

# ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

**ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич**, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии транспорта; e-mail: shamanov\_vi@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

В статье приведены результаты исследований, показывающие, как изменяются в процессе эксплуатации модули продольного сопротивления рельсовых нитей для разных значений удельного сопротивления рельсов и удельной магнитной проницаемости. При этом учитывалось изменение активного сопротивления рельсов от потерь на гистерезис и действия поверхностного (скин-эффекта). Построены графики изменения модуля расчетного сопротивления рельсов в рельсовой нити на частотах сигнального тока 25, 50 и 150 Гц. В работе показано, что учет состояния рельсовых линий в конкретных условиях эксплуатации обеспечивает получение дополнительной информации о причинах сбоев в работе рельсовых цепей и систем автоматической локомотивной сигнализации. Это расширяет возможности расчетов режимов работы рельсовых цепей для повышения достоверности выявления причин их неустойчивой работы.

**Ключевые слова:** рельсовые нити; продольное сопротивление; удельное сопротивление; относительная магнитная проницаемость; скин-эффект; условия эксплуатации.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119

## ▼ Введение

Рельсовые цепи (РЦ) широко используются на магистральных железных дорогах России [1–3] и ряде зарубежных стран [4–6] для контроля свободности от подвижного состава участков железнодорожного пути и отсутствия излома рельсов на них, в том числе на высокоскоростных линиях. По рельсовым линиям при этом одновременно пропускаются и сигнальные токи, и тяговые токи электрифицированных железных дорог [7]. Последние токи являются основным источником помех на работу приемников сигналов [8, 9].

Рельсовая линия, по сути, это два стальных провода с неравномерными по их длине в общем случае продольным и поперечным сопротивлениями [8, 10]. Численные значения электрических и магнитных параметров рельсовой линии зависят от температуры окружающей среды, от частоты и величины действующего значения протекающих по ним токов, гармоник тяговых токов и токов, вызванных влиянием внешних электропроводящих линий; от количества и особенностей этих линий, от состояния токопроводящих и изолирующих элементов в рельсовых нитях,

от равномерности продольной намагниченности рельсов. Степень действия каждого из этих факторов в процессе эксплуатации может изменяться в широких пределах, отчего меняется устойчивость работы РЦ и автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), ухудшаются своевременность и достоверность получения информации.

Уровень и гармонический состав помех в приемниках РЦ и АЛС зависят не только от мощности создаваемых их тяговыми токами и токами внешних линий электропередачи в рельсах, но и от свойств канала, по которому передаются сигнальные токи. Поперечное сопротивление этих линий зависит от величины сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле, а при использовании железобетонных шпал еще и от величины сопротивления их электроизолирующих элементов. Продольное сопротивление является функцией магнитных и электрических параметров рельсовых нитей, зависит от сопротивления токопроводящих стыков, от частоты передаваемых сигналов и токов помех [8]. Магнитные параметры зависят свойств рельсовой стали, от частоты и величины протекающих по рельсам электрических токов.

Целью статьи является выяснение того, как изменяются модули продольного сопротивления рельсовых нитей при варьировании величин удельного сопротивления рельсов и их удельной магнитной проницаемости.

## 1. Электрическое сопротивление рельсовых нитей

Для оценки реального состояния рельсовых нитей и выявления причин неустойчивой работы приемников сигналов РЦ и АЛС необходимо знать численные значения продольного сопротивления этих нитей в конкретных условиях эксплуатации.

Наиболее широко применяемые на железных дорогах России рельсы Р65 изготавливаются из высококачественной стали марки М76ВТ, содержащей 0,82 % углерода и ряд легирующих элементов (кремний, марганец, ванадий, титан, цирконий). Это обеспечивает высокую прочность, износостойкость и сопротивление усталостным нагрузкам [11].

В РЦ используются нормативные расчетные значения удельного сопротивления рельсов. При расчете режимов работы РЦ постоянного тока принимается, что при стальных приварных соединителях удельное сопротивление рельсов меняется в пределах от 0,1 до 0,2 Ом/км [12]. Нормативные расчетные сопротивления рельсов для переменного тока получены при их температуре +20 °С и при магнитной проницаемости рельсовой стали около 100, что соответствует величине сигнального или тягового тока до 30 А [13, 14].

## 2. Потери мощности в рельсах

Для проведения расчетов необходимо знать активное и индуктивное сопротивления рельсовых линий. Величина активного электрического сопротивления рельсов определяется потерями мощности в них. Величина индуктивного сопротивления сплошных рельсов при инженерных расчетах находится как доля их активного сопротивления [15–17].

При периодическом перемагничивании рельсов затрачивается определенная энергия, которая выделяется в виде тепла и вызывает их нагревание. В общем случае потери на перемагничивание складываются из потерь

на гистерезис, на вихревые токи и магнитное последствие. Последними потерями чаще пренебрегают.

Обычно изготовитель электротехнической стали приводит экспериментальные данные удельных потерь в ней в зависимости от индукции и частоты поля. Эти экспериментальные данные можно аппроксимировать, например, используя формулу Бертоцци (*Bertotti Giorgio*) [18].

$$P_{вт} = k_h f B^2 + k_c f^2 B^2 + k_e f^{1.5} B^{1.5}, \quad (1)$$

где  $B$  — амплитуда индукции магнитного поля;

$f$  — частота поля;

$k_h, k_c, k_e$  — коэффициенты, величина которых зависит от материала, толщины листа, электропроводности и других факторов.

Здесь коэффициенты  $k_h$  — потери на гистерезис;  $k_c$  — потери на вихревые токи;  $k_e$  — добавочные потери. Например, при плотности стали 7800 кг/м<sup>3</sup> численные значения этих коэффициентов  $k_h = 150$ ,  $k_c = 0,01$ ,  $k_e = 0,2$ . Как видно, при малых частотах электрического тока потери на гистерезис определяют величину потерь мощности в ферромагнитных материалах.

Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема рельсов, обусловлены необратимыми процессами за один цикл перемагничивания (т. е. за один период изменения поля). Когда магнитный материал подвергается циклу намагниченности, при котором он намагничивается сначала в одном, а затем в другом направлении, происходит потеря мощности из-за молекулярного трения в материале при поворотах его магнитных доменов сначала в одну, а затем в другую сторону. Величина потерь на гистерезис зависит от частоты перемагничивания (частоты тока в рельсах) и значения максимальной индукции.

Удельные потери на гистерезис за один период изменения внешнего поля определяются площадью статической петли гистерезиса, полученной при медленном изменении магнитного потока [19]. Эти потери остаются постоянными в широком диапазоне частот, и для расчета потерь на гистерезис можно использовать формулу Штейнметца (*Steinmetz Charles Proteus*) [20]. Формула является чисто

эмпирическим соотношением и дает довольно точные результаты для ферромагнитных материалов.

Вихревое электрическое поле в проводящей среде приводит к появлению электрических токов, которые носят название токов Фуко (фр. *Leon Foucault*). Токи Фуко экранируют переменное магнитное поле так, что оно не проникает вглубь проводника. Чем быстрее изменяется поле, тем на меньшую глубину оно проникает в проводник. В хороших проводниках, к которым относится рельсовая сталь, уменьшение глубины проникновения поля становится заметным даже при невысоких частотах.

При возникновении вихревых токов за счет действия электромагнитной индукции в проводнике возникает поверхностный эффект, или скин-эффект (англ. *skin* — кожа, шкура), в результате чего величина переменного тока уменьшается в зависимости от степени его проникновения внутрь проводника [18]. Причем на поверхности проводника напряженность электрического поля соответствует направлению тока в проводнике, а внутри проводника направление напряженности поля противоположно этому току. Поэтому переменный электрический ток течет в большей степени вблизи поверхности провода, причем глубина его проникновения внутрь проводника тем меньше, чем выше частота тока. Индуктивность проводника с ростом частоты уменьшается. На постоянном токе скин-эффект никак не проявляется.

В рельсах, обладающих высокой магнитной проницаемостью, скин-эффект проявляется с исключительной силой, чем объясняются некоторые сложности при вычислении активного и индуктивного сопротивления рельсовых нитей. Явление поверхностного эффекта в рельсах сказывается тем сильнее, чем больше частота и величина тока, чем больше поперечное сечение рельса и меньше его поверхность, а также чем больше магнитная проницаемость стали, из которой изготовлен рельс.

Распределение переменного тока внутри проводника имеет экспоненциальный характер. Оценивают толщину скин-слоя  $\delta$  глубиной, на которой плотность тока уменьшается в  $e = 2,71828$  раза, т. е. до 37 % от поверхностной

плотности. Толщина скин-слоя определяется частотой тока в рельсах  $\omega$ , величиной удельного электрического сопротивления постоянному току используемой рельсовой стали  $\rho$  и ее относительной магнитной проницаемостью  $\mu_{er}$ . Для оценки толщины скин-слоя используется, например, формула [20]:

$$\delta = c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\rho}{\omega\mu_{er}}}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света, равная 299 792 458 м/с;  
 $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная  $8,85419 \times 10^{-12}$  Ф/м;

$\rho$  — удельное сопротивление материала проводника в Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Формула (2) справедлива для проводников круглого сечения. Форма поперечного сечения железнодорожных рельсов весьма далека от круга, а напряженность магнитного поля по мере углубления в рельсы будет падать. С точки зрения воздействия рассматриваемых помех на устойчивость работы приемников сигналов в РЦ и АЛС наиболее интересны электромагнитные поля, создаваемые переменным тяговым током в рельсах и сосредоточенные вблизи их поверхности катания.

Для строгого определения степени влияния поверхностного эффекта на сопротивление рельсов переменному току используют первое и второе уравнения Максвелла (англ. *James Clerk Maxwell*) или функции Бесселя (нем. *Friedrich Wilhelm Bessel*). Известны методики расчетов действия поверхностного эффекта для переменного магнитного поля в проводах круглого сечения с использованием уравнений Максвелла, и известны примеры расчетов с применением функций Бесселя для определения величины их электрического сопротивления с учетом скин-эффекта или плотности тока на оси и поверхности провода.

При количественной оценке действия скин-эффекта рельсы можно представить в первом приближении как три параллельно соединенных проводника — головка, шейка и подошва. Тогда их сечение — это совокупность соответственно цилиндрического провода и двух проводов в виде прямоугольных шин. Причем шейка представляется как плоская

вертикальная прямоугольная шина, а подошва — как большая по сечению плоская горизонтальная прямоугольная шина. Поверхности этих элементов имеют разрывы в местах соединений их между собой.

Тогда характер изменения величины электрического сопротивления рельсов от влияния скин-эффекта можно количественно оценить раздельно по степени его действия на нее при разных значениях электрических и магнитных параметров на эти элементы. К кругу наиболее близко поперечное сечение головки рельса. Поэтому такую оценку удобно производить с учетом и того, что головки являются верхней частью рельсов, наиболее близкой к поверхности их катания.

Площадь поперечного сечения головки рельса Р65 составляет 2819 мм<sup>2</sup>. Радиус круга с такой площадью равен 0,03 м. При температуре рельсов +20 °С удельное продольное сопротивление постоянному току рельсов в одной рельсовой нити плечевого пути составляет 0,0426 Ом/км.

При количественной оценке степени действия скин-эффекта на электрическое сопротивление головки рельсов переменному току разной частоты в первом приближении можно использовать инженерную методику расчетов сопротивления переменному току для проводов круглого сечения [21]. По этой методике сначала находят глубину скин-слоя при известном удельном сопротивлении провода постоянному току и относительной его магнитной проницаемости. А затем вычисляется отношение сопротивления такого проводника переменному току к сопротивлению для постоянного тока с учетом отношения радиуса проводника к глубине скин-слоя.

Процессы возникновения потерь мощности в рельсах с учетом скин-эффекта исследовались, например, в [18]. Формулы для определения активного и индуктивного сопротивления проводов из ферромагнитного материала есть в [22, 23].

