

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТОТОЙ 50 Гц НА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.О. Белинский<sup>1</sup>, И.М. Кирпичникова<sup>2</sup>, Ю.И. Аверьянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт охраны труда, г. Екатеринбург,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

В статье рассматриваются результаты исследования параметров электромагнитных полей на тяговой подстанции постоянного тока. Получены уровни напряженности электрического и индукции магнитного полей частотой 50 Гц, возникающие в рабочих зонах закрытого распределительного устройства тяговой подстанции. Дана оценка соответствия фактических значений параметров электромагнитных полей предельно допустимым уровням.

*Ключевые слова:* электромагнитные поля, персонал, тяговая подстанция, электроснабжение, предельно-допустимые уровни.

## Введение

Электроустановки тяговых подстанций (ТП) являются мощным техногенным источником электромагнитных полей (ЭМП), так как преобразуют не только один уровень напряжения в другой, но и один род тока в другой. Тяговые подстанции постоянного тока оборудованы распределительным устройством тягового электроснабжения 3,3 кВ, в состав которого входят: тяговые трансформаторы, преобразователи (выпрямительные или выпрямительно-инверторные) и фидеры 3,3 кВ контактной сети. Наличие мощных выпрямителей и инверторов на подстанциях приводит к появлению в цепях гармоник тока и напряжения, которые являются источниками электромагнитного влияния на персонал в широком диапазоне частот от 0 Гц до 10 кГц, включая промышленную частоту 50 Гц, создаваемую элементами ЭУ ТП со стороны переменного тока.

## Актуальность

В статье авторов [1, 2] были рассмотрены результаты оценки параметров ЭМП низкочастотного диапазона в РУ-3,3 кВ ТП и их сравнение с нормируемыми значениями. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований только ЭМП промышленной частоты (ПЧ) 50 Гц на ТП постоянного тока.

Как известно, гигиеническая оценка электромагнитного поля промышленной частоты (50 Гц) осуществляется раздельно по напряженности электрического поля ( $E$ ) в кВ/м, напряженности магнитного поля ( $H$ ) в А/м или индукции магнитного поля ( $B$ ) в мкТл [3]. Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля частотой 50 Гц на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м, а предельно допустимый уровень напряженности магнитного поля – 80 А/м или индукции магнитного поля – 100 мкТл.

Таким образом, экспериментальная оценка фактических значений параметров ЭМП ПЧ на ТП постоянного тока и их сравнение с нормируемыми значениями является актуальным исследованием.

## Постановка задачи исследования

Для проведения экспериментальных исследований параметров ЭМП используется измерительный комплекс – анализатор электромагнитных полей ЕФА-300. Измеренные значения напряженностей электрической и магнитной составляющих ЭМП приведены для типовых ТП на Свердловской железной дороге с 6-пульсовыми выпрямительными преобразователями.

Исследования параметров ЭМП частотой 50 Гц в РУ-3,3 кВ проводились для типичных рабочих мест, а именно вблизи преобразователя, под шинами 3,3 кВ, в ячейке и других рабочих зонах. Методика измерений соответствует требованиям СанПиН [3].

Необходимо выполнить экспериментальные измерения и анализ спектральных характеристик, гармонического состава, а также измерение параметров напряженностей ЭМП в зависимости от разной величины тягового тока. По результатам измерений необходимо построить зависимость уровней напряженности от величины тягового тока и сравнить максимальные значения с допустимыми нормируемыми параметрами.

## Теоретическая часть

Одной из проблем воздействия ЭМП на персонал при эксплуатации ТП являются совмещенные распределительные устройства РУ-3,3 кВ и РУ-6(10) кВ, включая шинный мост от РУ-6(10) кВ до выпрямительного преобразователя, т. е. присутствуют как поля промышленной частоты 50 Гц, постоянные поля от выпрямленного тока и напряжения и поля высших гармоник в диапазоне до 10 кГц.

