

О РИСКЕ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

К.Б. Кузнецов*, А.Р. Закирова**

*г. Екатеринбург, Уральский государственный университет
путей сообщения

**г. Екатеринбург, филиал ОАО «РЖД»

RISK OF A NEGATIVE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF ELECTRIC INSTALLATIONS ON PEOPLE

K.B. Kuznetsov*, A.R. Zakirova**

*Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport,

**Russian Railways, Rossiyskie Zheleznye Dorogi (RZD)

Рассматриваются основные проблемы оценки риска воздействия электромагнитных полей специальных электроустановок электрической тяги железнодорожного транспорта на персонал. Предлагается совместное воздействие электромагнитных полей разного рода тока и частоты рассматривать в виде особого вредного фактора «миксЭМП». Рассматриваются пути эффективного нормирования и защиты персонала от воздействия вредного производственного фактора.

Ключевые слова: риск, электромагнитное поле, электроустановка, вредный производственный фактор, защита персонала.

Main problems of assessing the negative effect of electromagnetic fields of special electric installations of railway transport electric operation on railway staff personnel are examined in the article. The cooperative effect of electromagnetic field of various current and frequency in the form of a specific harmful factor “mixEMI (electromagnetic interference)” is suggested. The ways of effective regulation and protection of personnel from the harmful factor negative effect are considered.

Keywords: risk, electromagnetic field, electric installation, harmful production factor, protection of personnel.

Электрифицированные железные дороги являются мощными источниками электромагнитного поля (ЭМП) постоянного тока электроустановок 3,3 кВ и переменного тока – 27,5 кВ.

Особенностью ЭМП таких электроустановок (контактные сети, фидерные линии и часть электроустановок тяговых подстанций) является наличие не только электрической составляющей, но и мощной излучаемой магнитной составляющей ЭМП в обычном нормальном режиме электрической тяги [1].

Это объясняется тем, что применяемые для электрической тяги электроустановки (ЭУ) имеют однофазную конструкцию на переменном и двухполюсную конструкцию на постоянном токе. Это отличает их от трехфазных ЭУ, у которых при симметричной нагрузке трех фаз суммарное магнитное поле, излучаемое в окружающие пространство равно нулю. Эта проблема проявляется в трехфазных сетях при несимметричной нагрузке

фаз, что также встречается при эксплуатации ЭУ. ЭУ тягового электроснабжения как и любые другие включают устройства и сети стандартного ряда напряжений: 6–35 кВ с изолированной нейтралью, 110 кВ с эффективно заземленной нейтралью и сети с более высоким напряжением 220 кВ. Практика выполнения ЭУ и сетей показывает, что в ряде случаев на электротехнический и другие виды персонала действует излучение не только какого-то одного рода тока и частоты, но целый спектр ЭМП, вредное воздействие которого предлагается рассматривать как особый вид вредного производственного фактора, который мы условно назвали «миксЭМП».

Одним из основных вредных производственных факторов, определяющих риск заболевания работников, обслуживающих ЭУ, является электромагнитное поле. Если до недавнего времени считалось воздействие ЭМП вредным только для высоких и сверхвысоких частот, а от любых ЭУ

промышленной частоты полностью безвредным, то в середине 80-х годов прошлого века в развитых странах это утверждение было подвергнуто серьезному сомнению, а в ряде случаев опровергнуто. По этому поводу уместно упомянуть, что известный врач Парацельс (Ф. фон Гогенхейм), живший на рубеже 15–16 веков нашей эры, утверждал: «Все вещества яды и все вещества лекарства – все дело в дозе». Нечто подобное можно говорить об ЭМП, перефразировав Парацельса: «ЭМП могут лечить, ЭМП могут калечить – все дело в дозе».

Очевидно, что для защиты персонала от вредного воздействия ЭМП необходимо выполнение ряда условий:

- эффективное нормирование детерминированных критериев предельно-допустимых уровней параметров ЭМП и продолжительности экспозиции на организм человека;

- эффективное нормирование вероятностных критериев предельных параметров ЭМП с определением условной вероятности поражения организма человека с использованием пробит-функций и расчетом риска заболеваний, включая нормирование этих параметров для «миксЭМП»;

- разработку и усовершенствование техники измерений и контроля различных параметров ЭМП в ЭУ для защиты персонала расстоянием и временем;

- разработку защитных и предохранительных коллективных, индивидуальных средств и защитной спецодежды.