### **3. Гармонический состав электрического тока в рельсах**

Уровень помех в рассматриваемых приемниках от тягового электрического тока в рельсах

зависит от суммарной мощности всех гармонических составляющих этого тока. Считается, что в рельсовых линиях на участках с электротягой переменного тока кроме сигнального тока текут токи помех с частотами нечетных гармоник промышленной частоты [7]. Однако реальный спектр частот помех значительно шире.

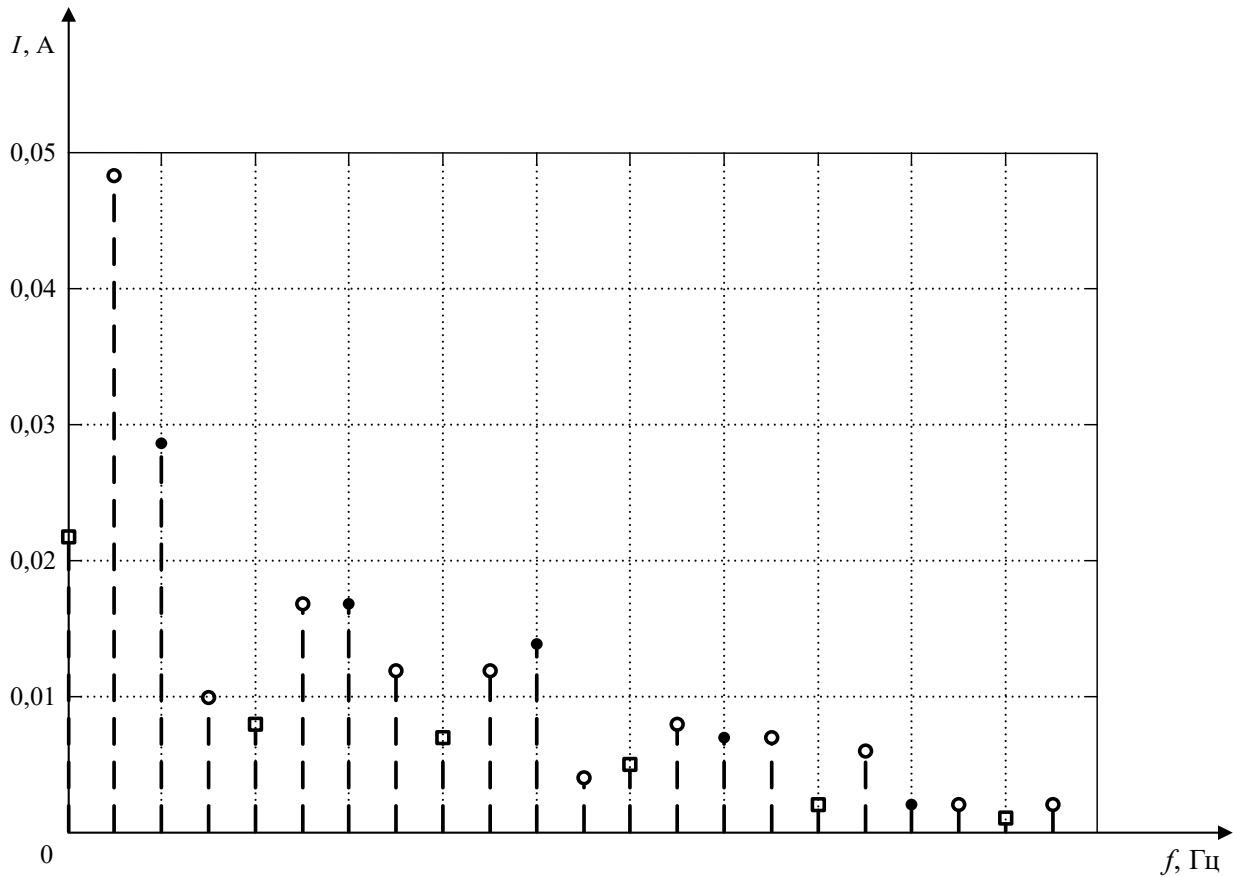
На рис. 1 приведены результаты измерения гармонического состава переменного тягового тока в рельсах на релейном конце одной из станционных РЦ Транссибирской магистрали.

В момент измерения действующие значения токов третьей, пятой и седьмой гармоник тягового тока оставляли более 70 %, по сравнению с сигнальным током частотой 25 Гц. Но ток в рельсах содержал значимые помехи и на других частотах. Достаточно большой была и величина постоянного тока. Изменения режимов работы силовых электроустановок у электровазов разных серий заметно изменяют спектр и величину гармоник, отчего спектр гармоник тягового тока может быстро изменяться. Это приходится учитывать при оценке влияния тяговых токов на электрические и магнитные параметры рельсовых нитей.

### **4. Относительная магнитная проницаемость и удельное сопротивление рельсов**

Величина относительной магнитной проницаемости рельсовой стали определяется по основной кривой намагничивания. График зависимости относительной магнитной проницаемости рельсовой стали  $\mu_{er}$  от напряженности магнитного поля  $H$  получен по результатам экспериментов в институте ЛЭТИИЖТ. Основные кривые намагничивания снимались также баллистическим методом для различных типов рельсов в лаборатории ОМИИТА [22].

Напряженность магнитного поля прямолинейного проводника с круглым сечением постоянна вдоль круговой силовой линии. Она прямо пропорциональна силе тока в проводнике круглого сечения и обратно пропорциональна расстоянию от проводника в плоскости, перпендикулярной проводнику. Но из-за сложности формы поперечного сечения рельса величину напряженности магнитного поля на плоскости



**Рис. 1.** Гармонический состав тока в рельсовой линии на релейном конце РЦ

его катания приходится находить, учитывая отдельно вклад в величину этой напряженности токов в головке, шейке и подошве рельса.

Если пренебречь влиянием сварных швов на величину электрического сопротивления рельсовой нити постоянному току в плетевом пути, то можно считать удельное продольное сопротивление его рельсовой нити  $\rho_T^{pp}$  равным удельному сопротивлению рельсовой стали  $\rho_T^p$ . В звеньевом пути необходимо учитывать электрические сопротивления элементов в болтовых соединениях рельсов.

