

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов*

*г. Екатеринбург, Уральский государственный университет путей сообщения*

## ESTIMATION OF PARAMETERS OF LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN ELECTRIC TRACTION POWER INSTALLATIONS

*S.O. Belinsky, K.B. Kuznetsov*

*Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport*

Рассматриваются особенности источников электромагнитных полей, нормируемые показатели предельно допустимых уровней напряженностей, воздействие которых создает риск вредного воздействия на организм человека. Оцениваются результаты измерения параметров напряженностей электромагнитных полей на рабочих местах электротехнического персонала. Показаны существенные особенности распространения электромагнитных полей. На основе анализа экспериментальных данных предлагаются пути совершенствования нормирования электромагнитных полей для электротехнического персонала тягового электроснабжения.

*Ключевые слова:* электромагнитные поля, электротехнический персонал, тяговое электроснабжение, нормирование, предельно допустимые уровни.

Peculiar features of electromagnetic fields sources, standardized indicators of maximum permissible levels of tensions, the impact of which creates a risk of harmful effects on human body are discussed in the article. The results of measurement of electromagnetic field strengths in the working place of electrical personnel are evaluated. The essential features of electromagnetic fields extension are shown. Based on the analysis of experimental data different ways of improving the standardization of electromagnetic fields for electrical traction energy personnel are suggested.

*Keywords:* electromagnetic fields, electrical personnel, traction energy, standardization, maximum permissible levels.

Вредное воздействие электромагнитного поля (ЭМП) широкого диапазона частот, которое при систематическом воздействии при высоких уровнях напряженностей может вызвать изменения функционального состояния нервной, кровеносной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем организма, может приводить к заболеваниям и симптомам нарушения трудовой деятельности.

В нормативных документах России нормируются предельно допустимые уровни (ПДУ) электрической и магнитной напряженностей ЭМП промышленной частоты (ПЧ) для работников, однако отсутствуют ПДУ, регламентирующие воздействие низкочастотного электромагнитного поля в диапазоне частот до 10 кГц. Отсутствует методика оценки воздействия на организм человека ПДУ напряженностей от высших гармонических

составляющих выпрямленного тока и напряжения. Гармонические составляющие переменного тока возникают при преобразовании переменного тока промышленной частоты в выпрямленный постоянный ток при использовании для электрической тяги на железнодорожном транспорте.

Существующее нормирование параметров ЭМП промышленной частоты осуществляется отдельно для электрической и магнитной составляющих напряженности и отсутствует методика оценки вредного воздействия на организм человека как совместного воздействия напряженностей, так и высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения. Установление параметров и разработка принципов нормирования напряженностей на рабочих местах при совместном их действии, в том числе в устройствах тяго-

вого электроснабжения, характеризующихся в этом диапазоне частот наличием ЭМП от спектра гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока, актуально.

Научно-образовательный центр «Техносферная безопасность» УрГУПС уже на протяжении ряда лет проводит исследования, в том числе теоретические и экспериментальные, по расчету, измерению и оценке уровней напряженностей электрической и магнитной составляющих ЭМП в электроустановках тягового электроснабжения [1–5].

До настоящего времени практика оценки ПДУ в электроустановках тягового электроснабжения постоянного тока основывалась на нормах для постоянных магнитных полей (МП).

Предельно допустимые величины [6] нормируемых параметров постоянных МП для условий воздействия общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) приведены в табл. 1. При необходимости пребывания персонала в зонах постоянного МП с различной напряженностью (индукцией) общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью.

Для преобразования переменного тока в постоянный для целей электрической тяги используются выпрямительные и выпрямительно-инверторные преобразователи. Современные преобразователи позволяют преобразовывать переменный ток (напряжение) промышленной частоты в выпрямленный постоянный ток (напряжение). Выпрямленный ток и напряжение отличаются от постоянного тока и напряжения наличием переменных составляющих, которые представляют собой сумму высших гармонических составляющих, кратно отличающиеся в большую сторону по частоте от промышленной частоты 50 Гц. Изучение переменных составляющих токов и напряжений в электроустановках тягового электроснабжения, в том числе в распределительных устройствах постоянного тока РУ-3,3 кВ, с точки

зрения возможного вредного воздействия на организм человека стало одним из направлений исследований. Ниже приводятся некоторые результаты такого исследования.