## Электроэнергетика

Основными рабочими зонами были выбраны места под шинным мостом и под шинами «+3,3 кВ» и «-3,3 кВ» со стороны РУ-3,3 кВ постоянного тока вблизи преобразователя.

В РУ-3,3 кВ ТП ЭМП частотой 50 Гц возникают в результате протекания тока и наличия напряжения на частях переменного тока со стороны шин 6 или 10 кВ. С целью теоретической оценки уровней ЭМП в ЭУ ТП были проведены исследования с помощью компьютерного моделирования для типичных условий воздействия ЭМП на персонал. Для моделирования использовалась программа EFC-400 компании Narda STS (Германия). Результаты теоретических исследований параметров ЭМП в ЭУ рассмотрены в работах [1, 4]. Данные исследования показали, что параметры ЭМП ПЧ требуют учета их воздействия на персонал ТП.

### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 1 показана спектральная характеристика напряженности ЭП под шинным мостом между преобразователем и ячейками 10 кВ, а на рис. 2 – изменение напряженности ЭП частотой 50 Гц за период 8 мин.

Из рис. 1, 2 видно, что уровень напряженности ЭП ПЧ составляет не более 43 В/м, что значительно ниже ПДУ. Напряженность ЭП ПЧ практически не меняется при изменении тягового тока, так как эта величина обусловлена в основном напряжением на шинах переменного тока 50 Гц со стороны 10 кВ до преобразователя. При этом отмечается наличие гармоник на частотах, отличных от 50 Гц.

Инструментальный контроль МП ПЧ под шинным мостом проводился при разной величине тягового тока подстанции. Контролировалась величина тягового выпрямленного тока, потребляемого в данный момент на фидерной зоне, питающей данной ТП. В работе находился один выпрямитель, поэтому тяговый ток считывался с киловольтметра общего тока выпрямителя (общий ток подстанции). На рис. 3 представлена спектральная характеристика индукции МП при токе 1400 А и изменение индукции МП.

Были также получены значения индукции МП ПЧ при разных тяговых токах, которые показали, что изменение тока влияет на величину индукции МП ПЧ (рис. 4). Так, при токе тяги 100 А индукция МП ПЧ составляет 0,84 мкТл, 250 А – 1,8 мкТл,

