

Электротехника

УДК 621.318.25

ЧИСЛЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ РЕЛЬСОВ В РЕЛЬСОСВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.Р. Христинич¹, Р.М. Христинич², Е.В. Христинич²

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта,
филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»
Россия, 660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89

²Красноярский государственный аграрный университет
Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90

Аннотация. Рассмотрена трехмерная численная математическая модель для исследования эффективности размагничивания рельсовых плетей в рельсосварочном производстве. Представлены основные допущения при решении электромагнитной задачи системы «индуктор – рельс», определены граничные условия, заданы токовые нагрузки источников электромагнитного поля, определены краевые условия задачи. Расчет электромагнитного поля модели «индуктор – рельс» выполняется в программном комплексе ANSYS. Численная математическая модель позволяет исследовать процесс размагничивания рельса при воздействии электромагнитным полем пониженной частоты. Определены эффективные параметры и характеристики установки размагничивания рельсов для достижения наибольшего эффекта размагничивания рельсов.

Ключевые слова: трехмерная численная математическая модель, размагничивание рельса, установка размагничивания рельсов, эффективные параметры.

Введение

В сети железных дорог существует проблема неравномерной намагниченности рельсов, которая возникает при их прокатке и погрузке (в местах захвата), а также при сварке рельсов между собой и их эксплуатации [1]. Это служит причиной сбоев автоматической локомотивной сигнализации «КЛУБ», связанных с ее чувствительностью к токам, наведенным в приемных катушках локомотива намагниченностью рельса при движении локомотива [2]. Вследствие этого приборы безопасности локомотива получают ложный кодовый сигнал, который не соответствует сигналам путевого светофора.

Христинич Алексей Романович (к.т.н.), доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов».

Христинич Роман Мирославович (д.т.н.), профессор кафедры «Теоретические основы электротехники».

Христинич Елена Витальевна (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретические основы электротехники».

Основным и наиболее широко применяемым устройством для размагничивания рельсов в рельсосварочном производстве являются соленоидальные катушки (соленоиды), реализованные в установке размагничивания рельсов (УРР) [3]. Работа УРР основана на принципе размагничивания рельса в однородном электромагнитном поле, которое создается соленоидами, расположенными соосно. Рельс размагничивается, проходя через плавно возрастающее и затем плавно убывающее электромагнитное поле [4].

В качестве соленоидов широко применяются катушки Гельмгольца, которые традиционно используют для получения практически однородного электромагнитного поля [5]. Расчет соленоидов можно провести при использовании методики, изложенной в [6].

Существующее оборудование для размагничивания рельсов, которое применяют в дистанциях пути, а также используемые УРР в рельсосварочном производстве дают эффект только на 60–70 %. Остаточная намагниченность рельсов остается в глубинных слоях рельсов, что проявляется в процессе эксплуатации рельсов и требует значительных трудозатрат при размагничивании рельсов в процессе их эксплуатации [7, 8].

В связи с этим совершенствование системы размагничивания рельсов для повышения эффективности существующих УРР является актуальной задачей и требует более глубокого исследования процессов размагничивания рельсов.

1. Постановка задачи, исходные данные и основные допущения для решения электромагнитной задачи

Питание существующей УРР, индуктор которой состоит из двух соленоидов, осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В. Установка создает электромагнитное поле в области, охваченной индуктором, напряженностью не менее 30 000 А/м при токе через катушки индуктора не менее 120 А.

Основные допущения при решении электромагнитной задачи системы «индуктор – рельс»: не учитываются вспомогательные элементы индуктора – крепления катушек, защитные закрытия кожуха; принимаются изотропные свойства магнитной проницаемости μ и электропроводности γ для конструктивных элементов индуктора; не учитываются изменения электрических и магнитных характеристик материалов при изменении температуры индуктора и температуры рельса. Свойства материалов приняты следующие:

– относительная магнитная проницаемость катушки индуктора и воздушного пространства вокруг него $\mu_r = 1$;

– удельное электрическое сопротивление рельса во всех направлениях $\rho_{\text{в}} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

– относительная магнитная проницаемость стали рельса $\mu_r = 220$;

– удельное электрическое сопротивление меди обмотки индуктора $\rho_{\text{об}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

– удельное электрическое сопротивление внешнего пространства расчетной области $\rho_{\text{вн}} = 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Основные данные, определяющие геометрию расчетной области и параметры в месте расположения системы «индуктор – рельс», приведены в табл. 1.

