УДК 628.5 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-76-82

Моделирование распределения индукции магнитного поля контактной сети переменного тока

С.О. Белинский[1, 2 a], К.Б. Кузнецов[1 b]

[1]Уральский государственный университет путей сообщения, ул. Колмогорова 66, Екатеринбург, Россия
[2]Научно-исследовательский институт охраны труда в Екатеринбурге, ул. Толмачева 11, Екатеринбург, Россия
[a]SBelinsky@usurt.ru, [b] Kobokuz@gmail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5596-235X, [b] https://orcid.org/0000-0003-1864-8246
Статья поступила 26.04.2018, принята 4.05.2018

В статье приводятся сведения о результатах теоретических исследований с помощью математического компьютерного моделирования распределения параметров магнитных полей промышленной частоты, создаваемых контактной сетью переменного тока железной дороги. Построены модели контактной сети двухпутного участка при протекании тока только по одному пути и при протекании токов двух путей. Получены и проанализированы данные о распределении индукции магнитного поля контактной сети, которые показали, что ее параметры существенно изменяются в зависимости от расстояний в сторону от оси пути, по высоте, а также от количества путей и наличия или отсутствия тока на одном из путей. Выявлены существенные особенности распределения индукции магнитного поля вблизи контактной сети двухпутного участка при протекании токов разной величины и разных направлений. Показана зависимость индукции магнитного поля от величины тока в рельсах. Выполнено сравнение с нормируемыми предельно допустимыми уровнями вредного воздействия индукции магнитного поля на персонал и население. Результатом работы на основе анализа полученных данных стала оценка степени вредного воздействия магнитных полей промышленной частоты на обслуживающий персонал и население. Установлено, что при определенных значениях тока в контактном проводе и в рельсах, на высоте 1,8 м и на высоте контактного провода, при нахождении человека на оси пути и на расстоянии от оси пути существует риск вредного воздействия магнитного поля, что требует применения защиты временем для персонала и защиты расстоянием — для населения.

Ключевые слова: контактная сеть; магнитное поле; индукция; моделирование; безопасность; вредное воздействие; персонал.

Modeling the distribution of magnetic field induction in alternating current contact network

S.O. Belinsky[1, 2 a], K.B. Kuznetsov[1 b]

[1]Ural State University of Railway Transport; 66, Kolmogorov St., Ekaterinburg, Russia
[2]Ekaterinburg Labor Protection Research Institute; 11, Tolmachev St., Ekaterinburg, Russia
[a]SBelinsky@usurt.ru, [b] Kobokuz@gmail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5596-235X, [b] https://orcid.org/0000-0003-1864-8246
Received 26.04.2018, accepted 4.05.2018

The article contains information about the results of theoretical studies using mathematical computer simulation of the parameters of industrial frequency magnetic fields created by the contact network railway alternating current. The models of a contact network of a two-track section are constructed when the current flows only along one path and when currents of two paths flow. The data on the distribution induction magnetic field of the contact network were obtained and analyzed, which showed that its parameters vary significantly with distance from the path axis, along the height, as well as the number of paths and the presence or absence of current in one of the paths. Important features of the magnetic field induction distribution near the contact network of the double-track section are revealed when different currents and different directions flow. The dependence of the magnetic field induction on the current in the rails is shown. Comparison with normalized maximum permissible levels of harmful effect magnetic field induction on personnel and population is performed. The result of the work based on the analysis of the data obtained is the assessment of the degree of harmful effect of magnetic fields of the industrial frequency on service personnel and the population. It is established that for certain values of the current in the contact wire and the current in the rails, at a height 1.8 m and at the height of a contact wire, when the person is on the track axis and at distances from the track axis, there is a risk of harmful magnetic field effect, which requires time shields for personnel and protection by distance for the public.

Keywords: contact network; magnetic field; induction; modeling; safety; harmful effects; personnel.

Введение

Условия труда персонала, обслуживающего контактную сеть (КС) переменного тока, включают комплекс опасных и вредных факторов производственной среды и трудового процесса (опасность наезда подвижного состава, опасность поражения электрическим током, работа на высоте, тяжесть и напряженность труда, повышенный уровень шума и др.). Особое место среди опасных и вредных производственных факторов занимают низкочастотные электромагнитные поля в виде отдельных составляющих электрического поля (ЭП) и магнитного поля (МП). Данные факторы оказывают также влияние на многочисленный персонал, не связанный с эксплуатацией контактной сети, но подвергающийся воздействию ЭП и МП в процессе трудовой деятельности, а также население, пользующееся пассажирским транспортом и проживающее вблизи электрифицированных линий.