Сопротивления токопроводящих стыков в звеньевом пути на электрифицированных железных дорогах не должны увеличивать продольное сопротивление рельсовой нити больше чем на 20 % [8]. Следовательно, удельное сопротивление рельсов в рельсовой нити в таком пути при температуре +20 °С должно быть не больше  $\rho_T^{p3} = 0,12 \cdot 1,2 = 0,144 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Изменение температуры рельсов в реальном диапазоне от -40 до +60 °С приводит к росту их удельного сопротивления и в плетевом,

и в звеньевом пути в 1,63 раза. В плетевом пути удельное сопротивление рельсов растет от 0,087 до 0,142 Ом · мм<sup>2</sup>/м. В звеньевом пути — с учетом того, что высыхание или замерзание влаги в продуктах коррозии или засорения междурельсовых соединений приводит к увеличению их сопротивления. В результате это сопротивление растет от 0,1 до 0,16 Ом · мм<sup>2</sup>/м.

При уменьшении температуры рельсов в плетевом или звеньевом пути до -40 °С их удельное сопротивление для постоянного тока уменьшается на 28 % относительно расчетного значения, а при увеличении этой температуры до +60 °С удельное сопротивление растет на 18 %.

При температуре рельсов +20 °С удельное продольное сопротивление одной рельсовой нити с рельсами Р65 с учетом площади их поперечного сопротивления в плетевом пути равно  $r_{п20} = (0,12/8265) \cdot 1000 = 0,0145 \text{ Ом/км}$ , а в звеньевом пути  $r_{з20} = (0,144/8265) \cdot 1000 = 0,0174 \text{ Ом/км}$ . При неудовлетворительном содержании верхнего строения в звеньевом пути это численное значение растет.

## 5. Изменения модуля сопротивления рельсов

Для работы приемников сигналов АЛС и РЦ наиболее благоприятны условия, когда продольное сопротивление рельсовых нитей минимально, а поперечное максимально. При уменьшении сопротивления сплошных рельсов начинает сильнее сказываться неравномерность распределения по длине рельсовых нитей сопротивления токопроводящих стыков.

Рост продольного сопротивления одной из рельсовых нитей вызывает уменьшение величины втекающего в нее тока и увеличение стекания этого тока из нее в землю по сравнению с другой рельсовой нитью. В результате растет асимметрия тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС и на выходном для тягового тока конце РЦ. Выявить эту причину сбоев в работе приемников сигналов и позволяет знание изменения во времени этого сопротивления.

Следовательно, при выявлении причин неустойчивой работы РЦ и устройств АЛС необходимо знать модуль сопротивления рельсовых нитей в конкретных условиях эксплуатации. Для вычисления модуля сопротивления рельсов чаще используют формулу Л. Неймана, полученную по результатам исследования явления распространения электромагнитной волны в ферромагнитной среде [23]. В ней используется произведение численных значений удельного сопротивления и относительной магнитной проницаемости стали. При вычислении аргумента этого сопротивления считается, что величина внутреннего индуктивного сопротивления рельса равна определенной доле активного его сопротивления [8, 23].

Для таких расчетов можно использовать также формулу К. Циклера, в которой берется отношение рассматриваемых параметров [24]. Эта формула получена чисто эмпирически. Корректность ее проверена, например, для стали со средним содержанием углерода 0,15 % (в составе рельсовой стали углерода 0,71–0,82 %).

Помехи на работу приемников сигналов в РЦ и АЛС создаются ортогональными сигналами гармонических помех. Средняя мощность помех от таких сигналов в приемнике не зависит от фаз отдельных гармоник и равна

сумме средних мощностей каждой гармоники [25]. Поэтому при анализе влияния помех на устойчивость работы приемников сигналов РЦ и АЛС нет необходимости проводить исследование изменения аргументов сопротивления рельсовых линий в процессе их эксплуатации.

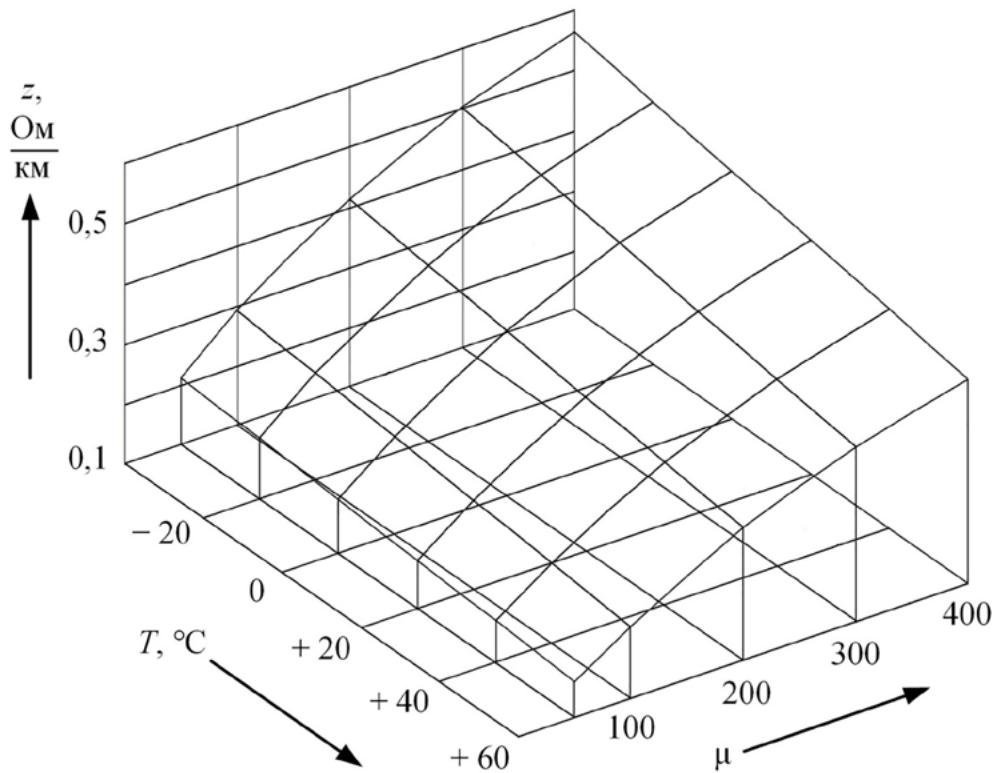
Количественная оценка влияния изменения электрических и магнитных параметров рельсовых линий с рельсами типа Р65 на их продольное сопротивление в процессе эксплуатации при использовании формулы Л. Неймана и инженерной методики оценки влияния скин-слоя показала следующее.