Данные индуктора УРР

Параметр	Обозначение	Размерность	Величина
Внутренний диаметр катушки индуктора	d	мм	250
Наружный диаметр катушки индуктора	D	мм	450
Высота катушки индуктора	g	мм	100
Расстояние между центрами катушек индуктора	l	мм	200(100)
Напряжение питания индуктора	U	В	220
Частота напряжения питания	f	Гц	1–50
Ток в катушке индуктора	I	А	120
Число витков катушки индуктора (каждой)	W	витков	125

2. Численная математическая модель анализа электромагнитного поля системы «индуктор – рельс»

Для исследования распределения магнитной индукции в теле рельса в модели системы «индуктор – рельс» в ANSYS (рис. 1) представлен индуктор, содержащий три катушки, включенные согласно, которые охватывают рельс. Применение в модели трех катушек позволяет создать более протяженное однородное переменное магнитное поле, исключив в большей степени влияние краевых эффектов индуктора.

Переменное электромагнитное поле в расчетной области (см. рис. 1) создается токами, зависящими не только от координат, но и от времени, которое описывается системой уравнений Максвелла [9]. Токовые нагрузки катушек обмотки индуктора определены в виде компонент вектора плотности тока, изменяющихся по синусоидальному закону:

$$\vec{J} = J_a \sin(\omega t + \varphi).$$

Расчет электромагнитного поля в модели выполняется в программном комплексе ANSYS [10].

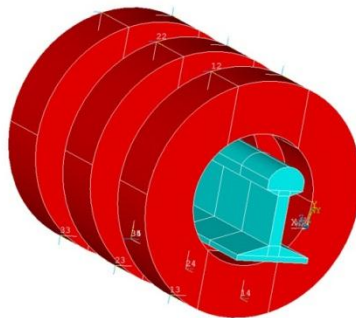


Рис. 1. Модель системы «индуктор – рельс» в ANSYS

Электромагнитная задача в ANSYS представлена в виде системы уравнений для векторного магнитного потенциала [9], которая посредством метода конеч-

ных элементов сводится к решению уравнений для нестационарного процесса [11].

Для решения системы уравнений в расчетной области «индуктор – рельс» определяются граничные условия, задаются токовые нагрузки источников электромагнитного поля, определяются краевые условия:

- на краю расчетной области справедливым является условие $\vec{H}_\tau = 0$;
- на границе раздела сред «индуктор – воздух» и «воздух – рельс» справедливо соответственно условия

$$\vec{H}_{\tau 1} = \vec{H}_{\tau 2} \text{ и } B_{n1} = B_{n2}.$$

Здесь \vec{H}_τ – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля;
 B_n – нормальная составляющая магнитной индукции.

Исходные условия в расчетной области определяются следующим образом:

- для векторного магнитного потенциала

$$A_{ijm} \Big|_{t=0} = 0,$$

где i, j, m – номер расчетного узла в трехмерной системе координат;

t – время;

- для электрического потенциала

$$\phi_{ijm} \Big|_{t=0} = 0;$$

- для скорости движения рельса в начальный момент времени

$$V_{ijm} \Big|_{t=0} = 0.$$

Особенности настройки расчетной модели и решателя в среде ANSYS следующие: расчетная область системы «индуктор – рельс» ограничивается кубом с размерами сторон, равными двукратному наружному диаметру катушек индуктора; тип элементов – гексаэдры; величина стороны гексаэдра в головке рельса в три раза меньше, чем в катушке индуктора; количество гексаэдров в поперечном сечении головки рельса, где требуется получить наиболее точное значение магнитной индукции, следующее: по вертикали – 17 элементов, по горизонтали – 32 элемента; разбиение расчетной области на элементы выполняется от оси модели к краям; стыковка элементов на границах сред выполняется автоматически после «склейки» объемов сред (булева операция); тип расчета – гармонический; количество элементов в расчетной области – свыше 500 тыс.; количество узлов сетки – свыше 600 тыс.; время расчета – 15 ч при величине погрешности, равной 10^{-6} .

Настройка расчетной модели «индуктор – рельс» выполнена посредством сравнения величины магнитной индукции над головкой рельса, полученной экспериментальным путем [12], с данными, рассчитанными при использовании разработанной численной математической модели в ANSYS (рис. 2).