Оценка электромагнитного поля промышленной частоты (50 Гц) осуществляется [6] отдельно по напряженности электрического поля ( $E$ ) в кВ/м, напряженности магнитного поля ( $H$ ) в А/м или индукции магнитного поля ( $B$ ) в мкТл. Нормирование электромагнитных полей частотой 50 Гц на рабочих местах персонала дифференцировано в зависимости от продолжительности пребывания в электромагнитном поле.

Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля частотой 50 Гц на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

При напряженности в интервале  $> 5$  кВ/м до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания  $T$  в электромагнитном поле рассчитывается по формуле

$$T = (50/E) - 2,$$

где  $E$  – напряженность ЭМП в контролируемой зоне, кВ/м.

При напряженности  $> 20-25$  кВ/м включительно допустимое время пребывания в ЭМП составляет 10 мин. Пребывание в ЭМП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

Допустимое время пребывания в ЭМП может быть разовым или дробным в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭМП или применять средства защиты. Предельно допустимые уровни напряженности периодических (синусоидальных) магнитных полей устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия, табл. 2.

Допустимая напряженность магнитного поля

Таблица 1

Санитарные нормы постоянных магнитных полей

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	общее		локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0–10	24	30	40	50
11–60	16	20	24	30
61–480	8	10	12	15

Таблица 2

ПДУ периодических магнитных полей промышленной частоты

Время пребывания, ч	Допустимые уровни магнитных полей, $H$ (А/м) / $B$ (мкТл) при воздействии	
	общем	локальном
$\leq 1$	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

## Электроэнергетика

внутри временных интервалов определяется ин-терполяцией. При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью магнитного поля общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью.

Наиболее жесткие нормы в мире по ЭМП разработаны в Швеции. Эти нормы включены в официальные документы ЕЭС. В России разработаны аналогичные государственные стандарты, для пользователей ПЭВМ установлено ограниченное время пребывания в ЭМП напряженностью более 25 В/м (250 нТл) и 2,5 В/м (25 нТл) в диапазонах частот соответственно 5 Гц...2 кГц и 2...400 кГц.

В последнее время появились нормативные документы, устанавливающие ПДУ для ЭМП в диапазоне от 0 Гц до 10 кГц. Допустимые уровни электромагнитных полей для условий производственных воздействий для персонала организаций, осуществляющих медицинскую деятельность, приведены в табл. 3 [7].

Для сравнения (табл. 4) приведем аналогичные уровни воздействия электромагнитных полей, принятые в Евросоюзе [8].

Таким образом, исходя из анализа нормирования ЭМП низкочастотного диапазона, видно, что существует проблема установления объективных и единых для всех ПДУ в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц. Нормы Евросоюза и России значительно отличаются. Кроме того, раздельное нормирование электрической и магнитной составляющей не отражает реальной картины вредного воздействия ЭМП на персонал.

Для дальнейшей оценки вредного воздействия ЭМП низкочастотного диапазона будем использовать ПДУ, приведенные в табл. 1–4.

Учитывая, что на тяговых подстанциях постоянного тока применяются выпрямительные преобразователи и сглаживающие устройства, по элементам электроустановок (особенно распределительное устройство тягового электроснабжения 3,3 кВ) протекают токи высших гармоник (рис. 1).

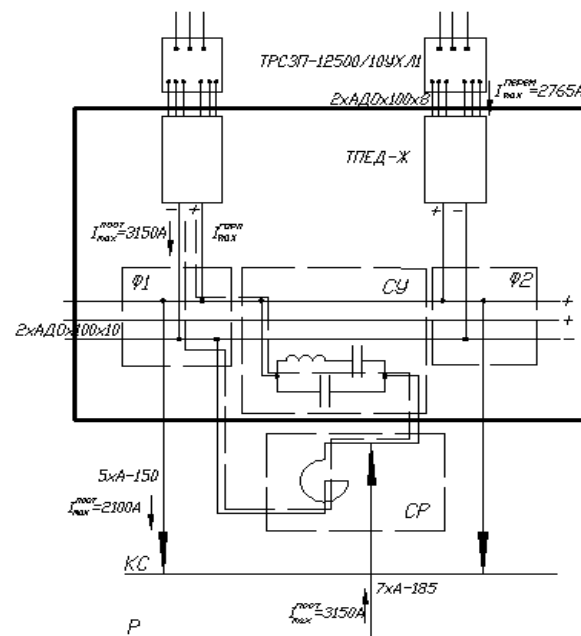


Рис. 1. Схема протекания выпрямленного тока по шинам 3,3 кВ

Результаты расчета по [9] при условии, что установлено типовое однозвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство, выпрямленное напряжение на шинах 3,3 кВ, максимальный выпрямленный ток 3150 А представлены в табл. 5.

