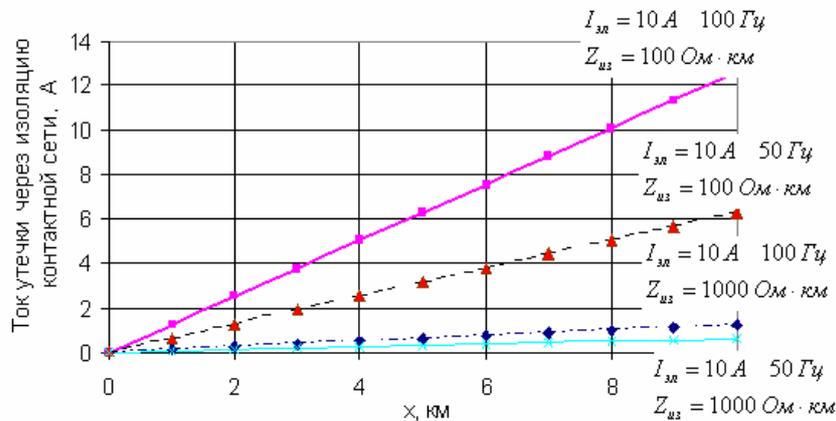


Рис. 8. Распределение тока утечки через изоляцию опор контактной сети

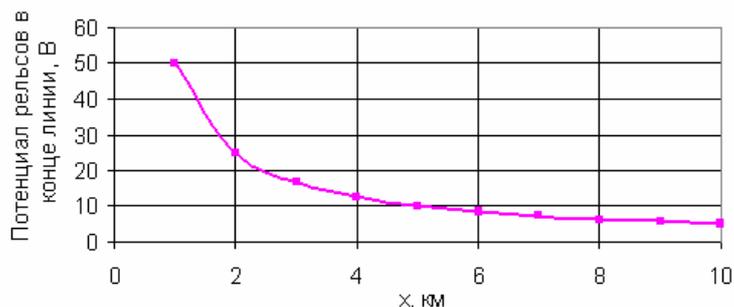


Рис. 9. Потенциал рельса в конце линии для тока величиной 10 А

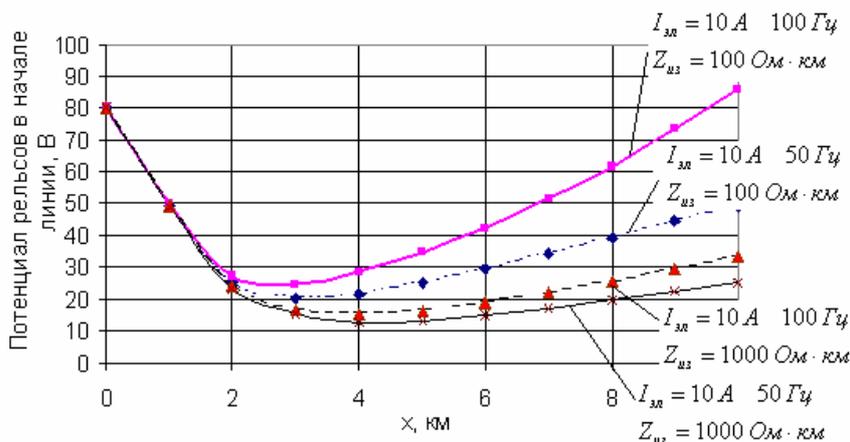


Рис. 10. Потенциал рельса в начале линии

Таким образом, определение распределения этих гармоник по длине участка показало, что с увеличением расстояния между электровозом и тяговой подстанцией суммарный ток утечки через изоляцию опор контактной сети будет увеличиваться. С увеличением частоты гармоники величина тока утечки возрастает. С удалением от источника электропитания и с увеличением частоты величина обратного тягового тока возрастает. Потенциал рельса в точке отсosa обратного тягового тока при удалении поезда на расстояние равное четверти длины фидерной зоны будет уменьшаться ввиду малости сопротивления рельсовой сети.

При дальнейшем следовании поезда по участку потенциал рельсов изменяется менее интенсивно и имеет практически линейный характер, слегка увеличиваясь. Таким образом, в наихудших условиях оказываются рельсовые цепи, находящиеся в районе тяговой подстанции.

Выводы

Выполнено исследование частотных характеристик релейных концов перегонных и станционных рельсовых цепей, которые используются на участках с электротягой посто-

янного и переменного тока. Выявлены наиболее опасные помехи частотой 50, 75 и 100 Гц для путевого реле перегонной рельсовой цепи 50 Гц, которые могут привести к его ложному срабатыванию.

Предложена математическая модель, которая позволяет оценивать распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны. Определено, что в наихудших условиях оказываются рельсовые цепи, расположенные в районе тяговых подстанций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермоленко Д. В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения / Д. В. Ермоленко, В. И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 8. – С. 25 – 30.
2. Минин Г. А. Метод расчета помехонесущего воздействия преобразователей тяговых подстанций метрополитена на устройства автоматического регулирования скорости поезда / Г. А. Минин, В. М. Бабаева, М. П. Бадер. // Вопросы электроснабжения электрических железных дорог. – М.: МИИТ. – 1978. – С. 137–145.
3. Конча А. Асимметрия в трехфазных линиях, питающих тяговые сети 25 кВ, 50 Гц / А. Конча, П. Шмидт // Железные дороги мира. – 2000. – № 8. – С. 41–43.

4. Сердюк Т. Н. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с рельсовыми цепями / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/2. – С. 176–181.
5. Сердюк Т. Н. Экспериментальное исследование помех в рельсовых цепях / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2005. – Вип. 9. – С. 15–18.
6. Пиотровский Л. М. Электрические машины. – М.: Госэнергиздат, – 1963.
7. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины / Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. – М.: Транспорт, – 1991.
8. Котельников А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, Л. П. Слободянюк. – М.: Транспорт, – 1990.

Поступила в редколлегию 25.05.2006.