В данной работе оценивается существующая практика нормирования параметров ЭМП в производственных условиях [2, 4] и рассматриваются предложения по совершенствованию этой практики.

Спектр выпрямленного постоянного и переменного тягового тока на практике всегда включает в себя высшие гармонические составляющие в диапазоне частот до 10 кГц.

Действительно, электроустановки постоянного тока содержат не только составляющую выпрямленного тока, но и, как правило, переменную составляющую высших гармонических токов, основная часть которых протекает внутри контура «выпрямительный преобразователь – сглаживающее устройство», т. е. ограничено зданием и территорией тяговой подстанции. Кроме этих составляющих переменного тока на организм персонала воздействуют ЭМП линий электропередачи (ЛЭП) 6–10 кВ, проложенные вдоль контактной сети для питания сигнальных устройств электрической централизации, в несинусоидальные токи которых входят составляющие спектра высших синусоидальных гармонических составляющих переменного тока. Тяговая сеть переменного тока 25 кВ содержит ЭМП не только синусоидальной составляющей 50 Гц, но и гармонических составляющих более высоких частот вплоть до 10 кГц. На работников электрифицированного железнодорожного

транспорта, как на станциях, так и на перегонах между станциями постоянно действует целый спектр ЭМП различных рода тока и частот переменного тока. До сих пор вредное воздействие высокочастотных составляющих ЭМП тяговой сети постоянного тока на организм человека не исследовалось.

Тяговые линии и устройства электрической тяги переменного тока обладают также еще одной существенной отличительной особенностью от трехфазных ЛЭП и устройств. Однофазная конструкция тяговой линии по сравнению с трехфазной линией создает мощную магнитную составляющую ЭМП.

Интерес к проблемам воздействия, нормирования и защиты от ЭМП связан с тем, что в России в настоящее время отсутствуют нормируемые предельно допустимые уровни ЭМП в диапазоне частот до 10 кГц, а в существующих нормативах [3] воздействие ЭМП для этого диапазона частот оценивается отдельно по двум составляющим: электрической и магнитной.

Как было показано ранее [1], практически всегда на человека, находящегося в зоне воздействия ЭМП переменного тока, действуют одновременно электрическая и магнитная составляющая ЭМП, поэтому особенно для электрифицированного транспорта существует потребность в разработке и принятии нормируемого показателя ЭМП, комплексно учитывающего воздействие обеих составляющих, например в виде электроэнергетического показателя. Таким показателем может быть величина вектора Пойнтинга [2].

Вектор Пойнтинга \mathbf{S} представляет собой произведение векторов электрической \mathbf{E} и магнитной \mathbf{H} составляющих ЭМП и характеризует плотность потока энергии или энергетическую нагрузку в Вт/м²:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}], \quad (1)$$

полученное из выражения

$$\oint_A (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dA.$$

Последнее выражение определяет энергию, проходящую в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную его направлению. Размерность этого вектора – отношение мощности к единице поверхности, то есть Вт/м². Когда речь идет о воздействии ЭМП на живой организм, целесообразно называть этот электроэнергетический показатель энергетической нагрузкой на организм человека. Величина и направление этого показателя определяются векторным произведением векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} , а абсолютная величина S – произведением их модулей E и H .

Будем исходить из гипотезы, что действие электрической и магнитной составляющих ЭМП переменного тока на живой организм носит аддитивный характер.

Электроэнергетика

В ряде случаев для оценки аддитивного характера различающихся вредных факторов предлагается применять соотношение:

$$\frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \leq 1, \quad (2)$$

где E_i и $E_{\text{норм}}$ – соответственно измеренное и нормируемое значения электрической напряженности ЭМП, кВ/м,

H_i и $H_{\text{норм}}$ – соответственно измеренное и нормируемое значения магнитной напряженности ЭМП, А/м.

Это соотношение (2) с помощью относительных значений электрической и магнитной напряженностей ЭМП можно применить и для оценки совместного их действия на организм персонала электроустановок. При постоянно изменяющемся магнитном поле электроустановок во времени применение такого соотношения для оценки интегрального воздействия представляется затруднительным.