Временные допустимые уровни синусоидальных ЭМП диапазона частот свыше 1 Гц до 10 кГц (для условий производственных воздействий)

Таблица 3

Контролируемый параметр	Временный допустимый уровень при частоте $f$	
	1–50 Гц	50 Гц–10 кГц
Напряженность электрического поля $E$ , В/м	$250 / f$	500
Индукция магнитного поля $B$ , мкТл	$5000 / f$	62,5
Напряженность магнитного поля $H$ , А/м	–	50

Ориентировочные допустимые уровни электромагнитных полей для условий производственных воздействий

Таблица 4

Диапазон частот, Гц	Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м	Индукция магнитного поля, мкТл
1–8	20000	163000–2500	
8–25	20000	2500–800	1000
50	10000	400	500
100	5000	200	250
300	1667	67	83,3
500	1000	40	50
600	833,3	33,3	41,7
900–65000	610	24,4	30,7

Уровень напряжения гармоник незначителен, поэтому анализ напряженности электрического поля гармонических составляющих не проводился, проводился анализ напряженностей только магнитных полей. Для анализа уровня напряженности магнитных полей и построения картины распределения использован пакет программ EFC-400.

Для анализа вводились следующие параметры: координаты проводников, геометрические размеры проводников, величина тока и напряжения, частота, направление тока, место расположения человека.

Построено распределение индукции магнитного поля постоянного тока и распределение магнитного поля переменного тока частотой 100 Гц под жесткими проводниками в РУ-3,3 кВ на высоте 1,8 метра от пола (рис. 2).

Из анализа распределения индукции постоянного МП установлено, что максимальное значение индукции достигает величины 1,2 мТл, что допустимо нормами ( $\leq 10$  мТл).

Из данных рис. 2 видно, что среднее значение индукции МП на уровне головы находится в пределах от 60 до 90 мкТл, что превышает длительно допустимое значение 62,5 мкТл в соответствии с табл. 3 и допустимо в соответствии с табл. 4.

На тяговой подстанции в РУ-3,3 кВ персонал может находиться как под шинами вблизи преобразователя, так и под шинами при производстве работ в ячейках 3,3 кВ. Рассмотрено распределе-

ние магнитного поля под шинами 3,3 кВ, расположенными над ячейками, в которых персонал обслуживает быстродействующие выключатели, а также другие коммутационные и измерительные устройства.

На рис. 3 показано распределение МП частотой 100 Гц под шинами 3,3 кВ вблизи преобразователя и внутри распределительных ячеек.

На рис. 3 видно, что на уровне тела человека индукция магнитного поля распределяется практически без изменений независимо от места расположения человека на тяговой подстанции под шинами 3,3 кВ.

Среднее значение индукции магнитного поля на уровне головы находится в пределах 60–90 мкТл. Расчетный уровень превышает ориентировочный допустимый уровень в соответствии с табл. 3 и не превышает нормы, принятые в Евросоюзе (см. табл. 4).

Инструментальные исследования напряженности ЭП и МП были проведены с помощью современного измерительного комплекса – анализатора электромагнитных полей EFA-300, что дало возможность провести экспериментальные измерения и анализ спектральных характеристик, гармонического состава, а также измерение параметров напряженностей ЭМП во времени.