Отдельные результаты исследований параметров МП КС представлены в работах разных авторов [1–13]. В данной работе показаны результаты исследований индукции МП промышленной частоты 50 Гц с учетом новых, ранее не учитываемых параметров. Для прогнозирования возможных параметров МП и оценки безопасности их воздействия был использован метод компьютерного математического моделирования.

Цели и задачи моделирования. Принятые допущения. Целью моделирования является получение зависимостей индукции МП на рабочих местах персонала от расстояния, количества путей, величины и других факторов. С учетом задач, требующих решения, для выполнения математического моделирования использована компьютерная программа EFC-400 (разработчик — Narda Safety Test Solutions, Германия).

Для выполнения математического моделирования были приняты следующие допущения:

– контактная подвеска заменена одним проводом с высотой, равной высоте подвеса контактного провода. Данное допущение не оказывает существенного влияния на получаемые значения индукции в пространстве между контактной сетью и рельсами, так как основной вклад в распределение индукции МП оказывает именно ток в контактном проводе;

– в зоне распределения МП отсутствуют какие-либо металлические элементы и конструкции, в том числе подвижной состав. Такие условия моделирования справедливы для персонала, находящегося непосредственно на путях или вблизи от них, когда отсутствует подвижной состав, а наличие металлических объектов может влиять на распределение МП;

– часть тягового тока (в % от тока в контактном проводе) протекает по рельсам. Данное допущение учитывает случаи, когда часть обратного тока протекает по земле, а часть — по рельсам. В работе рассмотрены разные значения распределения тока, что позволяет оценить влияние этого параметра;

– тело человека представляет собой блоки проводящих элементов общей высотой 1,8 м, шириной 0,56 м и толщиной 0,33 мс магнитной проницаемостью, равной 1, т. е. тело человека не искажает силовые линии МП.

Таким образом, принятые допущения не оказывают существенного влияния на результаты математического компьютерного моделирования.

Для моделирования напряженности МП для КС в программе EFC-400 создана модель двухпутного участка, расставлены источники МП, персонал, введены следующие исходные данные: нормируемый уровень напряжения КС на пантографе токоприемника — не менее 25 кВ; высота 0–6 м; расстояние в сторону от оси пути ±15 м; высота контактного провода — не менее 5,75 м; длина пролета — не более 70 м.

В соответствии с Правилами [14], расстояние между осями железнодорожных путей на перегонах двухпутных железнодорожных линий на прямых участках должно быть не менее 4,1 м. На трехпутных и четырехпутных линиях расстояние между осями второго и третьего железнодорожных путей, на прямых участках должно быть не менее 5,0 м. Для моделирования расстояния между осями путей принято 4,1 м, а высота контактного провода — 5,75 м, так как при данных минимальных расстояниях значение индукции МП будет наибольшим при прочих равных условиях.

Результаты моделирования МП для двухпутного участка при протекании тока только по одному пути. При производстве путевых работ, работ по обслуживанию КС и других устройств инфраструктуры на двухпутных участках имеет место ситуация, когда отключают один из путей. На основе математического моделирования системы «контактный провод – рельс» построены картины распределения индукции МП частотой 50 Гц. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования для двухпутного участка при наличии тока на одном пути 1 000 А

Расстояние в сторону от оси пути с координатой $x = 0$, *м*	Индукция МП, мкТл	
	На высоте 1,8 м	*На высоте контактного провода**
0	145	2 000
2	100	98
4	49	49
6	27	27
8	17	17
10	10	10

* На высоте контактного провода при $x = 0$ значение получено на расстоянии 10 см от центра контактного провода.

