



Экспериментальная оценка параметров электромагнитных полей



Станислав БЕЛИНСКИЙ

Stanislav O. BELINSKY

Исследуются ситуация с нормированием электромагнитных полей, особенности источников, воздействие которых угрожает организму человека, и прежде всего в широком диапазоне частот, где предельно-допустимые нормы ЕС и РФ существенно разнятся. Оцениваются результаты экспериментальных замеров уровней электромагнитных полей на рабочих местах электротехнического персонала. Выявлены существенные риски и основания к усилению безопасности труда в зонах электроустановок тягового электроснабжения. По итогам анализа экспериментальных данных сделано заключение о степени вредного воздействия на персонал магнитных полей в диапазоне частот более 50 Гц.

Ключевые слова: электромагнитные поля, магнитные поля, электротехнический персонал, тяговые подстанции, тяговое электроснабжение, нормирование, предельно-допустимые уровни.

Белинский Станислав Олегович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия.

Вредное воздействие электромагнитного поля (ЭМП) широкого диапазона частот в определенных обстоятельствах может вызвать изменения функционального состояния нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем организма, привести к хроническим заболеваниям и нарушениям трудовой деятельности. И с этой точки зрения исследовать влияние таких полей на людей, находящихся в зоне риска, — прямая функция инженерно-экологических служб.

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ УРОВНИ

Электроустановки (ЭУ) тягового электроснабжения железнодорожного транспорта являются мощным техногенным источником ЭМП. Они 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 контактной сети. Наличие мощных выпрямителей и инверторов на подстанциях приводит к появлению

в цепях гармоник тока и напряжения, являющихся источниками электромагнитного влияния на персонал в диапазоне частот от 0 до 10 кГц.

Преобразование на подстанциях или электроподвижном составе электрической энергии переменного тока в энергию выпрямленного тока и обратно с помощью статических полупроводниковых преобразователей связано со значительным потреблением реактивной энергии. Полупроводниковые преобразователи потребляют из сети несинусоидальный ток, искажая кривую напряжения питающих энергосистем. Проводимые в УрГУПС исследования [1–3] показывают, что уровни ЭМП на объектах тягового электроснабжения могут быть близки к предельно-допустимым (ПДУ) или превышать их в отдельных случаях в рабочих зонах персонала.

Нормирование параметров ЭМП для персонала электроустановок осуществляется в России в соответствии с СанПиН [4]. Но нормируемые параметры не охватывают низкочастотный диапазон от 50 Гц до 10 кГц. С этой точки зрения важно выделить принятую ЕС директиву [5], в которой содержатся ПДУ частот, для которых в России отсутствуют нормативы (таблица 1).

В последние годы появились в стране предложения по нормированию ЭМП в диапазоне частот до 10 кГц. Так, для гигиенической оценки электромагнитных полей, генерируемых физиотерапевтическим оборудованием в диапазонах частот и режимах генерации, не имеющих в РФ регламентов, предложена частичная экстраполяция подходящих гигиенических нормативов. Эти варианты вошли как норматив в СанПиН [6] и представлены в таблицах 2 и 3.

В 2011 году родился проект нормативного документа СанПиН «Гигиенические требования к физическим факторам производственной среды», разработанный

Таблица 1
ПДУ ЭМП в соответствии с директивой ЕС

Диапазон частот	ПДУ Е, В/м	ПДУ В, мкТл
0–1 Гц	-	$2 \cdot 10^5$
1–8 Гц	20000	$2 \cdot 10^5 / f^2$
8–25 Гц		$2 \cdot 10^4 / f$
25–820 Гц	$500 / f^2$	$25 / f$
820–2500 Гц	610	30,7
2500–65000 Гц		

Таблица 2
Ориентировочные контролируемые уровни ЭМП в диапазонах частот, не имеющих в РФ гигиенических регламентов

Диапазон частот	ПДУ Е, В/м	ПДУ В, мкТл
1–50 Гц	$250 / f$ (кВ/м)	$5000 / f$ (мкТл)
50 Гц – 10 кГц	500 В/м	50 А/м