Измеренные данные напряженностей электрической и магнитной составляющих ЭМП в РУ-3,3 кВ приведены для типовых тяговых подстанций на

Таблица 5

Токи и напряжения гармоник на шинах 3,3 кВ

$f$ , Гц	$U_k$ , В	$I_k$ , А
100	44,76	123,31
600	53,01	80,32
1200	32,57	98,4
1800	14,75	66,74

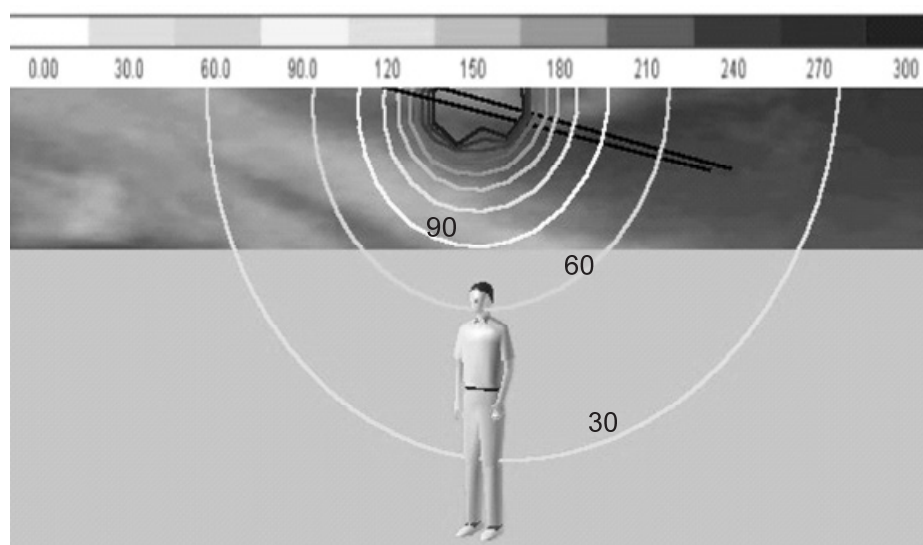


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля (мкТл) частотой 100 Гц под шинами 3,3 кВ вблизи преобразователя

## Электроэнергетика

Свердловской железной дороге с 6- и 12-пульсовыми выпрямительными преобразователями.

Одной из проблем воздействия ЭМП на персонал при эксплуатации тяговых подстанций 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.

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.

На рис. 4 представлены измеренные спектры напряженности электрического поля на двух характерных рабочих местах: под шинным мостом между выпрямительным преобразователем и ячейками 10 кВ и под шинами 3,3 кВ.

При сравнении спектров напряженности ЭП четко прослеживается разница между частотными спектрами под шинным мостом и шинами 3,3 кВ. Под шинным мостом максимальная амплитуда на

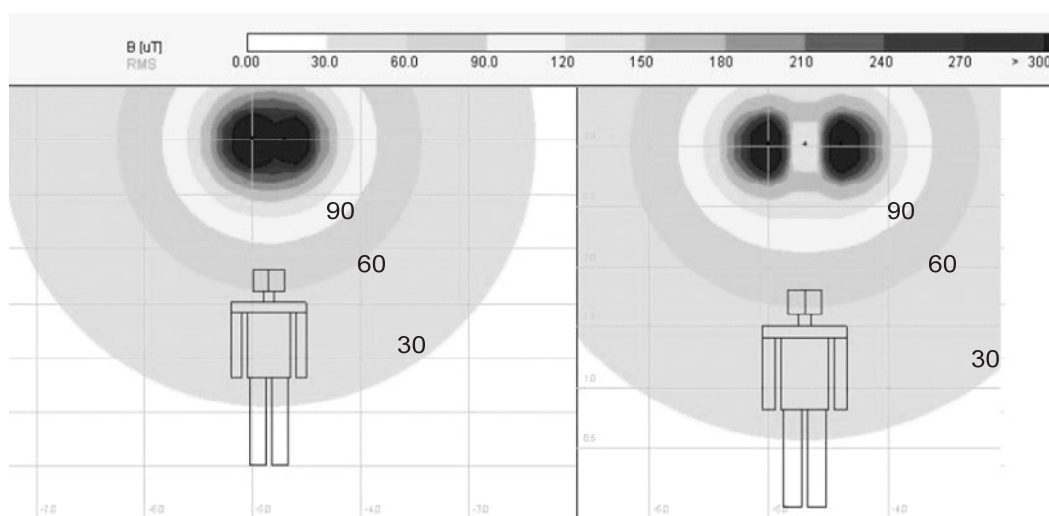


Рис. 3. Распределение индукции МП под шинами 3,3 кВ (слева – вблизи преобразователя, справа – в ячейке фидера 3,3 кВ)