С ростом частоты тока от 25 до 350 Гц толщина скин-слоя в рельсовой стали уменьшается в 3,75 раза. Особенно заметное уменьшение толщины скин-слоя происходит при увеличении частоты тока в рельсах от частоты сигнального тока 25 Гц до частоты третьей гармоники тягового тока 150 Гц.

При одних и тех же условиях эксплуатации пути толщина скин-слоя в звеньевом пути в 1,3 раза меньше, чем в плетевом пути. Ухудшение состояния токопроводящих и изолирующих элементов в звеньевом пути и соответствующее увеличение продольного сопротивления рельсовой линии и вызывают дальнейшее уменьшение толщины скин-слоя. Поэтому в плетевом пути эти приемники работают более устойчиво, чем в звеньевом пути.

С ростом частоты тока в рельсах в два раза их активное сопротивление растет в 1,4 раза. Количественно анализировать то, как растет активное сопротивление рельсов при изменении электрических и магнитных свойств рельсов в ней, можно по изменению отношения величины удельного активного сопротивления рельсовой нити на определенной частоте, оцениваемой по величине потерь мощности переменного тока в ней, к величине ее удельного сопротивления для постоянного тока.

Зависимость этого отношения при относительной магнитной проницаемости, равной 100, когда частота тока в рельсах растет больше 25 Гц, практически линейна. Увеличение относительной магнитной проницаемости вызывает пропорциональный рост активных потерь мощности переменного тока. В плетевом пути с рельсами Р65 при величине относительной



**Рис. 2.** Диапазон изменения модуля электрического сопротивления рельсовых нитей для частоты 25 Гц

магнитной проницаемости, равной 100, величина удельного активного сопротивления рельсовой нити для третьей гармоники тягового тока частотой 150 Гц больше в 1,5–2 раза по сравнению с этим сопротивлением для частоты 50 Гц. С ростом величины тягового тока это отношение увеличивается.

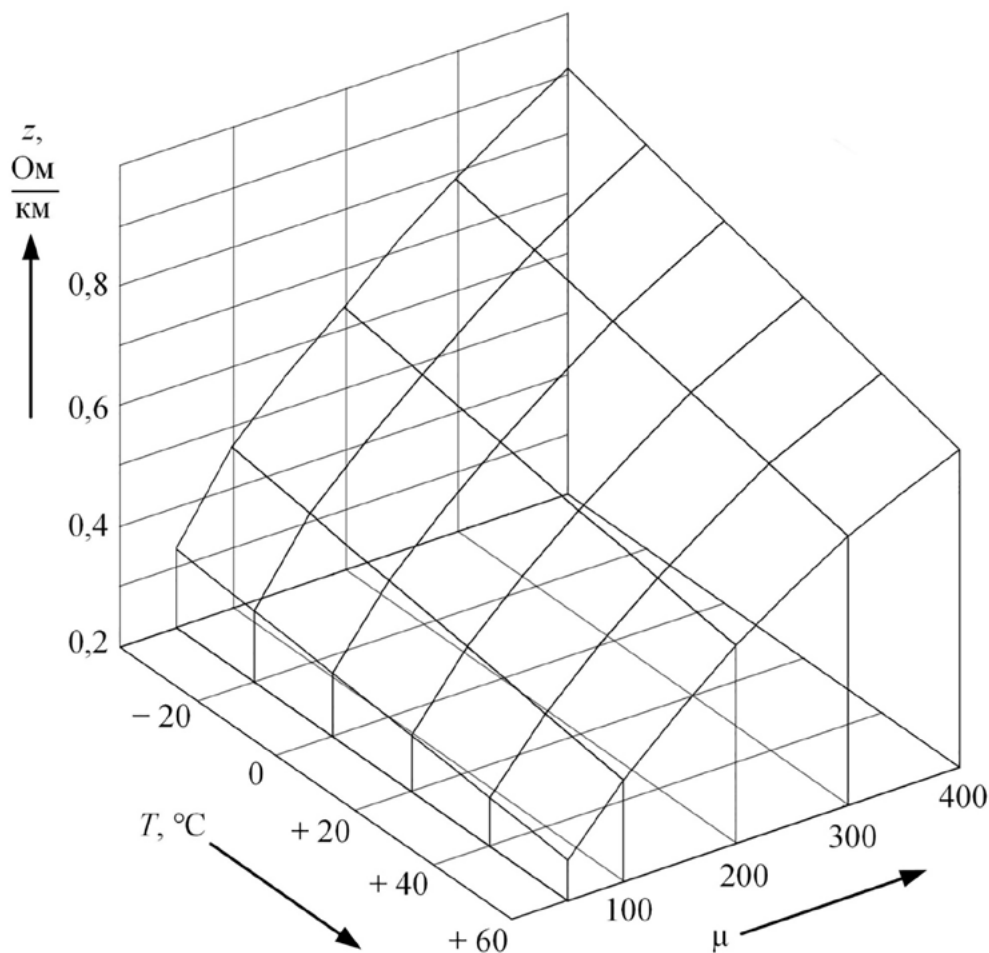
С уменьшением температуры рельсов их удельное сопротивление для постоянного тока уменьшается, однако это не приводит к уменьшению активного сопротивления рельсов для переменного тока. Вызвано это тем, что уменьшение удельного сопротивления рельсов для постоянного тока вызывает, в соответствии с формулой (2), уменьшение толщины скин-слоя с соответствующим увеличением сопротивления рельсов для переменного тока.

Для достоверности получаемой информации при работе РЦ в шунтовом и контрольном режиме важно понимать, насколько критично изменение сопротивления рельсовых линий. А это требует знания диапазона изменения величины этого сопротивления. На рис. 2 показано, как изменяется модуль расчетного сопротивления рельсов в рельсовой нити на частоте сигнального тока 25 Гц.