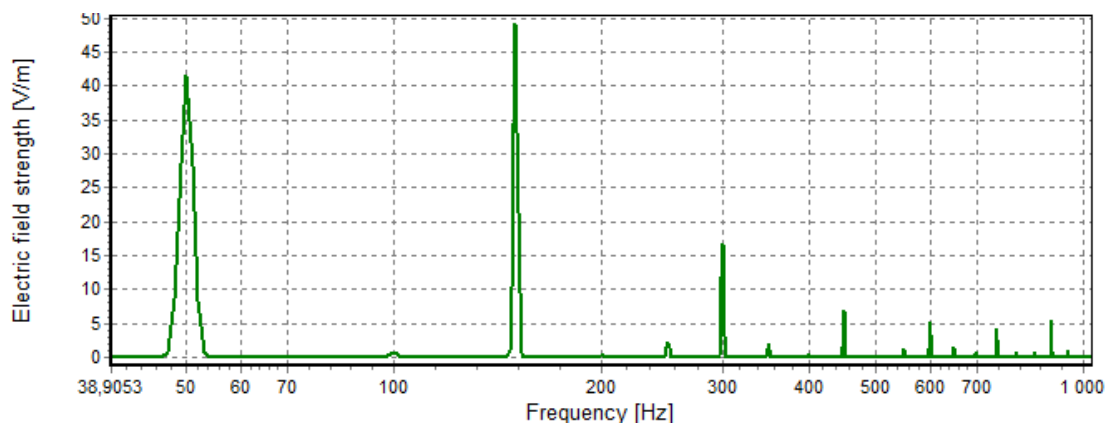


Рис. 1. Спектр напряженности ЭП под шинным мостом



Рис. 2. Изменение напряженности ЭП ПЧ в течение 8 мин

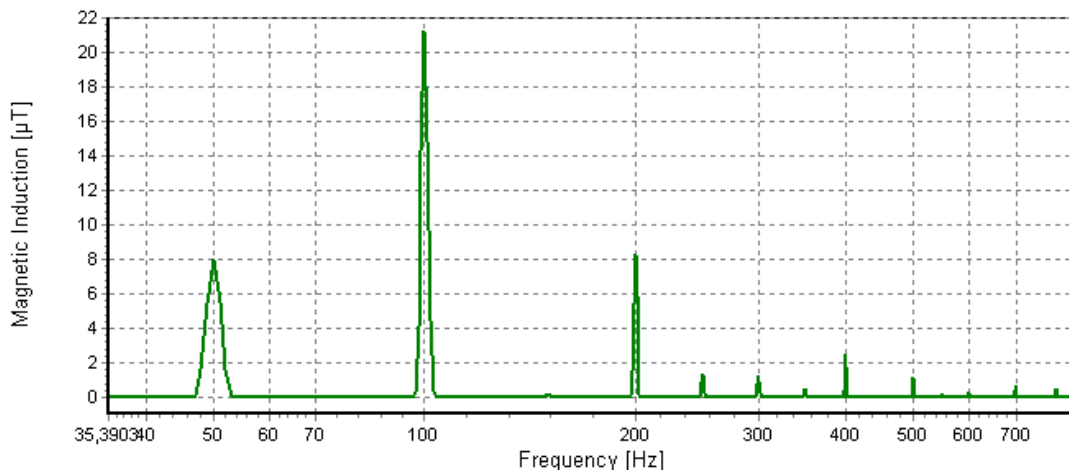


Рис. 3. Спектр индукции МП ПЧ в диапазоне до 1 кГц при токе тяги 1400 А



Рис. 4. Изменение индукции МП ПЧ при токе 100–250 А

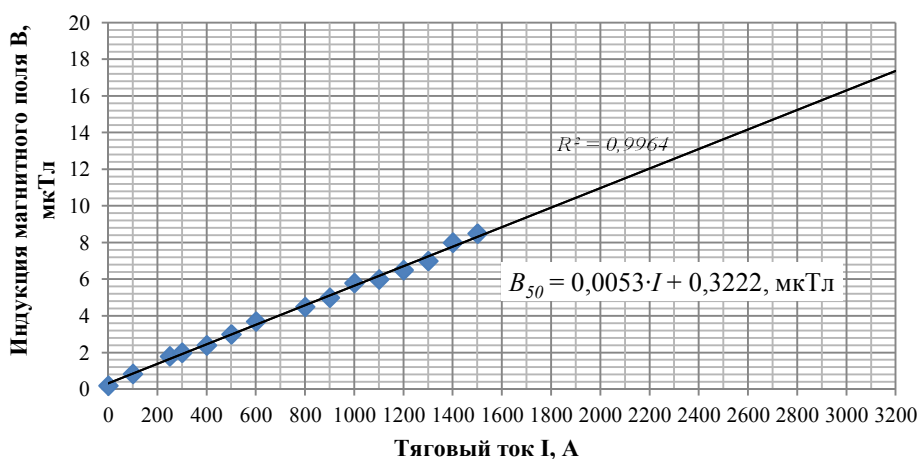


Рис. 5. Зависимость индукции МП ПЧ от тока тяги

1100 А – 6 мкТл, 1400 А – 8 мкТл. Зависимость индукции МП ПЧ от тока тяги показана на рис. 5.

При максимальном тяговом токе 3200 А индукция МП ПЧ не превышает 17 мкТл, при этом кроме индукции МП ПЧ присутствуют гармоники других частот.