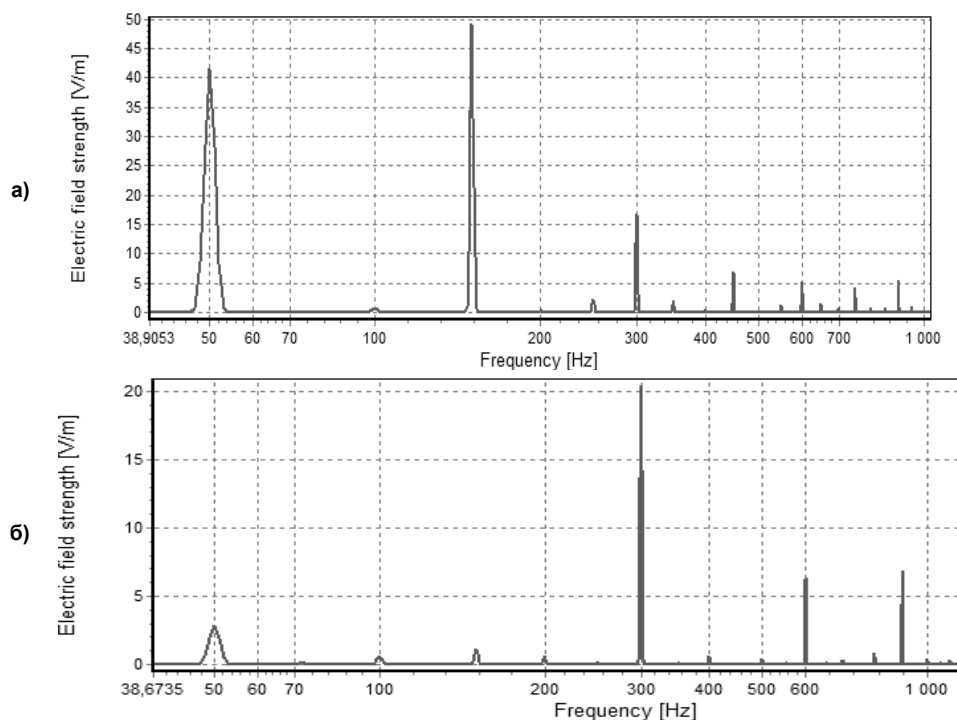


Рис. 4. Спектр напряженности ЭП:  
а – под шинным мостом между преобразователем и ячейками 10 кВ;  
б – под шинами 3,3 кВ

частотах 150, 50 и 300 Гц, а под шинами – 300, 600, 900, 1200 Гц. При этом амплитуда частотой 300 Гц под шинами 3,3 кВ незначительно больше (с учетом размерностей по оси ординат).

Гармонический анализ ЭП под шинным мостом показал, что частота 50 Гц соизмерима или незначительно меньше частоты 150 Гц, но значительно больше частоты 300 Гц (38 % от амплитуды частотой 50 Гц). Наличие в спектре составляющих напряженности с частотой 150, 450 Гц и других частот возможно обусловлено несинусоидальностью 3-фазного напряжения, питающего преобразовательный агрегат. Анализ выявленных спектральных характеристик представляет большой интерес, что может являться направлением для дальнейшего научного исследования, в частности оценки влияния напряженностей этих частот на организм электротехнического персонала.

Измерение напряженности ЭП промышленной частоты на протяжении небольшого промежутка времени (7 мин) показало, что электрическая напряженность колеблется в пределах 40–50 В/м, а среднее значение составляет 42,63 В/м. Эта величина значительно ниже нормируемого ПДУ для электрической составляющей ЭМП промышленной частоты.

Электрическое поле 50 Гц практически не меняется при изменении тягового тока, так как эта величина обусловлена напряжением на шинах переменного тока 10 кВ преобразователя.

Магнитное поле в указанных расчетных точках под шинами оценивалось при разной величине тока. Контролировалась величина тягового тока, потребляемого в данный момент на фидерной

зоне, питаемой от данной тяговой подстанции.

В работе находился один преобразователь, поэтому тяговый ток считывался с киловольтметра общего тока выпрямителя (общий ток подстанции). На рис. 5 представлены спектральные характеристики индукции МП при определенной величине тока преобразователя.