Таблица 3
Допустимые уровни физических факторов для медицинской техники

Диапазон частот	Е, В/м	В, мкТл
0 Гц (в числителе общее, в знаменателе – локальное воздействие)	–	1000/1500 (мкТл)
1–50 Гц	$25 / f$ (кВ/м)	$250 / f$ (мкТл)
50 Гц	0,5 (кВ/м)	5 (мкТл)
50 Гц – 10 кГц	50 (В/м)	5 (мкТл)

специалистами НИИ «Медицины труда» РАМН [7]. Этим документом впервые предусмотрены ПДУ для диапазона частот от 0 до 30 кГц. На данный момент он не принят, поэтому его значения используются как ориентировочные. В таблице 4 приведены ПДУ параметров ЭМП для отдельных частот.

Анализ действующих и проектируемых нормативных документов позволяет сде-

Таблица 4

ПДУ для ЭМП в диапазоне частот от 100 Гц до 3 кГц

Диапазон частот, Гц	ПДУ Е, кВ/м			ПДУ Н, А/м		
	при воздействии					
	> 2 ч	до 2 ч	до 0,2 ч	> 2 ч	до 2 ч	до 0,2 ч
100	2,5	5	12,50	40	80	800
200	1,25	2,5	6,25	20	40	400
300–3000	0,8	1,6	4	15	30	270





Рис. 1. Измерения ЭМП в тяговой подстанции.

лать вывод, что параметры ЭМП с частотами в диапазоне от 0 до 10 кГц должны рассматриваться как вредный производственный фактор на рабочих местах персонала ЭУ и требуют адекватных средств защиты.

АНАЛИТИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования уровней ЭМП в диапазоне до 10 кГц были проведены серии экспериментов на ряде тяговых подстанций постоянного тока. Получены параметры полей на рабочих местах персонала электроустановок железнодорожного транспорта. Измерения проходили с использованием анализатора электромагнитных полей EFA-300.

На рис. 1 показаны отдельные точки экспериментальных исследований.

Проводились, кроме того, измерения ЭМП в полосе частот от 5 Гц до 32 кГц в разных рабочих зонах персонала на высоте 1,8 м в течение длительных промежутков времени. На исследуемых тяговых подстанциях (ТП) находятся в эксплуатации 6-пульсовый и 12-пульсовый преобразователи. С помощью анализатора измеряли напряженности электрического поля и индукции магнитного поля (МП) на частотах 100, 150, 250, 300, 350, 450, 600 Гц и т. д. в виде спектральной характеристики, а также в виде графика изменения во времени амплитуды напряженности поля заданной частоты. Одной из главных задач было оценить динамику параметров ЭМП при изменении тока тяговой подстанции.

Надо подчеркнуть, полученные значения напряженности электрического поля частотой более 50 Гц показали, что их уровни существенно ниже нормируемых и далее в этой публикации не рассматриваются.

В результате длительных наблюдений были зафиксированы спектральные харак-

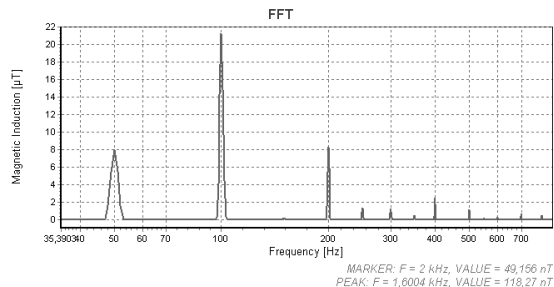


Рис. 2. Спектр индукции МП в диапазоне до 1 кГц при токе тяги 1400 А.

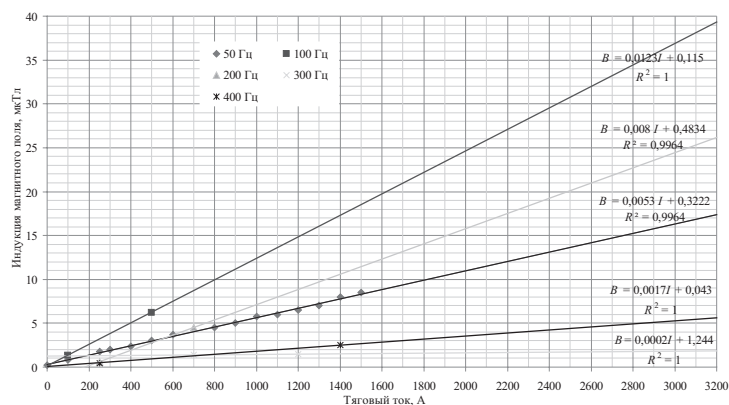


Рис. 3. Зависимость индукции МП от тока тяги под шинным мостом.