Настройка численной математической модели выполнялась следующим образом. Максимальное измеренное значение магнитной индукции над головкой неразмагниченного рельса (см. рис. 2), произведенного в рельсосварочном производстве, составляет 0,0028 Тл. Для осуществления эффекта размагничивания

величина индукции генерируемого переменного магнитного поля в области самого ответственного участка – головки рельса – должна быть больше максимального значения намагниченности головки рельса.

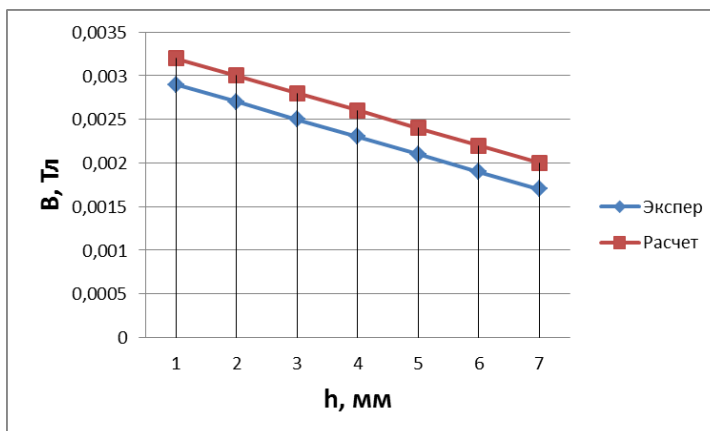


Рис. 2. Изменение величины магнитной индукции над головкой рельса

Максимальное значение магнитной индукции, генерируемой рассматриваемым индуктором, составляет 0,0032 Тл (см. рис. 2) и превышает величину магнитной индукции намагниченной поверхности головки рельса в этой точке на 12 %. В связи с этим при настройке численной математической модели подбирались параметры индуктора (см. табл. 1) – число витков катушки индуктора и ток катушки индуктора, которые обеспечивают выполнение данного условия. Превышение генерируемой индуктором величины магнитной индукции электромагнитного поля в области головки рельса над величиной магнитной индукции намагниченной поверхности головки рельса позволяет уменьшить последнюю до минимальных значений.

3. Исследование распределения магнитной индукции в рельсе

Одним из важных аспектов при проведении размагничивания рельсов является наличие остаточной намагниченности в рельсе после воздействия электромагнитного поля.

На рис. 3 представлена картина распределения магнитной индукции в поперечном сечении рельса при частоте 50 Гц питающего индуктор напряжения. При этом глубина проникновения переменного магнитного поля в тело рельса составила не более 2 мм, а величина магнитной индукции на поверхности головки рельса равна 0,6–0,8 Тл.

При использовании трех катушек, включенных и расположенных по рекомендациям Гельмгольца [5], когда расстояние между центрами катушек индуктора равно радиусу катушек, наблюдаются провалы магнитной индукции между катушками на поверхности головки рельса.

Для размагничивания массивных ферромагнитных изделий известны размагничивающие устройства, содержащие индуктор, катушки которого питаются напряжением, в том числе, пониженной частоты, что позволяет размагничивать внутренние слои массивных изделий [13].

Глубина проникновения r электромагнитного поля в головку рельса при уменьшении частоты f питающего индуктор напряжения от 50 до 1,0 Гц представлена в табл. 2.

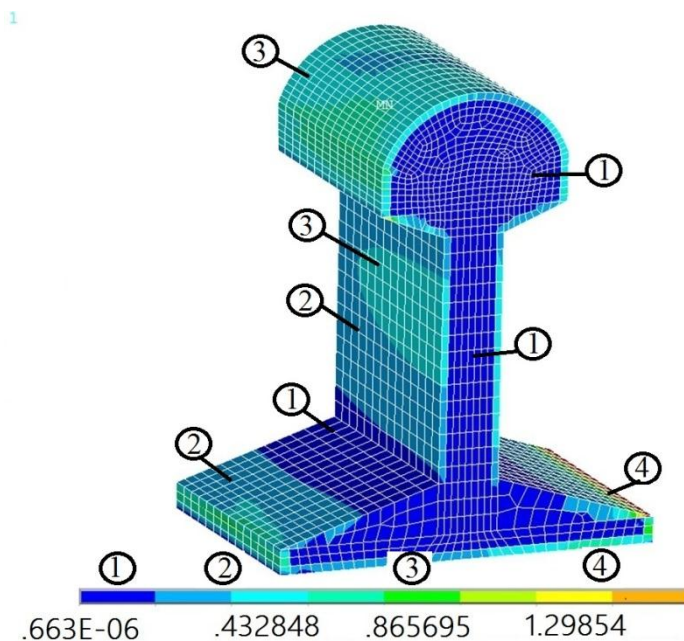


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении рельса при частоте питающего УРР напряжения 50 Гц:

① – 0,663E-06 Тл; ② – 0,432848 Тл; ③ – 0,865695 Тл; ④ – 1,29854 Тл

Таблица 2

Изменение глубины проникновения электромагнитного поля в тело рельса от частоты

f , Гц	50,0	30,0	10,0	5,0	2,5	1,0
r , мм	1,74	2,24	3,89	5,5	8,0	12,3

При частоте питающего индуктор УРР напряжения 10 Гц глубина проникновения электромагнитного поля в глубину рельса составляет около 4 мм (см. табл. 2), что оставляет глубинные слои головки рельса намагниченными.

На рис. 4 представлена картина распределения магнитной индукции в поперечном сечении рельса при частоте питающего индуктор УРР напряжения 2,5 Гц. Глубина проникновения электромагнитного поля в этом случае составляет около 8 мм. При этом наблюдается обширная внутренняя область вокруг продольной оси головки рельса, которая не подвержена воздействию электромагнитного поля. Если в этой области существует пятно намагниченности головки рельса, то оно останется после работы установки размагничивания рельсов.

Для исследования глубинных слоев головки рельса проводились расчеты при более низкой частоте питающего катушки индуктора напряжения. На рис. 5 представлена картина распределения магнитной индукции в головке рельса при

частоте питающего напряжения 1 Гц. Глубина проникновения электромагнитного поля в головку рельса составляет около 12 мм.

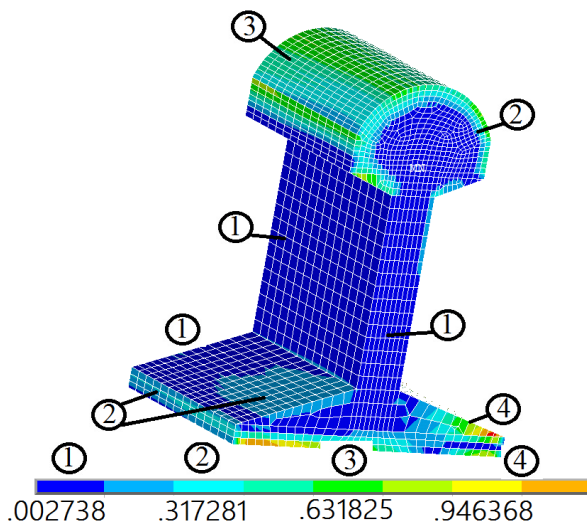


Рис. 4. Картина распределения магнитной индукции в поперечном сечении рельса при частоте питающего индуктор УРР напряжения 2,5 Гц:

① – 0,002738 Тл; ② – 0,317281 Тл; ③ – 0,631825 Тл; ④ – 0,946368 Тл

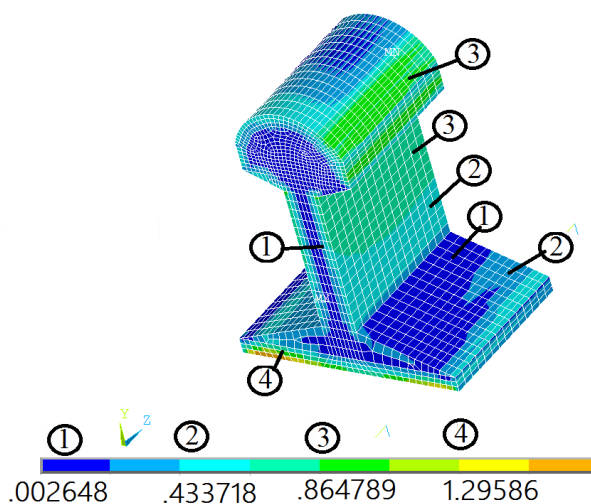


Рис. 5. Картина распределения магнитной индукции в головке рельса при частоте напряжения УРР 1 Гц:

① – 0,002648 Тл; ② – 0,433718 Тл; ③ – 0,864789 Тл; ④ – 1,29586 Тл

Так как средний радиус головки рельса составляет около 36 мм, то даже при частоте питающего индуктор напряжения 1 Гц остается внутренняя область вокруг продольной оси головки рельса, которая не подвергается воздействию элек-

ромагнитного поля [14]. Однако эта область окружена размагниченной приповерхностной областью рельса глубиной 12 мм, что позволит даже при наличии магнитного пятна в глубине ограничить его проявление на поверхности головки рельса.