При изменении тягового тока величина индукции магнитного поля под шинами 3,3 кВ на частоте 100 Гц, 300 Гц также увеличивается и может превышать допустимые значения. Такое превышение наблюдалось на тяговых подстанциях вблизи преобразователя, в помещении сглаживающего устройства, в ячейке под шинами и в других рабочих зонах персонала.

На рис. 6 представлены изменения во времени индукции МП ПЧ под шинами 3,3 кВ и среднее значение напряженности МП при колебании тока преобразователя в диапазоне 100 – 250 А.

Скачок амплитуды (рис. 6, б) был установлен при резком увеличении тока до 330 А, но позднее при токе 500 А амплитуда становится ниже, т.е. в момент переходного режима и резкого изменения тока преобразователя индукция МП значительно возрастает.

В результате длительных наблюдений были получены значения индукции МП ПЧ при разных токах преобразователя. Можно отметить, что изменение тока преобразования влияет на величину индукции МП ПЧ: при зарегистрированном токе тяги 100 А – 0,84 мкТл, при 250 А – 1,8 мкТл, при 1100 А – 6 мкТл, при 1400 А – 8 мкТл. Зависимость изменения напряженности МП ПЧ от тока тяги получено в виде уравнения прямой (рис. 7).

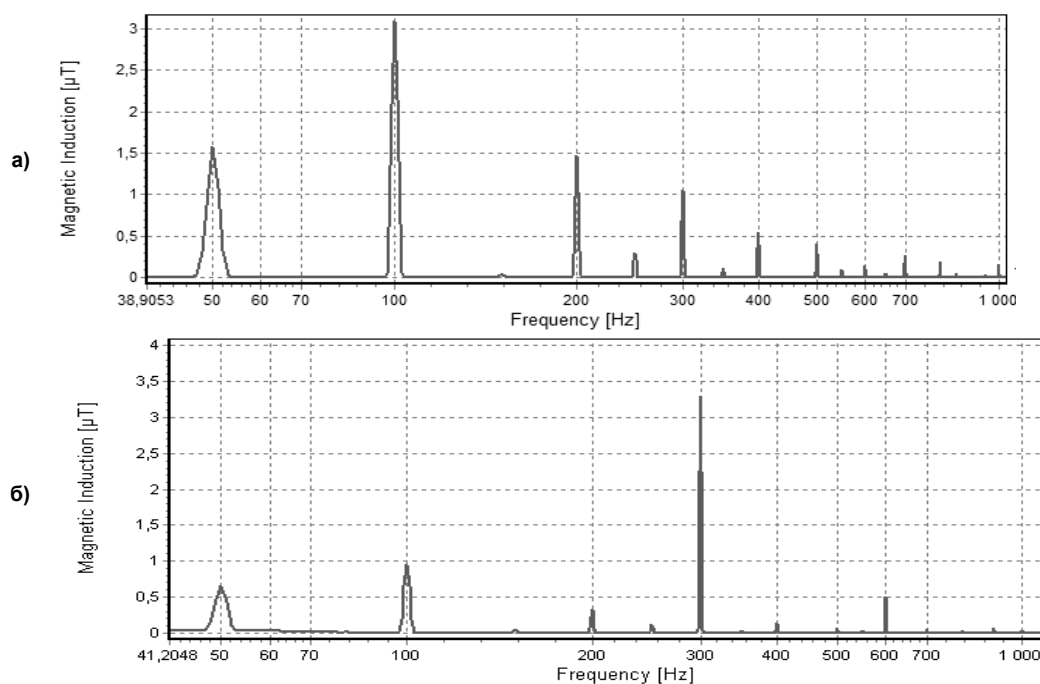


Рис. 5. Спектр индукции МП в диапазоне до 1 кГц при токе тяги 200 А:  
а – под шинным мостом; б – под шинами 3,3 кВ