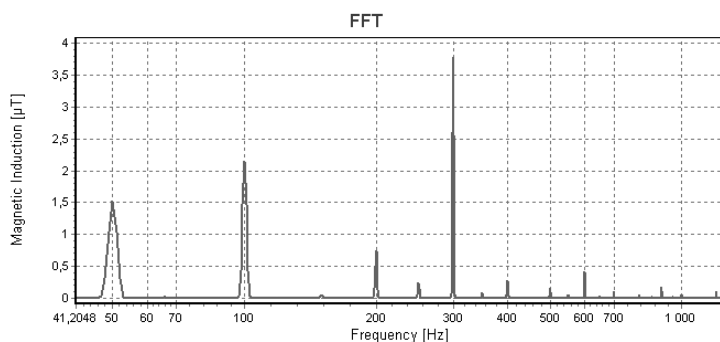


Рис. 4. Спектральная характеристика индукции МП под шинами 3,3 кВ при токе тяги 500 А.

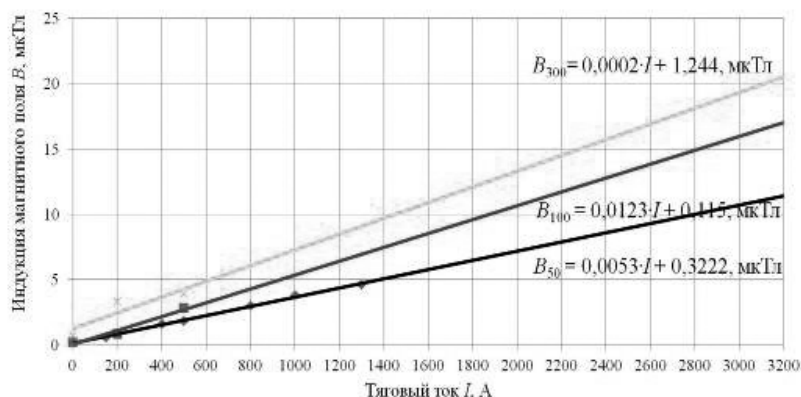


Рис. 5. Зависимость индукции МП от тока тяги под шинами 3,3 кВ.

теристики индукции МП при разном тяговом токе. Так, на рис. 2 представлена характеристика индукции магнитного поля под шинным мостом тяговой подстанции при токе тяги 1400 А. По ней видно, что преобладает амплитуда частотой 100 Гц (в 2–3 раза в зависимости от тока), а амплитуды индукции частотой 200 и 300 Гц имеют близкие по амплитуде значения с частотой 50 Гц и составляют от 1 до 9 мкТл в зависимости от тока. Правда, при больших токах амплитуда на частоте 300 Гц становится значительно ниже по амплитуде, чем амплитуды 50 и 200 Гц. В ходе анализа спектральных характеристик при разных токах установлено, что при изменении тягового тока значительно меняются параметры МП.

Для наглядности на рис. 3 построена зависимость индукции МП разных частот от тока тяги под шинным мостом.

При исследовании был получен спектр индукции МП при разных токах под шинами 3,3 кВ, по которым протекает выпрям-

ленный тяговый ток. На рис. 4 представлена спектральная характеристика индукции МП при токе тяги 500 А, а на рис. 5 зависимость индукции МП разных частот от тока тяги.

Из сравнения рис. 3 и 5 четко прослеживается разница между спектром под шинным мостом и шинами 3,3 кВ. Под шинным мостом максимальная амплитуда на частоте 100 Гц, а под шинами — 300 Гц.