На рис. 6 представлена картина распределения магнитной индукции по поверхности рельса при расстоянии между центрами катушек индуктора 200 мм.

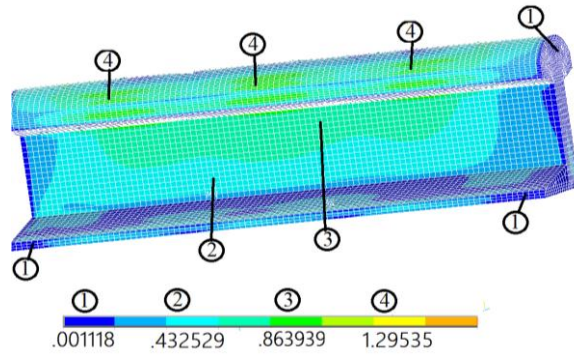


Рис. 6. Неравномерность распределения магнитной индукции по поверхности рельса при расстоянии между центрами катушек 200 мм:

① – 0,001118 Тл; ② – 0,432529 Тл; ③ – 0,863939 Тл; ④ – 1,29535 Тл

В местах между катушками наблюдается снижение магнитной индукции в 2–3 раза на поверхности головки рельса, что снижает качество размагничивания рельса.

Для более равномерного распределения магнитной индукции по длине рельса является целесообразным располагать катушки индуктора УРР на расстояниях между центрами катушек, не превышающих 0,5 радиуса катушки.

На рис. 7 представлена картина распределения магнитной индукции по поверхности рельса при расстояниях между центрами катушек индуктора 100 мм.

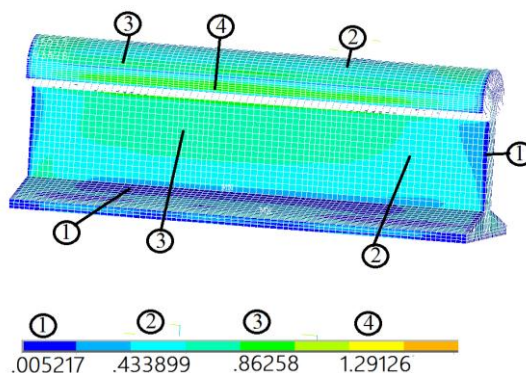


Рис. 7. Равномерное распределение магнитной индукции по поверхности головки рельса при расстоянии между центрами катушек индуктора 100 мм:

① – 0,005217 Тл; ② – 0,433899 Тл; ③ – 0,86258 Тл; ④ – 1,29126 Тл

Картина распределения магнитной индукции, представленная на рис. 7, показывает, что распределение магнитной индукции по поверхности головки рельса в продольном направлении рельса практически равномерное.

При выборе количества катушек индуктора (длины индуктора) УРР следует принимать во внимание следующие особенности:

- влияние конечных эффектов индуктора на длину области с равномерной величиной магнитной индукции;
- влияние длины индуктора на формирование равномерной величины магнитной индукции при движении рельса;
- влияние частоты питающего напряжения при выборе длины индуктора.

Такой подход позволяет увеличить в аксиальном направлении активную область индуктора, что способствует более эффективному размагничиванию рельсов при их движении, например в рельсосварочной установке.

Глубина проникновения электромагнитной волны в тело рельса на частоте $f = 1$ Гц будет равна 0,0123 м. Определим для частоты $f = 1$ Гц длину электромагнитной волны λ , на которой фаза колебания изменяется на 2π . Длину волны определим из уравнения [9]

$$\lambda k = 2\pi.$$

$$\text{Здесь } k = \sqrt{\frac{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_r \cdot \mu_0}{2}} = \sqrt{\frac{6,28 \cdot 7,6 \cdot 10^6 \cdot 220 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2}} = 81,22 \text{ м}^{-1},$$

где ω – угловая частота переменного тока; γ – электропроводность рельса; μ_r – относительная магнитная проницаемость рельса; μ_0 – магнитная постоянная. В нашем случае:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 6,28 \text{ с}^{-1};$$

$$\gamma = 1/\rho_s = 1/0,13 \cdot 10^{-6} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ См*м};$$

$$\mu_r = 220 ; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Тогда длина электромагнитной волны будет равна