Таким образом, параметры ЭМП ПЧ под шинным мостом составили значения, представленные в табл. 1 с учетом погрешности средства измерения (относительная погрешность 5%). В соответствии с существующими нормами фактические уровни значительно ниже ПДУ.

Параметры ЭМП ПЧ под шинным мостом

Параметр ЭМП ПЧ	Значения	
	max	ПДУ
$E_{50}$ , В/м	$42,63 \pm 2,13$	5000
$B_{50}$ , мкТл при токе тяги 3000 А	$16,22 \pm 0,81$	100

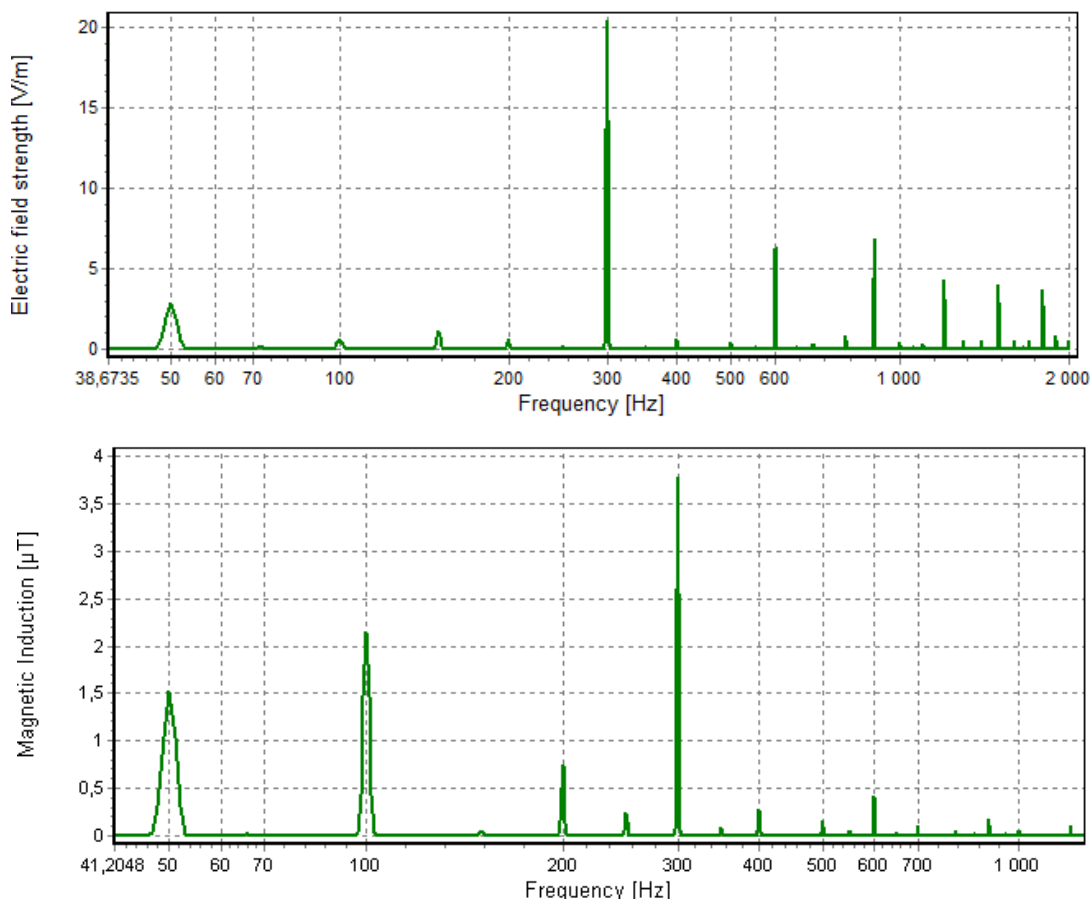


Рис. 6. Спектральная характеристика электрической (сверху) и магнитной (снизу) составляющей ЭМП под шинами 3,3 при токе 500 А

Кроме рабочей зоны под шинным мостом работники могут находиться под шинами постоянного тока. На рис. 6 представлены результаты исследований под шинами напряжением 3,3 кВ постоянного тока.