ДО НОРМ ПОКА ДАЛЕКО

Исследования МП вблизи ячейки 3,3 кВ при разных токах показали, что в течение отдельных интервалов времени амплитуда индукции МП может изменяться в широких пределах, от единиц мкТл (при небольших тяговых токах) до достаточно высоких уровней в 30 мкТл при токах около 1000 А. На рис. 6 график изменения индукции МП, полученный за период 5 минут, и он наглядно иллюстрирует тот факт, что изменение индукции МП носит случайный характер и зависит от измене-



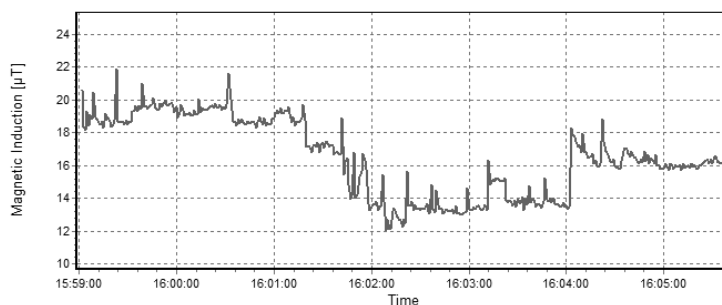


Рис. 6. Изменение индукции МП в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц вблизи ячейки фидера при токе от 200 до 600 А.

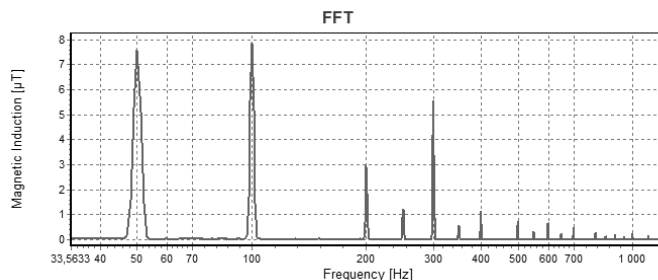


Рис. 7. Спектр индукции МП в непосредственной близости к шкафу выпрямителя.

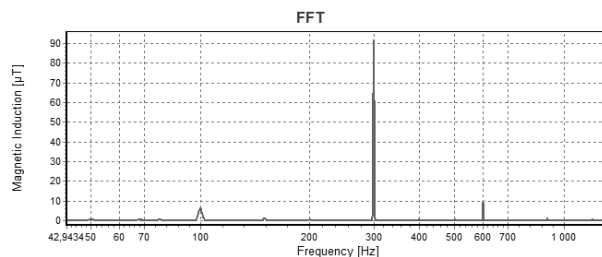


Рис. 8. Спектр индукции МП в диапазоне 5 Гц-2 кГц вблизи помещения реакторной.

ния тягового тока, а персонал вместе с тем подвергается постоянно меняющемуся во времени вредному фактору.

Кроме указанных рабочих зон были получены спектральные характеристики индукции МП вблизи выпрямителя, в реакторной, ячейке 3,3 кВ и под фидером контактной сети. Отдельные спектры представлены на рис. 7–10.

По результатам анализа спектральных характеристик можно сделать вывод, что для электроустановок тяговых подстанций заметным является присутствие магнитного поля частотой 300 Гц значительных уровней.

Обобщенные итоги исследований с учетом результатов в [9, 10], а именно индукция МП в сравнении на разных рабочих местах персонала ЭУ, демонстрирует в таблице 2.

Таким образом, наибольшие значения МП на частоте 50, 100, 200 Гц и 400 Гц

получены под шинным мостом, на частоте 300 Гц – в реакторной, под фидером контактной сети и вблизи ячейки фидера.

Учитывая современные данные о биологическом воздействии ЭМП и аддитивном эффекте при воздействии электромагнитных полей разных частот [5, 8], можно определить степень комплексного воздействия на персонал с помощью выражения:

$$\sum_{i=50 \text{ Гц}}^{10 \text{ кГц}} \frac{B_i}{B_{ПДУ_i}} \leq 1,$$

где B_i – фактическое значение индукции магнитного поля частотой i ; $B_{ПДУ_i}$ – ПДУ индукции магнитного поля частотой i .

Для оценки степени вредного воздействия на персонал магнитных полей широкого диапазона частот был выполнен расчет коэффициента суммарной индукции МП. Результаты в таблице 6.