Отсюда можно утверждать, что комплексный показатель $P_{\text{норм}}$ для ЭМП переменного тока при одной и той же длительности экспозиции продолжительностью, например, 8 ч при условии включения в него произведения двух нормируемых составляющих $E_{\text{норм}}$ и $H_{\text{норм}}$, можно уменьшить (оценивая половинной величиной каждого показателя). Из-за аддитивного (суммарного) воздействия составляющих ЭМП на организм человека модуль нормируемого значения вектора Пойнтинга необходимо уменьшить, по крайней мере, в два раза:

$$P_{\text{норм}} = (E_{\text{норм}} H_{\text{норм}}) / 2, \quad (3)$$

где $P_{\text{норм}}$ – векторное значение электроэнергетического показателя, имеющего направление перпендикулярное векторам $E_{\text{норм}}$ и $H_{\text{норм}}$. Модуль вектора может быть получен произведением абсолютных значений обоих векторов. Таким образом, в качестве абсолютных значений векторов можно использовать значения нормируемых электрической и магнитной напряженностей ЭМП.

Возникает вопрос, как использовать существующие нормируемые показатели напряженностей для определения нормируемой величины вектора Пойнтинга.

Абсолютное значение модуля $P_{\text{норм}}$ на основе нормируемых показателей $E_{\text{норм}}$ и $H_{\text{норм}}$ и соотношения (3) для различных продолжительностей экспозиции и аддитивного воздействия на организм человека можно принять в качестве допусти-

мой энергетической нагрузки, они представлены в табл. 1.

Из расчетных показателей табл. 1 видно, если принять воздействие электрической и магнитной составляющих ЭМП для продолжительности 8-часового рабочего дня при соответствующих предельно допустимых уровнях (ПДУ) для этой продолжительности, то предельно допустимая энергетическая нагрузка составит 200 кВт/м². В первом приближении это значение можно принять в качестве предельно допустимой дозы энергетической нагрузки ЭМП.

Оценка и нормирование ЭМП осуществляется по уровню ЭМП дифференцированно, в зависимости от продолжительности его воздействия на работника за смену для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) воздействий.

Допустимое время пребывания человека в зоне излучения ЭМП при общем воздействии в этом случае можно выразить из соотношения:

$$t_{\text{доп}} = \frac{P \cdot T}{D_{\text{ЭП}}^0}, \quad (4)$$

где P – нормируемая энергетическая нагрузка, кВт/м²;

T – время рабочей смены 8 ч;

$D_{\text{ЭП}}^0$ – общая доза облучения при нормируемом электроэнергетическом показателе, кВт/м²,

$$D_{\text{ЭП}}^0 = H_{\text{норм}} E_{\text{норм}} / 2. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены расчеты абсолютных значений вектора Пойнтинга при использовании нормируемого значения электрической напряженности [4] для каждого интервала продолжительности воздействия ЭМП с учетом значения магнитной составляющей, не превышающей наименьшее допустимое значение 80 А/м.

В табл. 3 приведены абсолютные значения вектора Пойнтинга при использовании для расчета минимального допустимого значения электрической составляющей ЭМП 5,0 кВ/м и нормируемых для каждого интервала времени значений магнитной напряженности.

По [4] для 8-часового рабочего дня ПДУ ЭП 5 кВ/м, МП 80 А/м, энергетическая нагрузка составит 200 кВт/м².

Эти расчеты, учитывающие аддитивное совместное действие электрической и магнитной составляющих ЭМП на организм человека, существенно корректируют допустимое время пребы-

Таблица 1

Энергетическая нагрузка при нормируемых значениях напряженностей ЭМП

Экспозиция, ч	ПДУ электрической составляющей напряженности, В/м [3]	ПДУ магнитной составляющей напряженности (при общем воздействии), А/м [3]	Энергетическая нагрузка, $P_{\text{норм}}$, кВт/м ² (3)
1	16666	1600	13333
2	12500	800	5000
4	8333	400	1667
8	5000	80	200

Таблица 2

Нормируемые уровни значения вектора Пойнтинга, рассчитанные из дозового принципа продолжительности воздействия ЭМП (при минимальной магнитной напряженности)

$T=50/E-2$ по [2]				Допустимое время пребывания, ч
Допустимое время пребывания, ч	Уровень $E_{\text{норм}}$, кВ/м	Минимальный уровень $H_{\text{норм}}$, А/м	$D_{\text{ЭП}}^0$, кВт/м ² (2)	$P_2 = 200$ кВт/м ² при 8-часовой экспозиции
0,167 (10 мин)	20,0-25,0	80,0	1000	1,6
До 1	16,7	80,0	668	2,4
2	12,5	80,0	500	3,2
4	8,33	80,0	333,2	4,8
8	5,0	80,0	200	8