Анализ рис. 1–6 говорит о насыщенном спектре гармонических составляющих с высоким амплитудами на частотах, отличных от частоты 50 Гц.

На рис. 7 показано изменение индукции МП ПЧ в течение 5 мин, а на рис. 8 изменение индукции МП ПЧ в зависимости от изменения тягового выпрямленного тока.

Результаты полученных данных параметров ЭМП ПЧ под шинами 3,3 кВ представлены табл. 2.

Уровни напряженности ЭП ПЧ не превышают 3,5 В/м, а индукции МП ПЧ – 12 мкТл, что значительно ниже ПДУ (табл. 3, 4).

На рис. 9 показаны результаты инструментального контроля в рабочей зоне около выпрямительного преобразователя.

Анализ полученных данных показывает, что индукция МП ПЧ рядом с выпрямителем оставляет не более 8 мкТл. Исследования в других рабочих зонах показали, что уровни индукции МП ПЧ под шиной отходящего фидера, вблизи тягового трансформатора, на рабочем месте дежурного персонала составили не более 2 мкТл, внутри ячейки 3,3 кВ – не более 1 мкТл (табл. 4).

Уровни напряженности ЭП ПЧ вблизи ячейки фидера и под шиной отходящего фидера – не более 3 В/м. На рабочем месте дежурного персонала максимальное значение напряженности ЭП ПЧ составило 40,1 В/м. Вблизи тягового трансформатора – 250 В/м. Все эти значения ниже ПДУ (табл. 3).



Рис. 7. Изменение индукции МП ПЧ за период 5 мин

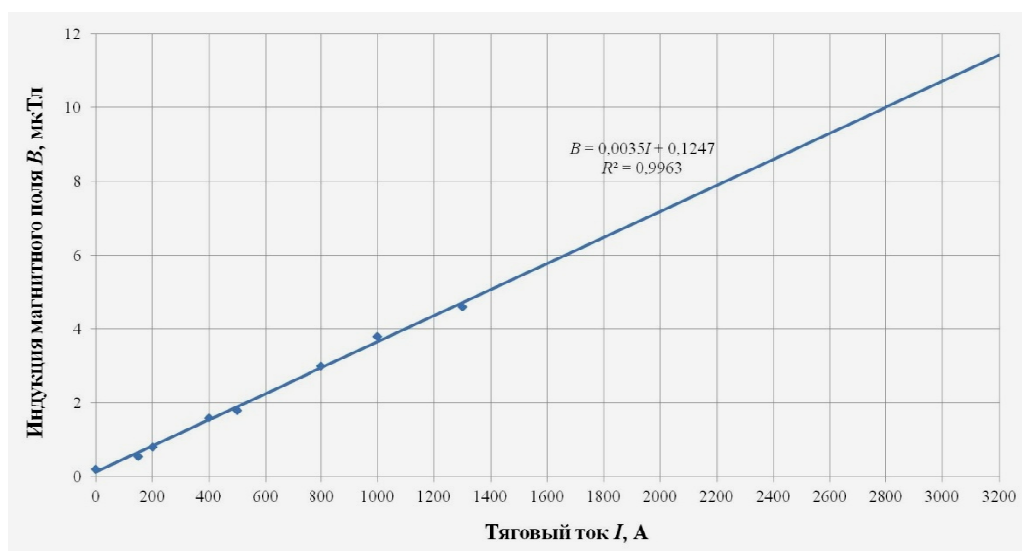


Рис. 8. Зависимость индукции МП ПЧ от тока тяги под шинами 3,3 кВ

Таблица 2

Параметры ЭМП ПЧ под шинами 3,3 кВ

Параметр ЭМП ПЧ	Значения	
	max	ПДУ
$E_{50}$ , В/м	$3,1 \pm 0,16$	5000
$B_{50}$ , мкТл при токе тяги 3000 А	$11,33 \pm 0,57$	100