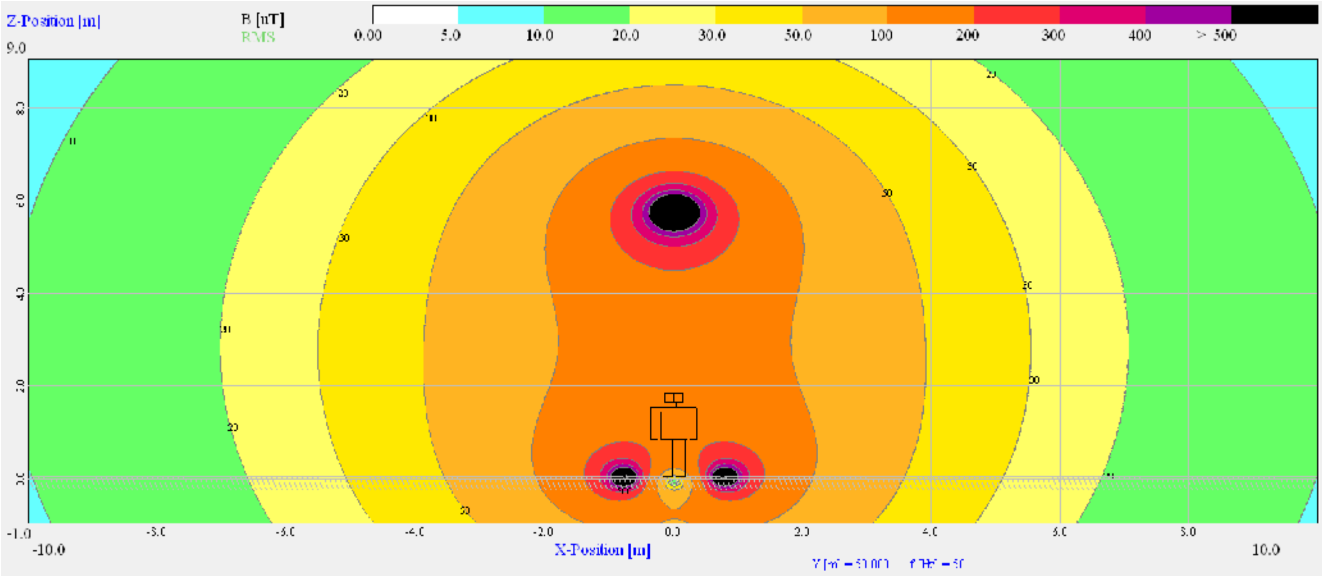

Рис. 1. Результаты математического моделирования индукции МП 50 Гц (мкТл) для КС однопутного участка при протекании тока в рельсах 100 % от тока в контактном проводе 1 000 А

Можно сделать вывод, что на высоте 1,8 м, на расстоянии от оси пути до 2 м индукция МП при максимальном токе 1 000 А превышает ПДУ 100 мкТл по СанПиН [15], на расстоянии до 7 м — ПДУ 20 мкТл по ГН [16], непосредственно на оси пути максимальное значение составляет 145 мкТл. На высоте контактного провода, на расстоянии 10 см индукция превышает 1 000 мкТл и достигает значений 2 000 мкТл непосредственно у контактного провода, что превышает ПДУ и требует контроля и ограничения времени работы персонала до 2-х ч. Ток в контактной сети и в рельсовой линии имеет одинаковую фазировку.

На рис. 2 представлены зависимости индукции МП на высоте 1,8 м от величины тока и при нахождении персонала на разном расстоянии от оси пути. Нормируемые значения индукции МП приняты по [15] и [16].

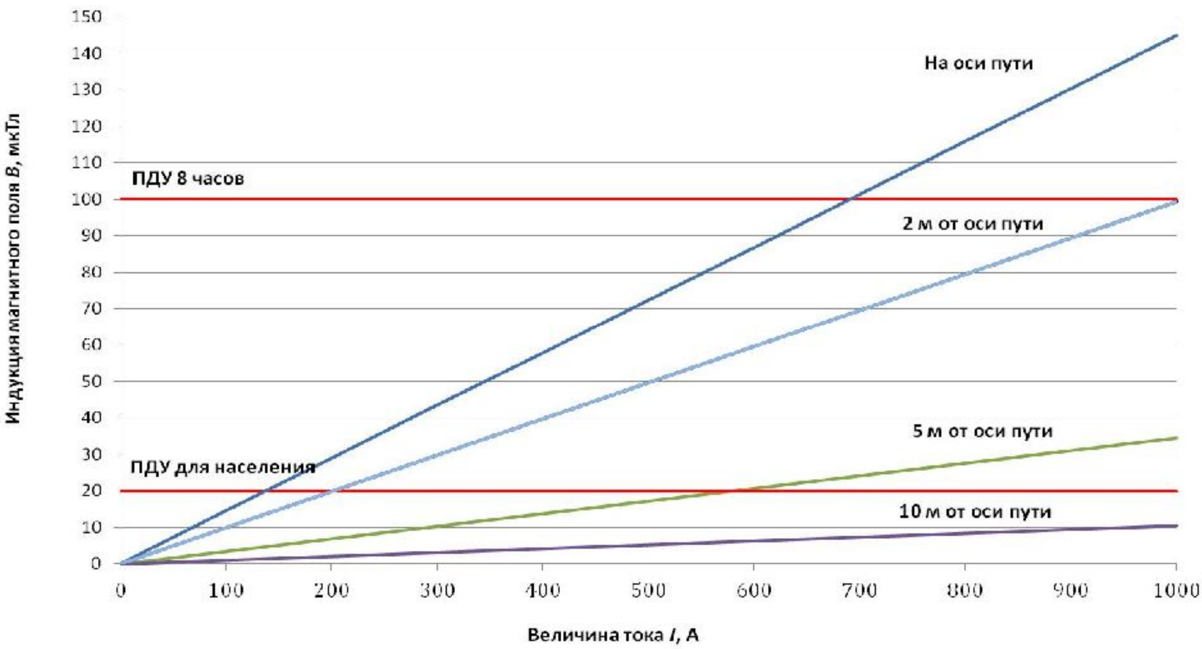

Рис. 2. Результаты математического моделирования индукции МП 50 Гц для КС на разном расстоянии от оси пути и при разной величине тока