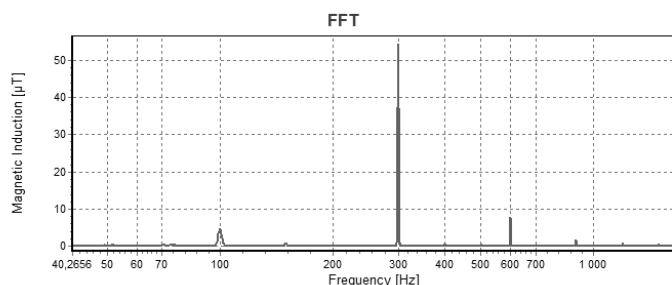


Рис. 9. Спектр индукции МП на улице под фидером КС.

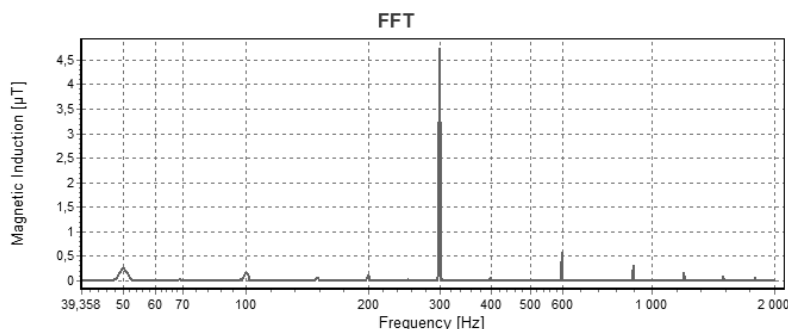


Рис. 10. Спектр индукции МП в ячейке 3,3 кВ.

Из данных таблицы видно, что при учете одновременного воздействия на персонал МП разных частот показатель суммарного воздействия в отдельных рабочих зонах не удовлетворяет нормируемым значениям (поскольку больше единицы), причем как в сравнении с предлагаемыми в РФ нормами, так и нормами ЕС. Для отдельных рабочих зон установлено превышение нормируемых параметров для индукции МП отдельной частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования показали:

1. В ЭУ железнодорожного транспорта помимо ЭМП постоянного тока, ЭМП 50 Гц присутствуют электромагнитные поля с частотой более 50 Гц, которые требуют учета при оценке воздействия на персонал, и обязательно необходим учет воздействия магнитных полей с частотой более 50 Гц.

2. Выявлены частоты МП и рабочие зоны, требующие особого рассмотрения с точки зрения безопасности труда персонала, в частности — помещения реакторной, вблизи ячейки фидера 3,3 кВ, под фидером КС.

3. Экспериментально установлено и графически показано, что уровни параметров ЭМП с частотами 100, 150, 200, 300, 600 Гц имеют высокие амплитуды, здесь нужна оценка влияния ЭМП на персонал.

4. Установлено, что при изменении величины тягового тока прямо пропорционально изменяются амплитуды гармонических составляющих индукции МП, при этом изменение амплитуды напряженности во времени носит случайный характер и зависит от тяговой нагрузки.

5. Персонал ЭУ железнодорожного транспорта подвергается комплексному воздействию МП широкого диапазона частот значительных уровней, что требует учета с помощью обобщенных коэффициентов, гигиенического нормирования, а также приборов индивидуального и коллективного контроля параметров магнитного поля.

Представляется, что на фоне сделанных выводов приоритетными направлениями должны быть медико-биологическое исследование влияния на персонал широкополосных ЭМП и установление критериев и норм вредного воздействия таких полей на человека, а также разработка средств защиты от воздействия ЭМП в диапазоне частот до 10 кГц.