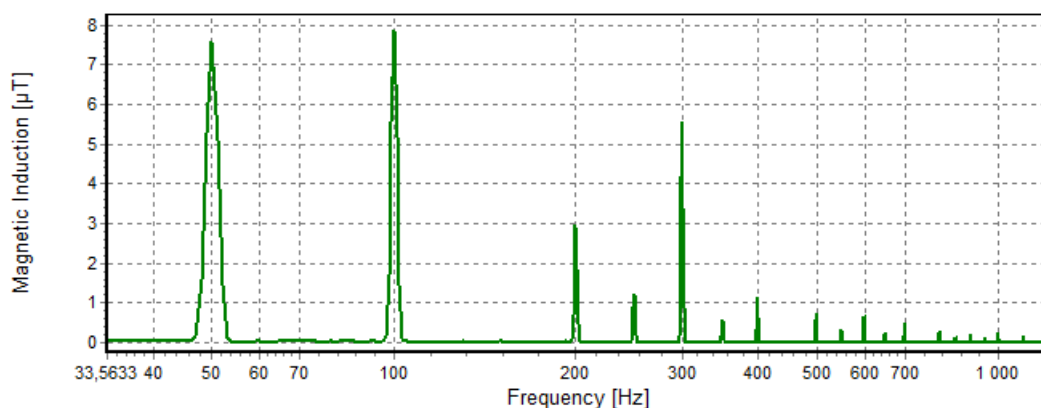


Рис. 9. Спектр индукции МП ПЧ рядом со шкафом выпрямителя

Таблица 3

Параметры ЭП ПЧ на тяговой подстанции постоянного тока при токе тяги 3000 А

Частота	Максимальная, с учетом погрешности прибора, индукция магнитного поля, мкТл, на разных рабочих местах персонала						
	Шинный мост	Под шинами 3,3 кВ	Вблизи выпрямителя	Вблизи ячейки фидера	Внутри ячейки фидера	В реакторной	Под фидером контактной сети
50 Гц	42,63 ± 2,13	3,1 ± 0,16	11 ± 0,55	3 ± 0,15	3,2 ± 0,16	< 1	< 1

Таблица 4

Параметры МП ПЧ на тяговой подстанции постоянного тока при токе тяги 3000 А

Частота	Максимальная, с учетом погрешности прибора, индукция магнитного поля, мкТл, на разных рабочих местах персонала						
	Шинный мост	Под шинами 3,3 кВ	Вблизи выпрямителя	Вблизи ячейки фидера	Внутри ячейки фидера	В реакторной	Под фидером контактной сети
50 Гц	16,2 ± 0,8	11,3 ± 0,57	11,3 ± 0,57	< 1	1,5 ± 0,07	3 ± 0,15	< 1

### Заключение

Таким образом, наибольшие значения ЭМП ПЧ на ТП отмечены под шинным мостом, напряженность ЭП не превышает 50 В/м, а индукция МП – 17 мкТл. Персонал, обслуживающий электроустановки закрытых распределительных устройств ТП постоянного тока, подвергается воздействию ЭМП ПЧ с уровнями, не превышающими ПДУ.

При этом установлено, что персонал ТП подвергается одновременному воздействию ЭМП ПЧ, а также МП гармоник на частотах 100, 200, 250, 300, 350, 400, 600 Гц высоких интенсивностей, что требует нормирования и оценки с точки зрения их вредного воздействия на персонал.

### Литература

1. Белинский, С.О. Оценка параметров электромагнитных полей низкочастотного диапазона в электроустановках тягового электроснабжения / С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов // Вестник

ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17, № 16 (275). – С. 62–69.