По данным на рис. 1 и 2 видно, что при воздействии МП на персонал, когда напряжение с одного пути снято и персонал находится вдали от частей под напряжением, т. е., например, на оси 2-го пути (на расстоянии более 4 м от оси 1-го пути), индукция МП может достигать 50 мкТл, что не превышает предельно допустимый уровень (ПДУ) профессионального воздействия для смены 8 ч, равный 100 мкТл, но превышает ПДУ для персонала, не связанного с эксплуатацией контактной сети, равный 20 мкТл. Индукция МП практически не меняется по высоте и на уровне отключенного контактного провода 2-го пути находится в том же диапазоне, что и на высоте 1,8 м.

Представленные выше результаты получены для случая, когда весь тяговый ток протекает по рельсам, т. е. 100 % тягового тока в контактном проводе протекает по двум рельсам. Для изучения влияния величины тока в рельсах на распределение индукции МП были построены математические модели и выполнены расчеты.

На рис. 3 показаны зависимости индукции МП на высоте 1,8 м при протекании тока 1 000 и 500 А в контактном проводе одного пути и при разном проценте (%) тока в рельсах.

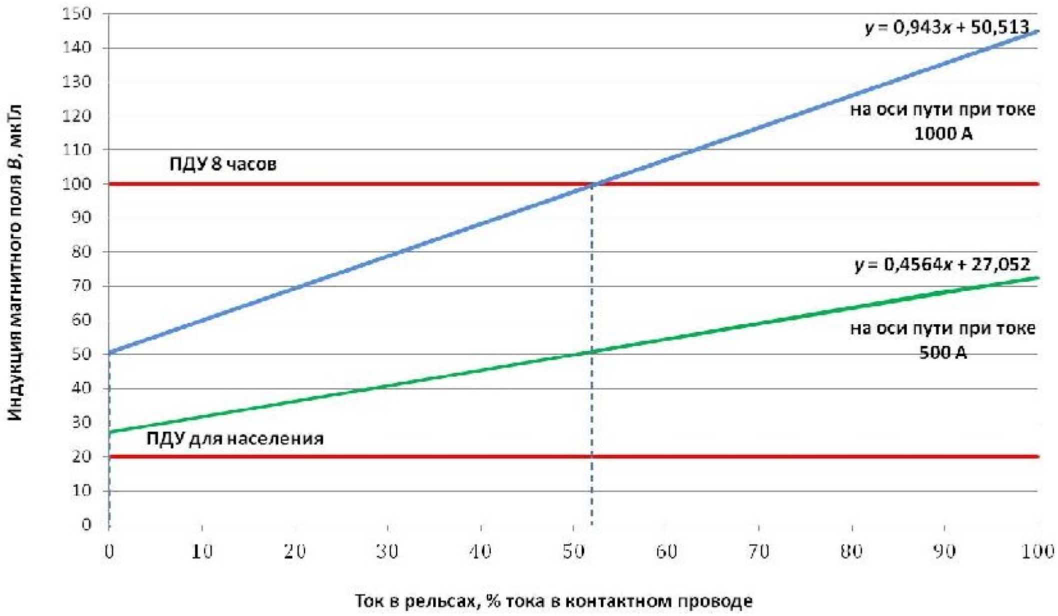

Рис. 3. Результаты математического моделирования индукции МП 50 Гц при разных значениях тока в рельсах на высоте 1,8 м

Наибольшие значения индукции МП при 100 % тока в рельсах от тока в контактном проводе 1 000 А на оси пути составляет 145 мкТл, а при токе 500 А — в 2 раза меньше.

Превышение ПДУ профессионального воздействия для смены 8 ч наблюдается в следующих случаях:

– при токе в контактном проводе 1 000 А и при токе в рельсах более 52 % от тока в контактном проводе;

– при токе в контактном проводе более 700 А и при токе в рельсах 100 % от тока в контактном проводе.