В целом модуль этого электрического сопротивления рельсовых нитей для частоты 25 Гц при одновременном изменении в рассматриваемых пределах температуры рельсов и, следовательно, их удельного сопротивления для постоянного тока, а также изменении величины электрического тока в рельсах и, соответственно, изменении их магнитной проницаемости может изменяться в 3,5 раза. Отклонения от величины модуля нормативного расчетного сопротивления при изменении температуры рельсов от  $-40$  до  $+60$  °C могут составлять 12–17 %. При изменении относительной магнитной проницаемости от 50 до 400 модуль расчетного сопротивления увеличивается в 2,7 раза.

Частотой 50 Гц могут обладать сигнальные токи РЦ при электротяге постоянного тока, а при электротяге переменного тока это основная частота помех на РЦ и на АЛС. На рис. 3 приведены результаты исследований, в каком диапазоне может изменяться модуль расчетного сопротивления рельсовых нитей в рельсовой линии в процессе ее эксплуатации на этой частоте.

Наиболее мощные помехи в рельсовой линии при электротяге переменного тока



**Рис. 3.** Диапазон изменения модуля электрического сопротивления рельсовых нитей для частоты 50 Гц

создают первая и третья гармоники тягового тока. Уровень помех на РЦ и АЛС является функцией соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей [8]. Увеличение частоты тока от 25 до 50 Гц приводит к росту величины модуля продольного сопротивлений рельсовой линии в среднем в 1,6 раза. На отклонение величины модуля расчетного сопротивления рельсовых линий от его нормативного значения при изменении температуры и относительной магнитной проницаемости в рассматриваемых пределах рост частоты тока сказывается мало.

Увеличение частоты тока помехи от 50 до 150 Гц вызывает рост модуля продольного сопротивления рельсовой линии в 1,12 раза. На отклонение величины модуля расчетного сопротивления рельсовых нитей от его стандартного значения при изменении температуры и относительной магнитной проницаемости

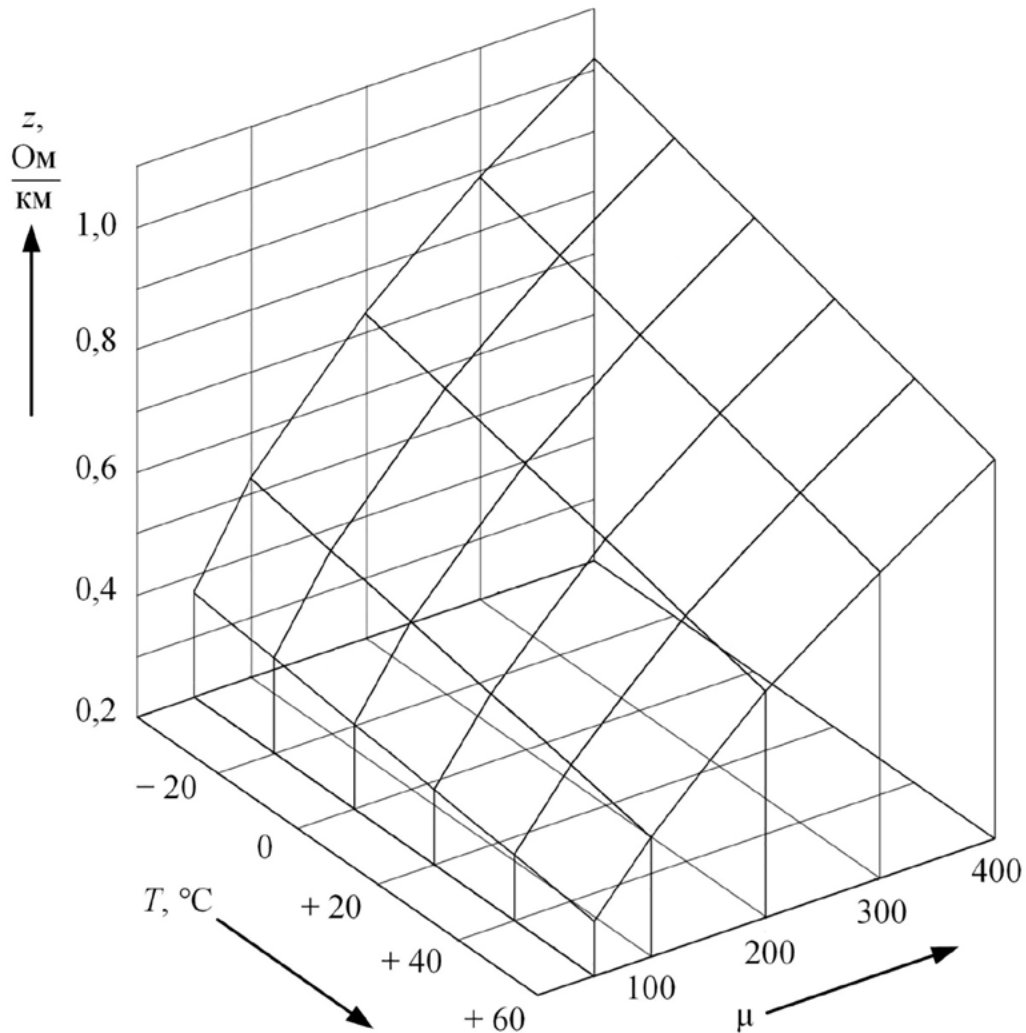
в рассматриваемых пределах рост частоты тока до 150 Гц также сказывается мало (рис. 4).

Таким образом, степень изменения величин модуля расчетного сопротивления рельсовых нитей от нормативного значения при изменении температуры и относительной магнитной проницаемости рельсов мало зависит от частоты тока в рельсовой линии.