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{81,22} = 0,077 \text{ м}.$$

Определим фазовую скорость распространения электромагнитной волны в теле рельса для $\lambda = 0,077$ м. Тогда фазовая скорость будет равна

$$v_\phi = \frac{\omega}{k} = \frac{6,28}{81,22} = 0,077 \text{ м/с}.$$

4. Обсуждение результатов

Работа существующей двухкатушечной УРР в красноярском рельсосварочном производстве позволяет снизить величину намагниченности поверхности головки рельса от 1,82 до 8,0 раз в сравнении с исходной намагниченностью [9]. Такой разброс снижения намагниченности поверхности головки рельса зависит от скорости протягивания рельса через индуктор: пробуксовки рельса в начальный период движения и его ускорением в последующие моменты. Минимальное

значение магнитной индукции остаточной намагниченности на поверхности головки рельса не должно превышать 0,0004 Тл, что является допустимым.

Питание УРР напряжением 50 Гц размагничивает только поверхностную область рельса глубиной до 2,0 мм (см. табл. 2). Это приводит к новому проявлению магнитных пятен на поверхности рельса через некоторое время, что требует повторного размагничивания мобильной установкой.

При работе предлагаемой трехкатушечной установки размагничивания рельсов на частоте 1,0 Гц скорость движения рельса не должна превышать 0,077 м/с, что обеспечит равномерное снижение магнитной индукции остаточной намагниченности по всей длине рельса. Величина магнитной индукции остаточной намагниченности на поверхности рельса не будет превышать 0,0004 Тл. При этом возможная остаточная намагниченность глубинных слоев головки рельса будет локализована размагниченной приповерхностной областью. Более эффективный подход к размагничиванию рельсов в рельсосварочном производстве позволяет реализовать автоматизированная установка размагничивания рельсов, которая основывается на устройстве размагничивания рельсов, описанном в [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А. Анализ влияния неравномерной намагниченности рельсов на устойчивость работы АЛСН // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2(30). – С. 206–210.
2. Пулятков А.В., Скоробогатов М.Э. Системный анализ устойчивости работы систем автоматической локомотивной сигнализации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 57, № 1. – С. 79–89.
3. Федеральный информационный фонд отечественных и иностранных каталогов промышленной продукции [Электронный ресурс]. Установка для размагничивания объемно-закаленных рельсов УРР-1. Шифр ПК0520901. – Режим доступа: <http://промкаталог.рф>.
4. *Mauer Magnetic AG*. Demagnetizing buldings and infrastructure [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.maurerdegaussing.com/en/applications/buildings-infrastructure>.
5. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Оникс XXI в.: Мир и образование, 2005. – 463 с.
6. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
7. Степанов М.А., Степанов А.П. Способы устранения сбоя в работе железнодорожной системы автоматики и телемеханики, вызванных повышенной намагниченностью рельсов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 1 (45). – С. 168–172.
8. Способ устранения остаточной неравномерной намагниченности рельсов: пат. 2579236 Рос. Федерация. № 2014131428 / 11 / Трофимов Ю.А., Пулятков А.В.; заявл. 29.07.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. 6 с.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле: учеб. для бакалавров. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 317 с.
10. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие – М.: Академия, 2006. – 288 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 5-7695-2064-7.
11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Volume 1. Woburn: Butterwort – Heineman, 2000. – 712 p.
12. Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.П. Исследование размагничивания рельсовых плетей в рельсосварочном производстве // Вестник КрасГАУ. – 2014. – Вып. 4. – С. 242–248.
13. Устройство и способ размагничивания длинномерных ферромагнитных изделий: пат. 2419906 Рос. Федерация. № 2010110385/07 / Цыпуштанов А.Г., Елисеев К.Е., Червонцев А.А., заявл. 18.03.2010, опубл. 27.05.2011. Бюл. № 15. 10 с.
14. Гольдштейн А.Е., Уразбеков Е.И., Корниенко А.И. Устройство высокопроизводительного размагничивания длинномерных цилиндрических изделий // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 135–138.

15. Устройство размагничивания рельса: пат. 259236 Рос. Федерация. № 2014111837 / 07 / Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявл. 27.03.2014; опубл. 20.09.2014. Бюл. № 26. 2 с.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2018 г.