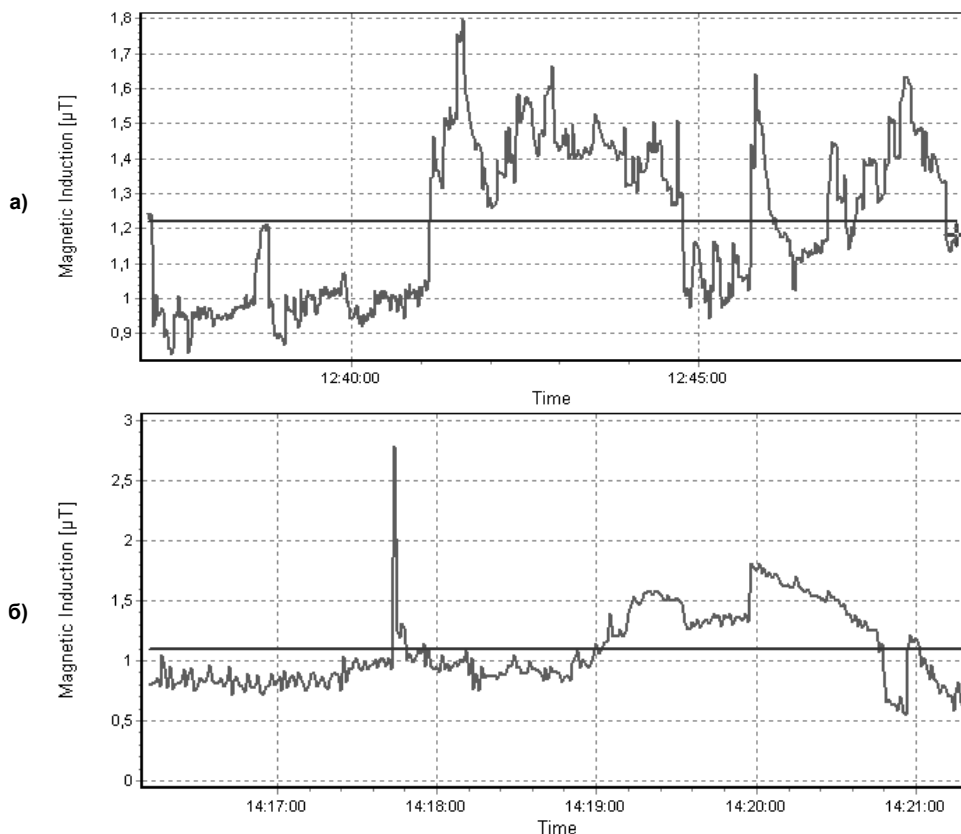


Рис. 6. Изменение индукции МП частотой 50 Гц с течением времени:  
а – под шинным мостом при токе 100–250 А; б – под шинами 3,3 кВ при токе 150–500 А

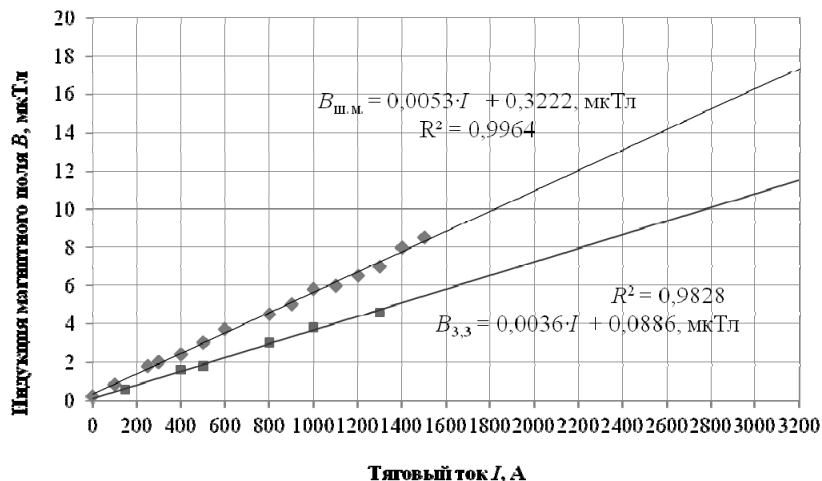


Рис. 7. Зависимость напряженности МП ПЧ от тока электрической тяги под шинным мостом ( $B_{ш.м}$  и шинами 3,3 кВ  $B_{3,3}$ )

На диаграмме показана математическая интерпретация этой зависимости.