Таблица 3

Нормируемые уровни значения вектора Пойнтинга, рассчитанные из дозового принципа продолжительности воздействия ЭМП (при минимальной электрической напряженности)

Допустимые уровни ЭМП с оценкой по [2]				Допустимое время пребывания, ч
Допустимое время пребывания, ч	Уровень $H_{\text{норм}}$, А/м	Минимальный уровень $E_{\text{норм}}$, кВ/м	$D_{\text{ЭП}}^0$, кВт/м ²	$P_2 = 200$, кВт/м ² при 8-часовой экспозиции
<1	1600	5,0	4000	0,2
2	800	5,0	2000	0,4
4	400	5,0	1000	0,8
8	80	5,0	200	8

вания человека в зоне вредного воздействия ЭМП в сторону уменьшения при сравнении с нормируемой продолжительностью при раздельном нормировании воздействия на человека электрической и магнитной напряженностей ЭМП.

Рассмотрим нормы и стандарты некоторых стран для диапазонов частот до 10 кГц [4].

Нормы некоторых стран и соответствующие им энергетические нагрузки для диапазона частот до 10 кГц представлены в табл. 4.

Рассматривая нормирование предельно допустимых норм напряженностей ЭМП разных стран, мы встречаем противоречия, для одного и того же диапазона частот разные уровни напряженности ЭМП, причем значения в величинах нормируемых значений отличаются в десятки раз.

В табл. 5 приведена выборка этих норм, отражающих нормирование параметров ЭМП в рассмотренных странах для частоты 50 Гц.

Там же приведены расчетные значения энергетической нагрузки, вычисленные по (3) для нормируемых параметров электрической и магнитной составляющих ЭМП промышленной частоты ряда стран. Анализ нормируемых параметров ЭМП ряда стран показывает их удивительное отличие по величине в разных странах. Нормируемые параметры электрической напряженности ЭМП в разных странах отличаются в 3000 раз (30–0,01 кВ/м), параметры магнитной напряженности ЭМП – в 1140 раз (128–0,2 А/м), соответственно энергетическая нагрузка по (3) отличается в 350000 раз (700–0,002 кВт/м²). В Японии напряженность маг-

нитного поля для промышленной частоты переменного тока не нормируется.

Такое, казалось хаотическое нормирование предельно допустимых уровней напряженностей ЭМП в разных странах, имеет вполне определенный смысл.

Международный опыт нормирования параметров вредного воздействия ЭМП низкочастотного диапазона на человека показывает, что выделяются страны Корея, Россия (для ПЭВМ), Швеция, в которых установлены малые значения нормируемых показателей электрической и магнитной напряженностей ЭМП на рабочих местах в сотни раз меньше, чем аналогичные показатели в других странах. В этих случаях малые значения нормируемых показателей сами по себе являются настолько малыми и безопасными, что их аддитивное воздействие на организм человека, например, оцениваемое с помощью энергетической нагрузки, с большой долей вероятности можно не учитывать.

Другой ряд стран, который представляют Великобритания, Польша, Россия (для электроустановок), в определенной мере Япония и др., имеют высокие уровни нормируемых показателей электрической и магнитной составляющих ЭМП. В этом случае нормирование этих показателей вредного воздействия на организм человека без учета их комплексного воздействия представляется несовершенным.

Наши исследования показали, что на протяжении 8 лет число обращений в больничные учреждения железнодорожников по ряду заболеваний

Нормируемые параметры ЭМП при общем воздействии в низкочастотном диапазоне [4–7]

Страна	Частота f , Гц	Напряженность ЭП, кВ/м	Напряженность МП, А/м	Энергетическая нагрузка, кВт/м ²
Польша (население)	0,5–50	1	60	30
	50–1000	–	60–3	–
	>1000	0,020	3	0,03
Великобритания (профессионалы и население)	24–600	25–1 (12)	2667–107 (128)	3337–53,5
	750–1000	1	85–64	42,5–32
	>1000	1	64	32
Япония (профессионалы и население)	50/60	3	–	–
	>100	0,614	163	50,041
	>10000	0,275	72,8	10,01
Республика Корея (профессионалы и население)	8–25	0,020	200	2,00
	25–820	0,020–0,0061	0,64–0,0195	0,0124–0,00012
	>820	0,0061	0,0195	0,00012
Национальный стандарт ENV 50166-1	1–50	30	1,6	24
	60–1400	25–3,25	1,33–0,2	16,625–0,325
	1500–10000	1	0,2	0,1
Россия, ПВЭМ	0,5–1500	0,025	0,2	0,0025
	3000	0,25	0,02	0,025
	10000	0,25	0,02	0,025
Россия СанПиН 2.2.4.1191–03	50	5,0	80,0	200