NUMERICAL MATHEMATICAL MODEL DEMAGNETIZATION OF RAILS IN RAIL WELDING PRODUCTION

A.R. Khristinich¹, R.M. Khristinich², E.V. Khristinich²

¹Krasnoyarsk Institute of Railway Transport branch of the Irkutsk State University of Communications
89, Lado Ketskhoveri st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation

²Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Prospekt Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

Abstract. *A three-dimensional numerical mathematical model is considered for studying the effectiveness of rail lash demagnetization in rail welding production. The main assumptions for solving the electromagnetic problem of the "inductor-rail" system are presented, the boundary conditions are determined, the current loads of the sources of the electromagnetic field are specified, and the boundary conditions of the problem are determined. The calculation of the electromagnetic field of the model "inductor-rail" is performed in the ANSYS software package. The numerical mathematical model allows to investigate the process of rail demagnetization when exposed to a lower frequency electromagnetic field. The effective parameters and characteristics of the rail demagnetization unit are determined to achieve the greatest effect of rail demagnetization.*

Keywords: *three-dimensional numerical mathematical model, rail demagnetization, rail demagnetization device, effective parameters.*

REFERENCES

1. *Pulyakov A.V.* Analysis of the effect of uneven magnetization of rails on the stability of the work of ALSN / A.V. Pulyakov, Y.A. Trofimov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2011. – № 2 (30). – P. 206–210.
2. *Pulyakov A.V.* System analysis of the stability of the operation of automatic locomotive signaling systems / A.V. Pulyakov, M.E. Skorobogatov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2018. – V. 57, № 1. – p. 79–89.
3. Federal Information Fund of domestic and foreign catalogs of industrial products [Electronic resource]. Installation for the demagnetization of volume – hardened rails URR-1. Code number PK0520901. – Access mode <http://промкаталог.рф>.
4. Mauer Magnetic AG. Demagnetizing buildings and infrastructure [Electronic resource]. – Accessmode <https://www.maurerdegaussing.com/en/applications/buildings-infrastructure>.
5. *Matveev A.N.* Electricity and magnetism: Study Guide for students of higher studies institutions – 2nd edition. – Moscow: Onyx 21st Century: Peace and Education, 2005. – 463 p.
6. *Kalantarov P.L.* Calculation of inductances. Reference book / P.L. Kalantarov, L.A. Tseitlin // L.: Energoatomizdat. – 1986. – 488 p.
7. *Stepanov M.A.* Ways of eliminating failures in the railway system of automation and remote control caused by increased magnetization of the rails / M.A. Stepanov, A.P. Stepanov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2015. – № 1 (45). – p. 168–172.

Aleksey R. Khristinich (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Roman M. Khristinich (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Khristinich (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

8. Method of eliminating residual uneven magnetization of rails: pat. 2579236 Ros. Federation. No. 2014131428/11 / Trofimov Y.A., Pultiyakov A.V.; declare 07/29/2014; publ. 04/10/2016, Bull. №10. 6 p.
9. *Bessonov L.A.* Theoretical foundations of electrical engineering: Electromagnetic field: a textbook for bachelors / L.A. Bessonov. – 11th ed., Revised and enlarged. – M.: Yurait, 2016. 317 p.
10. *Boule O.B.* Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. ANSYS Program: a textbook for universities in the specialty "Electrical and electronic devices" in the direction of "Electrical Engineering, Electrical Engineering and Electrical Engineering" / O.B. Boule. – M.: Academy, 2006. – 288 p. (Higher vocational education). – ISBN 5-7695-2064-7.
11. *Zienkiewicz O.C.* The finite element method. Volume 1 / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. – 712 p.
12. *Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R.* Investigation of rail lash demagnetization in rail welding production // Vestnik KrasGAU. 2014. Edit. 4. P. 242–248.
13. Device and method for demagnetization of long ferromagnetic products: Pat. 2419906 Ros. Federation. No. 2010110385 / 07 / Tsyushtanov A.G., Eliseev K.E., Chervontsev A.A., claimed 03/18/2010, publ. 27.05.2011, Bull. № 15. 10 p.
14. Goldstein A.E., Urazbekov E.I., Kornienko A.I. The device of high-performance demagnetization of long cylindrical products // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. – 2006. – T. 309. – № 3. – P. 135–138.
15. Rail demagnetization device: Pat. 145553, Russian Federation. № 2014111837 /07/ Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R.; declare 03/27/2014; publ. 09.09.2014, Bull. № 26. 2 p.