### Заключение

В процессе эксплуатации сопротивления элементов рельсовых линий величина и гармонический состав тяговых токов в рельсах, создающих помехи на приемники сигналов в РЦ и в системах АЛС, могут изменяться в достаточно широких пределах. Расчеты режимов работы РЦ проводят при использовании нормативных удельных сопротивлений рельсов Р65 для разных частот сигнального электрического тока, полученных при действующем





**Рис. 4.** Диапазон изменения модуля электрического сопротивления рельсовых нитей для частоты 150 Гц

значении токов в рельсах не более 30 А и при температуре рельсов +20 °С. Это затрудняет прогнозирование степени устойчивости работы рельсовых цепей в режимах их работы и диагностирование причин при появлении сбоев в работе приемников сигналов.

Значения модуля продольного сопротивления рельсовых нитей изменяются во времени и по их длине в зависимости от состояния электропроводящих и изолирующих элементов в них, от температуры окружающей среды, от величины и гармонического состава токов в рельсах, от уровня остаточной намагниченности рельсов. Величина и гармонический состав тока под приемными локомотивными катушками АЛС и на релейном конце РЦ зависят не только от величин продольного и поперечного сопротивлений рельсовой линии, но

и от их соотношения, обычно изменяющегося по длине линии. Величина тока в рельсах и его гармонический состав изменяются при движении поездов. А продольное сопротивление рельсовой нити не всегда определяется сопротивлением сплошных рельсов в ней. Полученные результаты расширяют возможности расчетов рельсовых цепей и дают возможность повысить достоверность выявления причин их неустойчивой работы. ▲

#### Список источников

1. Ходкевич А. Г. Эволюция рельсовых цепей от реле до искусственного интеллекта / А. Г. Ходкевич, М. М. Соколов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 12. — С. 6–8. — DOI: 10.34649/АТ.2022.12.12.001.
2. Розенберг Е. Н. Проектные решения РСУДП для ВСЖМ-1 / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, А. Г. Баранов // Автоматика, связь, информатика. — 2024. — № 3. — С. 2–4. — DOI: 10.34649/АТ.2024.3.3.001.

3. Балуев Н. Н. Рельсовые цепи — вчера, сегодня, завтра / Н. Н. Балуев // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 2. — С. 30–31.
4. Na L. Fault Prediction of Track Circuit Based on Bidirectional Gated Recurrent Unit with Attention Mechanism / L. Na, S. Dai // 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). — Macau, China. — 2022. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922582.
5. Vantuono W. Train control systems in the United States / W. Vantuono // International Railway Journal. — 2009. — Iss. 10. — Pp. 32–34.
6. Railway Operation and Control. 3rd edition. — Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. — 2014. — 284 p.
7. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учебник / М. П. Бадер. — М.: 2002. — 638 с.
8. Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2018: electronic publication, Kazan, September 14–17, 2018. — Kazan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. — P. 8524676. — DOI: 10.1109/EWDTs.2018.8524676.
9. Манаков А. Д. Опасное электромагнитное воздействие обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на устройства ЖАТ / А. Д. Манаков, А. А. Рахмонбердиев // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 3. — С. 233–251. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-233-251.
10. Акулиничев Ю. П. Теория электрической связи: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, А. С. Бернгардт. — М.: ТУСУР, 2015. — 196 с.
11. Тимофеев И. А. Электротехнические материалы и изделия: учебное пособие / И. А. Тимофеев. — СПб.: Лань, 2022. — 272 с.
12. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник / В. С. Аркатов, Н. Ф. Котляренко, А. И. Баженов, Т. Л. Лебедева. — М.: Транспорт, 1982. — 360 с.
13. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. — М.: «ООО Миссия-М», 2006. — 496 с.
14. Свод правил «Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования». СП 235.1326000.2015. Утвержден приказом Минтранса России № 205 от 06.07.2015. — 176 с.
15. Shamanov V. I. Interference from Traction-Current Harmonics in Rails on Automatic Locomotive Signaling Systems and Track Circuits / V. I. Shamanov, D. V. Denezhkin // Russian Electrical Engineering. — 2023. — Vol. 94. — Iss. 9. — Pp. 671–674. — DOI: 10.3103/s1068371223090134.
16. Антонов А. Первичные параметры рельсовой линии различных участков железных дорог / А. Антонов, Е. Антонова, А. Дви Чахьяни, Г. Чернева // Механика, транспорт, коммуникации. — 2022. — Т. 20. — № 3/2.
17. Shamanov V. I. The magnetic properties of rail lines and level of interferences for the apparatus of automatic control and telemechanics / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. — 2015. — Vol. 86. — Pp. 548–552. — DOI: 10.3103/S1068371215090102.
18. Bertotti G. Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers / G. Bertotti. — Academic Press, 1998. — P. 558.
19. Смайт В. Электростатика и электродинамика / В. Смайт. — М.: Иностранная литература, 1954. — 604 с.
20. Fahy S. Electromagnetic screening by metals / S. Fahy, Ch. Kittel, S. G. Louie // American Journal Physics. — 1988. — Vol. 56. — Iss. 11. — Pp. 989–992.
21. Усенко А. П. Активное внутреннее индуктивное сопротивление рельсов / А. П. Усенко, М. Г. Шалимов // Электроснабжение электрических железных дорог. — Омск, 1969. — Т. 104. — Ч. 1. — С. 65–70.
22. Усенко А. П. К вопросу определения сопротивления рельса при повышенных частотах / А. П. Усенко // Энергоснабжение электрических железных дорог. — Омск, 1967. — Т. 83. — С. 67–71.
23. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. — Ленинград: Госэнергоиздат, 1949. — 190 с.
24. Гольдберг Ф. Я. За рациональное конструирование внутрицеховых электросетей / Ф. Я. Гольдберг // Электричество. — 1941. — № 4. — С. 28–32.
25. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. — М.: Высшая школа, 2003. — 462 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 2, pp. 109–119

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119

### Influence of Operating Conditions on the Electrical and Magnetic Parameters of Rails

#### Information about author

**Shamanov V. I.**, Doctor in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Transport. E-mail: shamanov\_vi@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Moscow

**Abstract:** This paper presents the research demonstrating how the longitudinal resistance modules of rail threads change during operation for different values of specific resistance of rails and specific magnetic permeability. In this instance, the impact of hysteresis losses and surface (skin) effects on the active resistance of rails was carefully

considered. Module change graphs were constructed for the calculated rail thread resistance at signal current frequencies of 25, 50 and 150 Hz. The rail thread specific operating conditions provide further information on the causes of failures in the operation of rail circuits and automatic locomotive alarm systems. This extends the range of calculations relating to rail circuit operation modes, with the aim of enhancing the efficient detection of failure causes.