Таблица 5

Параметры МП разных частот в ЭУ тяговых подстанций 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	$16 \pm 0,8$	$11 \pm 0,55$	$11 \pm 0,55$	< 1	$1,5 \pm 0,07$	$3 \pm 0,15$	< 1
100 Гц	$37 \pm 1,85$	$16 \pm 0,8$	$15 \pm 0,55$	$6 \pm 0,3$	< 1	$25 \pm 1,25$	$8 \pm 0,4$
200 Гц	$25 \pm 1,25$	$4 \pm 0,2$	$5 \pm 0,25$	< 1	< 1	< 1	< 1
300 Гц	$3 \pm 0,15$	$19 \pm 0,95$	$12 \pm 0,6$	$72 \pm 3,6$	20 ± 1	180 ± 9	120 ± 6
400 Гц	$5 \pm 0,25$	$1,8 \pm 0,09$	$1,6 \pm 0,8$	< 1	< 1	< 1	< 1
600 Гц	< 1	$2,5 \pm 0,13$	$3 \pm 0,15$	$13 \pm 0,65$	$2,5 \pm 0,13$	$30 \pm 1,5$	$16 \pm 0,8$
> 600 Гц	< 1	< 1	< 1	< 1	$1,2 \pm 0,06$	< 1	< 1

Таблица 6

Результаты расчета суммарного коэффициента индукции МП для оценки вредного воздействия на персонал

Частота, Гц	Нормируемые значения индукции магнитного поля, мкТл		Максимальная с учетом погрешности прибора индукция магнитного поля, мкТл на разных рабочих местах персонала						
	$B_{гдч}$ (ЕС)	$B_{гдч}$ (РФ)	Шинный мост	Под шинами 3,3 кВ	Вблизи выпрямителя	Вблизи ячейки фидера	Внутри ячейки фидера	В реакторной	Под фидером КС на улице
50	500,00	100,00	16,8	11,55	11,55	0	1,57	3,15	0
100	250,00	50,00	38,85	16,8	15,75	6,3	0	26,25	8,4
200	125,00	25,00	26,25	4,2	5,25	0	0	0	0
300	83,33	18,75	3,15	19,95	12,6	75,6	21	189	126
400	62,50	18,75	5,25	1,81	1,68	0	0	0	0
600	41,67	18,75	0	2,63	3,15	13,65	2,63	31,5	16,8
> 600	30,70	18,75	0	0	0	0	1,26	0	0
Суммарный коэффициент по нормам РФ			2,44	1,92	1,57	4,89	1,34	12,32	7,78
Суммарный коэффициент по нормам ЕС			0,52	0,46	0,38	1,26	0,36	3,14	1,95

ЛИТЕРАТУРА

- Белинский С. О., Кузнецов К. Б. Риск вредного воздействия электрических и магнитных полей на персонал электроустановок тягового электроснабжения // Электробезопасность. — 2005. — № 4. — С. 3–11.
- Кузнецов К. Б., Белинский С. О., Шишов А. Б. Система защиты от электромагнитного загрязнения среды электроустановками тягового электроснабжения электрического рельсового транспорта // Транспорт. Наука, техника, управление — 2006. — № 11. — С. 27–31.
- Белинский С. О., Кузнецов К. Б. Электромагнитные поля устройств тягового электроснабжения частотой до 10 кГц. Проблемы нормирования и защиты // Электробезопасность. — 2004. — № 1–2. — С. 11–17.
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях. — М., 2011. — 38 с.
- Directive 2004/40/EC-2004 (аутентичный перевод). — М.: Стандартинформ, 2005. — 27 с.
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.3.2630–10. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществля-

ющим медицинскую деятельность // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. — 2010. — № 36.

- Рубцова Н. Б., Пальцев Ю. П. и др. Проблемы и перспективы международной гармонизации гигиенических нормативов электромагнитных полей // Труды 9-го междунар. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. — СПб.: ЛЭТИ, 2011. — С. 573–576.

- Закирова А. Р., Кузнецов К. Б., Белинский С. О. Нормирование допустимой энергетической нагрузки электромагнитного поля в диапазоне частот до 10 кГц // Безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 7 (приложение). — С. 21–24.

- Белинский С. О., Кузнецов К. Б. Оценка параметров электромагнитных полей низкочастотного диапазона в электроустановках тягового электроснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2012. — № 16 (275). — С. 62–69.

- Белинский С. О., Кузнецов К. Б. Оценка параметров электромагнитных полей частотой 50 Гц в РУ-3,3 кВ тяговых подстанций // Безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 7 (приложение). — С. 12–17.

Автор является победителем конкурса на право получения гранта Общероссийской общественной организации «Российская академия транспорта» по поддержке молодых российских ученых. Статья публикуется в рамках соглашения о сотрудничестве между МИИТ и Российской академией транспорта.