Таблица 5

Нормируемые параметры ЭМП для частоты 50 Гц

Страна	Напряженность ЭП, кВ/м	Напряженность МП, А/м	Энергетическая нагрузка по (3), кВт/м ²
Польша (население)	1,0	60,0	30,0
Великобритания (профессионалы и население)	12,0	128	700
Япония (профессионалы и население)	3,0	163 (для 100 Гц)	245
Республика Корея (профессионалы и население)	0,01	0,4	0,002
Национальный стандарт ENV 50166-1	30,0	1,6	24
Швеция MRP II, Россия, ПВЭМ	0,025	0,2	0,0025
Россия СанПиН 2.2.4.1191–03	5,0	80,0	200

существенно возросло. В системе здравоохранения России осуществляется обязательный учет числа обращений граждан с различными заболеваниями на 1000 обратившихся в учреждения здравоохранения. Этот удельный показатель рассматривался на протяжении ряда лет. Особую обеспокоенность вызывает рост числа обращений с заболеваниями, в возникновении и развитии которых существенную роль вносит длительное воздействие электромагнитного поля (ЭМП) на организм человека.

Для оценки риска заболеваний работников (электроустановок) были проанализированы обращения с заболеваниями в учреждения здравоохранения в регионе, где отсутствует электриче-

ская тяга (регион направления Тюмень – новый Уренгой) и аналогичных обращениях с заболеваниями работников в регионах, где применяется электрическая тяга.

Эти исследования показали, что относительное превышение числа заболеваний у основной группы (лица в большей степени подверженные воздействию ЭМП на электрифицированных участках железных дорог) по сравнению с контрольной группой (лица в меньшей степени подверженные ЭМП на не электрифицированных участках железных дорог) составляет: рост числа обращений по заболеваниям злокачественных опухолей в 1,5 раза, рост числа обращений по заболеваниям

системы кровообращения – в 1,5 раза. Можно предполагать, что рост числа заболеваний связан с большим перечнем причин и обстоятельств современного развития, однако нельзя исключать из причин и вредного воздействия ЭМП.

Предлагается нормировать величину значения дозы энергетической нагрузки при общем воздействии на организм человека и установить нормируемое значение дозы энергетической нагрузки в течение рабочего дня 200 кВт/м^2 .

Допустимые продолжительности пребывания человека в соответствии с существующими нормами [3] в зоне действия ЭМП следует скорректировать по предлагаемому дозовому принципу нормирования показателей ЭМП.

Целесообразно скорректировать и нормы локального воздействия ЭМП на отдельные части организма человека по дозовому принципу воздействия.

Литература

1. Кузнецов, К.Б. *Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта* / К.Б. Кузнецов, А.С. Мишарин. – Екатеринбург: Изд-во УрГАПС, 1999. – 425 с.

2. Кузнецов, К.Б. *Применение электроэнергетических характеристик электромагнитного поля для нормирования их вредного воздействия на человека. Безопасность жизнедеятельности: сб.*

науч. тр. // под науч. ред. С.О. Белинского. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2009. – Вып. 79 (162). – С. 76–80.

3. Ландау, Л.Д. *Теория поля* / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1967. – 460 с.

4. *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.

5. *ENV 50166-1, January 1995, CENELEC, Human exposure to electromagnetic fields, high frequency (0 Hz to 10 kHz).* – www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/ (дата обращения: 15.06.2010).

6. *СанПиН 2.5.2/2.2.4.1989–06. Электромагнитные поля на плавательных средствах и морских сооружениях.* – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2006.

7. *СанПиН 2.2.2/2.4.4.1340–03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.* – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 42 с.

8. *Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда // Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора.* – 2005. – Вып. 3 (21).

Поступила в редакцию 20.01.2012 г.

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

Закирова Альфия Резовановна – ведущий инженер по охране труда, Свердловский ОЦОР филиала ОАО «РЖД», г. Екатеринбург. Область научных интересов – охрана труда при эксплуатации электроустановок.

Zakirova Alfia Rezovanovna is a senior engineer for occupational safety of Sverdlovsk Regional Shared Service Center of a branch of JSC “RZD”, Yekaterinburg. Research interests: occupational safety in the operation of electrical installations.