**Keywords:** rail threads; longitudinal resistance; resistivity; relative magnetic permeability; skin effect; operating conditions.

#### References

1. Khodkevich A. G., Sokolov M. M. Evolyutsiya rel'sovykh tsepey ot rele do iskusstvennogo intellekta [Evolution of track circuits from relays to artificial intelligence]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2022, Iss. 12, pp. 6–8. DOI: 10.34649/AT.2022.12.12.001. (In Russian)
2. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Baranov A. G. Proektnye resheniya RSUDP dlya VSZhM-1 [Design solutions for the RSUDP for the VSZhM-1]. *Avtomatika, svyaz', informatika*

- [Automation, communications, informatics]. 2024, Iss. 3, pp. 2–4. DOI: 10.34649/AT.2024.3.3.001. (In Russian)
3. Baluev N. N. Rel'sovye tsepi — vchera, segodnya, zavtra [Track circuits — yesterday, today, tomorrow]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2019, Iss. 2, pp. 30–31. (In Russian)
  4. Na L., Dai S. Fault Prediction of Track Circuit Based on Bidirectional Gated Recurrent Unit with Attention Mechanism. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Macau, China, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922582.
  5. Vantuono W. Train control systems in the United States. *International Railway Journal*, 2009, Iss. 10, pp. 32–34.
  6. *Railway Operation and Control*. 3rd edition. Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014, 284 p.
  7. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost': uchebnik* [Electromagnetic compatibility: textbook]. Moscow: 2002, 638 p. (In Russian)
  8. Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control. Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2018: electronic publication, Kazan, September 14–17, 2018. Kazan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, p. 8524676. DOI: 10.1109/EWDTs.2018.8524676.
  9. Manakov A. D., Rakhmonberdiev A. A. Opasnoe elektromagnitnoe vozdeystvie obratnoy tyagovoy seti peremennogo toka napryazheniem 25 kv na ustroystva ZhAT [Hazardous electromagnetic impact of the reverse traction network of alternating current with a voltage of 25 kV on the devices of the railway automation and control system]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2022, vol. 8, Iss. 3, pp. 233–251. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-233-251. (In Russian)
  10. Akulinichev Yu. P., Bergardt A. S. *Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnoe posobie* [Theory of electrical communication: a tutorial]. Moscow: TUSUR Publ., 2015, 196 p. (In Russian)
  11. Timofeev I. A. *Elektrotekhnicheskie materialy i izdeliya: uchebnoe posobie* [Electrical materials and products: a tutorial]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2022, 272 p. (In Russian)
  12. Arkatov V. S., Kotlyarenko N. F., Bazhenov A. I., Lebedeva T. L. *Rel'sovye tsepi magistral'nykh zheleznykh dorog: Spravochnik* [Track circuits of main railways: Handbook]. Moscow: Transport Publ., 1982, 360 p. (In Russian)
  13. Arkatov V. S., Arkatov Yu. V., Kazeev S. V., Obodovskiy Yu. V. *Rel'sovye tsepi magistral'nykh zheleznykh dorog: spravochnik* [Track circuits of main railways: Handbook]. Moscow: "000 Missiya-M" Publ., 2006, 496 p. (In Russian)
  14. *Svod pravil "Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proektirovaniya". SP 235.1326000.2015. Utverzhden prikazom Mintransa Rossii № 205 ot 06.07.2015* [Code of rules "Railway automation and telemechanics. Design rules". SP 235.1326000.2015. Approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation № 205 dated 06.07.2015]. 176 p. (In Russian)
  15. Shamanov V. I., Denezhkin D. V. Interference from Traction-Current Harmonics in Rails on Automatic Loco-motive Signaling Systems and Track Circuits. *Russian Electrical Engineering*, 2023, vol. 94, Iss. 9, pp. 671–674. DOI: 10.3103/s1068371223090134.
  16. Antonov A., Antonova E., Chakh'yan Dvi A., Cherneva G. Pervichnye parametry rel'sovoy linii razlichnykh uchastkov zheleznykh dorog [Primary parameters of a rail line of various sections of railways]. *Mekhanika, transport, kommunikatsii* [Mechanics, transport, communications]. 2022, vol. 20, Iss. 3/2. (In Russian)
  17. Shamanov V. I. The magnetic properties of rail lines and level of interferences for the apparatus of automatic control and telemechanics. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, pp. 548–552. DOI: 10.3103/S1068371215090102.
  18. Bertotti G. Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers. Academic Press, 1998, p. 558.
  19. Smayt V. *Elektrostatika i elektrodinamika* [Electrostatics and Electrodynamics]. Moscow: Inostr. lit-ra Publ., 1954, 604 p. (In Russian)
  20. Fahy S., Kittel Ch., Louie S. G. Electromagnetic screening by metals. *American Journal Physics*, 1988, vol. 56, Iss. 11, pp. 989–992.
  21. Usenko A. P., Shalimov M. G. Aktivnoe vnutrennee induktivnoe soprotivlenie rel'sov [Active internal inductive resistance of rails]. *Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog* [Power supply of electric railways]. Omsk, 1969, vol. 104, part 1, pp. 65–70. (In Russian)
  22. Usenko A. P. K voprosu opredeleniya soprotivleniya rel'sa pri povyshennykh chastotakh [On the issue of determining the resistance of a rail at elevated frequencies]. *Energосnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog* [Power supply of electric railways]. Omsk, 1967, vol. 83, pp. 67–71.
  23. Neyman L. R. *Poverkhnostnyy effekt v ferromagnitnykh telakh* [Surface effect in ferromagnetic bodies]. Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1949, 190 p. (In Russian)
  24. Gol'dberg F. Ya. Za ratsional'noe konstruirovaniye vnutritsekhovykh elektrosyetey [For rational design of intra-shop electrical networks]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1941, Iss. 4, pp. 28–32. (In Russian)
  25. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003, 462 p. (In Russian)