ПДУ для населения и персонала, не связанного с эксплуатацией контактной сети, равный 20 мкТл, превышается на оси пути в следующих случаях:

– при токе в контактном проводе более 400 А и при любом % токе в рельсах;

– при токе в контактном проводе более 200 А и при токе в рельсах более 50 % от тока в контактном проводе.

Результаты моделирования для двухпутного участка при наличии напряжения одного пути. Рассмотрим двухпутный участок при протекании токов одинаковой величины как в одноименном направлении, так и в противоположном.

Результаты моделирования для такого случая представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Результаты моделирования для двухпутного участка под напряжением при протекании тока в одноименном и противоположном направлениях

Расстояние В сторону от оси пути *x, м*	Индукция МП, *мкТл*			
	На высоте 1,8 м		На высоте контактного провода*	
	В одном направлении	В разных направлениях	В одном направлении	В разных направлениях
0	190	105	2 000	2 000
2	125	75	110	79
4	64	33	69	38
6	37	17	34	27
8	24	10	23	14
10	17	7	17	7

* На высоте контактного провода при $x = 0$ значение получено на расстоянии 10 см от центра контактного провода.

На рис. 4 *а* показаны результаты моделирования для двухпутного участка, когда ток величиной 1 000 А протекает по обоим путям в одноименном направлении, на рисунке 4 *б* — в разных направлениях.

При протекании токов в одноименном направлении индукция МП на уровне головы человека, стоящего на оси пути, составляет более 190 мкТл, на расстоянии до 2 м от оси каждого пути — более 100 мкТл, на расстоянии до 9 м – более 20 мкТл. При протекании токов в проводах в противоположном направлении индукция МП на уровне головы человека, стоящего на оси пути, составляет 105 мкТл, на расстоянии до 1 м от оси каждого пути — более 100 мкТл, на расстоянии до 5 м — более 20 мкТл.

На высоте контактного провода на оси каждого пути значение индукции МП достигает 2 000 мкТл. Индукция МП более 100 мкТл наблюдается на расстоянии до 2 м от контактного провода, а более 20 мкТл — на расстоянии до 6 м.

Таким образом, наибольшие значения индукции МП получены при 100 % тока в рельсах при токе в контактном проводе 1 000 А, а также при протекании токов на двухпутном участке в одноименном направлении.