Исследования показали, что на электротехнический персонал электроустановок тягового электроснабжения воздействует ЭМП разного рода тока, а составляющая переменного рода тока – в виде спектра напряженностей от токов и напряжений различной частоты. Существующие нормы предельно допустимых уровней электрической напряженности для электроустановок по-

стоянного и переменного электрического тока частотой 50 Гц не нарушаются. Предельно допустимые нормы магнитной напряженности постоянного тока и переменного тока 50 Гц не нарушаются. Отмечено превышение ПДУ напряженностей МП для частот переменного тока 100 Гц. Нормы и методики учета аддитивного воздействия ЭМП разного рода тока и разной частоты переменного тока в Российской Федерации отсутствуют.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

– на электротехнический персонал, обслуживающий устройства тягового электроснабжения, действуют одновременно несколько вредных факторов ЭМП: электрическая и магнитная напряженности различного рода тока (постоянный и переменный), переменные токи различной частоты (50 Гц промышленной частоты и высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока 150, 300, 450 Гц и др.). Можно говорить о совместном воздействии на работников нескольких вредных факторов ЭМП или наличии особого вредного фактора «МиксЭМП»;

– ЭМП – это единая структура, включающая электрическую и магнитную составляющие, которую электрофизики разделили на составляющие для удобства рассмотрения моделей расчета ЭМП. На организм человека действует единое электромагнитное поле, включающее электрическую и магнитную составляющие. В связи с этим нормирование электрической составляющей без учета магнитной и аналогично магнитной составляющей без учета электрической, по меньшей мере, неверно;

– целесообразно разработать методику оценки вредного воздействия экспозиции на человека одновременно электрической и магнитной составляющих ЭМП;

– необходимо разработать методику для оценки совместного одновременного воздействия на организм человека нескольких вредных факторов ЭМП, включая напряженности электромагнитных полей от переменных токов различной частоты, названное нами вредным фактором «МиксЭМП».

### Литература

1. *Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта* / К.Б. Кузнецов, А.С. Мишарин. – Екатеринбург: Изд-во УрГАПС, 1999. – 435 с.

2. Белинский, С.О. *Риск вредного воздействия электрических и магнитных полей на персонал электроустановок тягового электроснабжения* / С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов // *Электробезопасность*. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2005. – № 4. – С. 3–11.

3. Кузнецов, К.Б. *Система защиты от электромагнитного загрязнения среды электроустановками тягового электроснабжения электрического рельсового транспорта* / К.Б. Кузнецов, С.О. Белинский, А.Б. Ширишов // *Транспорт. Наука, техника, управление: Научный информационный сборник*. – М.: ВНИИТИ РАН. – 2006. – № 11. – С. 27–31.

4. Кузнецов, К.Б. *Сравнение моделей расчета электрического поля контактной сети переменного тока и оценка его вредного влияния* / К.Б. Кузнецов, С.О. Белинский // *Транспорт Урала*. – Екатеринбург. – 2005. – № 1(4). – С. 28–33.

5. Белинский, С.О. *Электромагнитные поля устройств тягового электроснабжения частотой до 10 кГц. Проблемы нормирования и защиты* / С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов // *Электробезопасность*. – 2004. – № 1, 2. – С. 11–17.

6. *Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях*. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 38 с.

7. *Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.3.2630–10. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность*. – М.: Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 36, 06.09.2010.

8. *ENV 50166-1. CENELEC. Human exposure to electromagnetic fields, high frequency (0 Hz to 10 kHz)*. – [www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/](http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/) (дата обращения: 15.06.2010).

9. Бадер, М.П. *Электромагнитная совместимость* / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС России, 2002. – 637 с.

Поступила в редакцию 10.03.2012 г.

**Белинский Станислав Олегович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург. Область научных интересов – электроэнергетика, безопасность электротехнического персонала. E-mail: SBelinsky@usurt.ru

**Belinsky Stanislav Olegovich** is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor, a head of Technospheric Safety Department of the Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg. Research interests: power engineering, electrical personnel safety.

E-mail: SBelinsky@usurt.ru.

**Кузнецов Константин Борисович** – доктор технических наук, профессор, заведующий Учебным центром охраны труда и безопасности, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург. Область научных интересов – электроэнергетика, электробиофизика, безопасность. E-mail: kkuz@r66.ru

**Kuznetsov Konstantin Borisovich** is a Doctor of Science (Engineering), a Professor, a head of Training Centre for Occupational Safety and Security of the Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg. Research interests: power engineering, electrical biophysics, security.

E-mail: kkuz@r66.ru