2. Белинский, С.О. Оценка параметров электромагнитных полей частотой 50 Гц в РУ-3,3 кВ тяговых подстанций / С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – М.: Изд-во «Новые технологии». – 2012. – № 7. – С. 12–17.

3. Белинский, С.О. Воздействие электромагнитных полей низкочастотного диапазона на работников железнодорожного транспорта / С.О. Белинский // Безопасность жизнедеятельности. – М.: Изд-во «Новые технологии». – 2014. – № 10. – С. 21–32.

4. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 21.06.2016 № 81 «Об утверждении СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». – <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 09.08.2016).

**Белинский Станислав Олегович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором производственной безопасности, Научно-исследовательский институт охраны труда, г. Екатеринбург; [labelctro@bk.ru](mailto:labelctro@bk.ru).

**Кирпичникова Ирина Михайловна**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [kirpichnikovaim@susu.ru](mailto:kirpichnikovaim@susu.ru).

**Аверьянов Юрий Иванович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [bgd-susu@mail.ru](mailto:bgd-susu@mail.ru).

Поступила в редакцию 23 мая 2017 г.

## EXPERIMENTAL STUDY OF 50 Hz ELECTROMAGNETIC FIELD PARAMETERS ON TRACTION SUBSTATION DC

S.O. Belinsky<sup>1</sup>, [labelectro@bk.ru](mailto:labelectro@bk.ru),  
I.M. Kirpichnikova<sup>2</sup>, [kirpichnikovaim@susu.ru](mailto:kirpichnikovaim@susu.ru),  
Yu.I. Averyanov<sup>2</sup>, [bgd-susu@mail.ru](mailto:bgd-susu@mail.ru)

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Labor Protection, Ekaterinburg, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article discusses the results of the research of electromagnetic fields parameters on a traction substation DC. The authors obtained the tension levels for electric and magnetic fields with the frequency of 50 Hz that occur in traction substations work zones. The article provides assessment of the compliance of the actual values of the electromagnetic field parameters with the maximum permissible levels.

*Keywords: electromagnetic fields, staff, traction substation, power supply, maximum permissible levels.*

### References

1. Belinsky S.A., Kuznetsov K.B. [Estimation of Parameters of Electromagnetic Fields of Low Frequency Range in Electrical Traction Power]. *Bulletin of the South Ural state University. Ser. Power Engineering*, 2012, vol. 17, no. 16 (275), pp. 62–69. (in Russ.)

2. Belinsky S.A., Kuznetsov K.B. [Estimation of Parameters of 50 Hz Electromagnetic Fields in RU-3.3 kV Traction Substations]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life safety. App.]*. Moscow, Publishing House of the New Technology, 2012, no. 7, pp. 12–17. (in Russ.)

3. Belinsky S.O. [Effects of Electromagnetic Fields of Low Frequency Band on Railway Transport Workers]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life Safety]*, 2014, no. 10, pp. 21–32. (in Russ.)

4. *Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 21.06.2016 № 81 "Ob utverzhdenii SanPiN 2.2.4.3359-16 "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochikh mestakh"*. The resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 21.06.2016 No. 81 "About the Statement SanPiN 2.2.4.3359-16 "Sanitary-epidemiological Requirements to the Physical Factors at Working Places are Lower". Available it: <http://www.pravo.gov.ru> (accessed 09.08.2016).

Received 23 May 2017

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Белинский, С.О. Экспериментальные исследования параметров электромагнитных полей частотой 50 Гц на тяговой подстанции постоянного тока / С.О. Белинский, И.М. Кирпичникова, Ю.И. Аверьянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 41–47. DOI: 10.14529/power170206

### FOR CITATION

Belinsky S.O., Kirpichnikova I.M., Averyanov Yu.I. Experimental Study of 50 Hz Electromagnetic Field Parameters on Traction Substation DC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 41–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170206