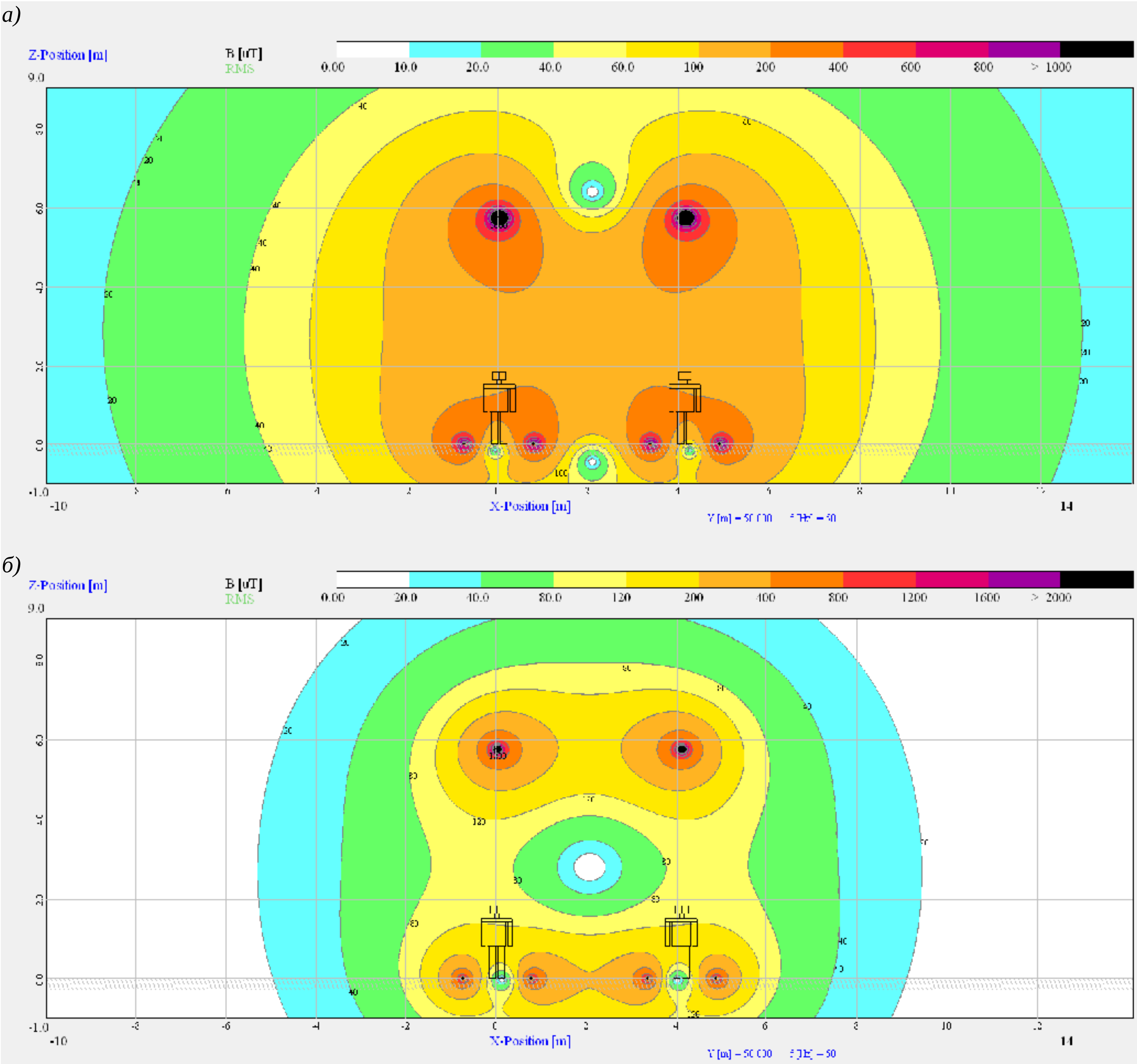

Рис. 4. Распределение индукции МП ПЧ двухпутного участка КС: *а* — при протекании токов в одноименном направлении; *б* — при протекании токов в противоположном направлении

На рис. 5 показано сравнение результатов моделирования для однопутного участка КС и двухпутного участка на высоте 1,8 м при протекании тока в контактном проводе 1 000 А и при токе в рельсах 100 % тока в контактном проводе.

При наличии тока обоих путей индукция МП увеличивается на оси пути в 1,3–3,8 раз и создает зоны с превышением ПДУ:

– для профессионального воздействия на расстоянии 3 м от оси каждого пути;

– для персонала, не связанного с эксплуатацией КС, и населения на расстоянии 9 м от оси каждого пути.

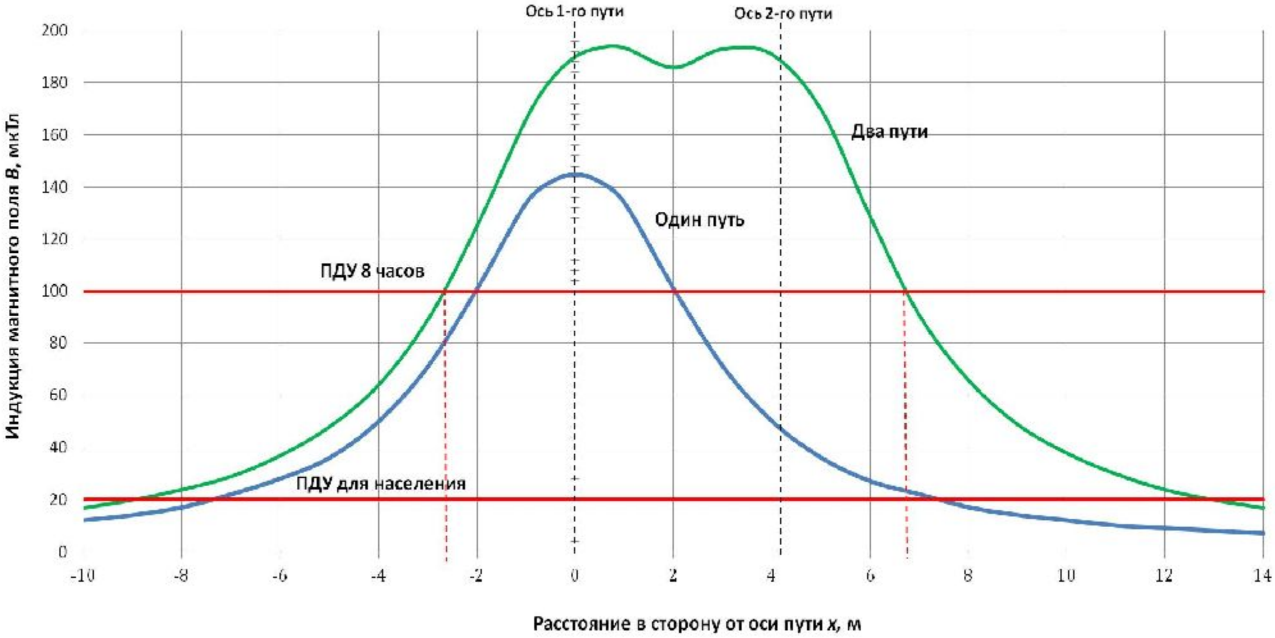

Рис. 5. Распределение индукции МП ПЧ на высоте 1,8 м для однопутного и двухпутного участка КС

Заключение

В результате проведенного исследования с помощью компьютерного математического моделирования получено, что параметры МП КС железнодорожного транспорта зависят от расстояний в сторону от оси пути и по высоте, т. е. от места нахождения персонала, величины тока, процента обратного тока в рельсах, количества путей:

$$B = f\left(x, h, I_k, I_p, K_n, K_h\right),\ \text{мкТл},$$

где x — расстояние от оси пути, *м*; h — высота от уровня головки рельса, *м*; $I_к$ — тяговый ток, *А*; I_p — тяговый ток в рельсах, *%* от $I_к$; K_h — коэффициент, учитывающий наличие (отсутствие) тела человека, для магнитного поля $K_h = 1$; K_n — коэффициент, учитывающий количество путей.

Установлены следующие параметры индукции МП частотой 50 Гц на участке КС:

1. Индукция МП частотой 50 Гц — при максимальном токе 1 000 А на высоте 1,8 м непосредственно на оси пути максимальное значение составляет 145 мкТл, на расстоянии от оси пути до 2 м — превышает ПДУ 100 мкТл, на расстоянии до 7 м — ПДУ 20 мкТл. На высоте контактного провода, на расстоянии 10 см индукция превышает 1 000 мкТл и достигает значений 2 000 мкТл непосредственно у контактного провода, что превышает ПДУ и требует контроля и ограничения времени работы персонала до 2-х ч.

Индукция МП на высоте 1,8 м на оси отключенного пути двухпутного участка не превышает ПДУ при воздействии в течение всей смены.

2. При токе в рельсах более 50 % от тока в контактном проводе 1 000 А и при токе в рельсах 100 % от тока в контактном проводе более 700 А индукция МП на оси пути превышает ПДУ профессионального воздействия для смены 8 ч, равный 100 мкТл.

При токе в рельсах более 50 % от тока в контактном проводе более 200 А, а также при любом проценте тока в рельсах при токе в контактном проводе более 400 А индукция МП на оси пути превышает ПДУ для населения и персонала, не связанного с эксплуатацией контактной сети, равный 20 мкТл.

3. Для двухпутного участка, когда ток протекает по обоим путям в одноименном направлении, индукция МП на уровне головы человека, стоящего на оси пути, составляет более 190 мкТл и на расстоянии до 2 м превышает 100 мкТл, что превосходит ПДУ и требует ограничения времени работы. При протекании токов в проводах в противоположном направлении индукция превышает 100 мкТл только на расстоянии до 1 м от оси каждого пути. Превышение 20 мкТл наблюдается на расстоянии до 9 м.

4. На высоте контактного провода на оси каждого пути значение индукции МП достигает 2 000 мкТл, что превышает ПДУ и требует ограничения времени работы. Индукция МП более 100 мкТл наблюдается на расстоянии до 2 м от контактного провода, а более 20 мкТл — на расстоянии до 6 м.

Литература

1. Белинский С.О. Электромагнитная совместимость электроустановок тягового электроснабжения и обслуживающего персонала: моногр. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2008. 142 с.

2. Белинский С.О., Кузнецов К.Б. Оценка параметров электромагнитных полей низкочастотного диапазона в электроустановках тягового электроснабжения // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2012. Вып. 17, № 16 (275). С. 62-69.

3. Белинский С.О. Воздействие электромагнитных полей низкочастотного диапазона на работников железнодорожного транспорта // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 10. С. 21-32.

4. Белинский. С.О., Кузнецов К.Б. Моделирование магнитных полей контактной сети переменного тока в рабочих зонах персонала // Электробезопасность. 2016. № 4. С. 12-19.

5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванов А.Н. Моделирование электромагнитных полей в системах тягового электро-

снабжения // Сб. докл. девятой Всерос. науч.-технической конф. по электромагнитной совместимости техн. средств и электромагнитной безопасности (ЭМС-2006). СПб., 2006. С. 470-474.

6. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Моделирование электромагнитной обстановки на железных дорогах переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 2 (26). 2010. С. 169-175.

7. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Управление электромагнитной обстановкой на объектах железнодорожного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3 (27). С. 34–38.

8. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Семенов М.А., Черемных Т.В. Устинов Ю.М. Хозяинов Б.П. Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрофицированных железных дорог // Вестн. ИрГТУ, 2011. № 1 (48). С. 148-152.

9. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Электромагнитная обстановка на объектах железно-дорожного транспорта: моногр. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 84 с.

10. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.

11. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2016. № 2 (30). С. 73-83.

12. Расчеты электромагнитных полей: моногр. / под ред. А.Н. Горского. М.: Маршрут, 2006. 992 с.

13. Аполлонский С.М. Электромагнитные поля технического оборудования. Т. 2. Расчеты внешних электромагнитных полей силового электрооборудования: моногр. М.: Русайнс, 2016. 338 с.

14. Об утверждении правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: приказ М-ва транспорта Рос. Федерации от 21 дек. 2010 г. № 286. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

15. Об утверждении СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах [Электронный ресурс]: постановление Гл. гос. сан. врача Рос. Федерации от 21 июня 2016 г. № 81 // Офиц. интернет-портал правовой информ. URL: http://www.pravo.gov.ru, (дата обращения 09.08.2016).

16. Об утверждении ГН. 2.1.8/2.2.4.2262-07 Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях: постановление гл. гос. сан. врача Рос. Федерации от 21 авг. 2007 г. № 60 // Бюл. норм. актов федер. органов исполнительной власти. 2007. № 41.

References

1. Belinskij S.O. Electromagnetic compatibility of electrical installations of traction power supply and maintenance personnel: monogr. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2008. 142 p.

2. Belinskij S.O., Kuznecov K.B. Estimation of parameters of electromagnetic fields of low-frequency range in electric traction power supply //Bulletin of South Ural State University. Ser. “Power Engineering”. 2012. Vyp. 17, № 16 (275). P. 62-69.

3. Belinskij S.O. Impact of low-frequency electromagnetic fields on railway workers //Bezopasnost’ zhiznedeatel’nosti. 2014. № 10. P. 21-32.

4. Belinskij. S.O., Kuznecov K.B. Simulation of magnetic field of a contact network of alternating current in working areas of personnel// Elektrobezopasnost’. 2016. № 4. P. 12-19.

5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ivanov A.N. Simulation of electromagnetic fields in the systems of traction current // Sb. dokl. devyatoj Vseros. nauch.-tekhnicheskoj konf. poehlektromagnitnoj sovmestimosti tekhn. sredstv i ehlektromagnitnoj bezopasnosti (EHMS-2006). SPb., 2006. P. 470-474.

6. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Electromagnetic environment simulation for AC railways //Moderntechnologies. System analysis. Modeling. 2010. № 2 (26). 2010. P. 169-175.

7. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Control of electromagnetic environment in railway transport objects //Moderntechnologies. System analysis. Modeling. 2010. № 3 (27). P. 34-38.

8. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Semenov M.A., Cheremnyh T.V. Ustinov Yu.M. Hozyainov B.P. Calculation of electromagnetic fields generated by traction networks of electrified Railways //Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 1 (48). P. 148-152.

9. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Electromagnetic environment at the sites of railway transport: monogr. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 84p.

10. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Basics of electromagnetic safety systems of power supply of railway transport. M.: Intekst, 2008. 480p.

11. Zakirova A.R., Bukanov ZhM. Study of electromagnetic fields in the workplace staff contact network // Herald of the Ural State University of Rail way Transport. 2016. № 2 (30). P. 73-83.

12. Calculation of electromagnetic fields: monogr. / pod red. A.N. Gorskogo. M.: Marshrut, 2006. 992 p.

13. Apollonskij S.M. Electromagnetic fields of technical equipment. V. 2. External electromagnetic fields calculation of power electric equipment: monogr. M.: Rusajns, 2016. 338 p.

14. Approval of rules of technical operation of railways of the Russian Federation [Elektronnyj resurs]: prikaz M-va transporta Ros. Federacii ot 21 dek. 2010 g. № 286. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul’tant Plyus».

15. Approving Sanpin 2.2.4.3359-16 "Sanitary-Epidemio-logical requirements to the physical factors in the workplace [Elektronnyj resurs]: postanovlenie Gl. gos. san. vracha Ros. Federacii ot 21 iyunya 2016 g. № 81 // Ofic. internet-portal pravovoj inform. URL: http://www.pravo.gov.ru, (data obrashcheniya 09.08.2016).

16. Approving MR. 2.1.8/2.2.4.2262-07 maximum permissible levels of magnetic fields of 50 Hz frequency in indoor residential, public buildings and residential territories: postanovlenie gl. gos. san. vracha Ros. Federacii ot 21 avg. 2007 g. № 60 // Byul. norm. aktov feder. organov ispolnitel’noj vlasti. 2007. № 41.