

УДК 621.31

DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0028

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА НОРМИРОВАНИЯ ЭМП

© 2020

Кузнецов Константин Борисович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техносферная безопасность»,

Закирова Альфия Резавановна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»,

Уральский государственный университет путей сообщения,

Фонд развития институтов социального финансирования и поддержки общественно значимых социальных программ и защиты гражданских инициатив

(620034, Россия, Екатеринбург, улица Колмогорова, 66, e-mails: kobokuz@gmail.com, AZakirova@usurt.ru)

Аннотация. В статье приводится новый метод оценки вредного воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на работников электрифицированного железнодорожного транспорта. Оценка осуществляется по энергетической характеристике ЭМП, определяемой электрической мощностью поля на основе вектора Пойнтинга. При осуществлении принципа оценки вредного воздействия ЭМП на персонал использовались данные нормируемых значений, утвержденные в странах ЕС. Это связано с тем, что в практике нормирования РФ не оцениваются ЭМП до 1 кГц, кроме промышленной частоты 50 Гц. Оценка вредного воздействия ЭМП на персонал, с помощью его энергетической характеристики, предложена авторами впервые в мировой практике. Рассчитаны уровни энергетической нагрузки ЭМП в диапазоне низких частот переменного тока, по которым возможно оценивать вредное воздействие ЭМП спектра гармоник переменного тока низкой частоты на работника.

Ключевые слова: электрическое поле, магнитное поле, энергетическая нагрузка, электротехнический персонал, вектор Пойнтинга, нормирование, оценка, контроль.

MODEL FOR ESTIMATING ENERGY LOAD BASED ON INTERNATIONAL EXPERIENCE IN RATING EMF

© 2020

Kuznetsov Konstantin Borisovich, doctor of Technical Sciences, professor,
professor of «Department of Technosphere Safety»

Zakirova Alfiya Rezavanovna, candidate of Technical Sciences, associate professor
associate professor of «Department of Technosphere Safety»

Ural State University of Railways, Fund for the Development of Social Finance Institutions and Support of Socially Significant Social Programs and Protection of Civil Initiatives

(620034, Russia, Yekaterinburg, Kolmogorova street, 66, e-mails: kobokuz@gmail.com, AZakirova@usurt.ru)

Abstract. The article presents a new method for assessing the harmful effects of electromagnetic fields (EMF) on employees of electrified railway transport. The assessment is carried out according to the energy characteristic of the EMF, determined by the electric power of the field based on the Poynting vector. When implementing the principle of assessing the harmful effects of EMF on personnel, the data of standardized values approved in the EU countries were used. This is due to the fact that in the practice of RF regulation, EMFs up to 1 kHz are not evaluated, except for the industrial frequency of 50 Hz. Evaluation of the harmful effects of EMF on personnel, using its energy characteristics, was proposed by the authors for the first time in world practice. The energy load levels of EMF in the range of low frequencies of alternating current are calculated, according to which it is possible to assess the harmful effects of EMF of the spectrum of harmonics of alternating current of low frequency on an employee.

Keywords: electric field, magnetic field, energy load, electrical personnel, Poynting vector, standardization, assessment, control.

Введение. В соответствии с требованиями Трудового кодекса РФ [1] работодатель обязан обеспечить работникам безопасные условия труда. Объекты железнодорожного транспорта имеют электроустановки [2-20], работающие на переменном токе и постоянном (выпрямленном) токе. На рабочих местах персонала одновременно присутствуют электрические и магнитные поля со спектром высших гармонических составляющих до 1 кГц. Известно, что электромагнитные поля способны вызывать различные заболевания у персонала. Всемирная организация здравоохранения включила проблему предупреждения неблагоприят-

ного влияния техногенных ЭМП на здоровье человека в число наиболее важных задач профилактической медицины. Работники могут находиться годами под воздействием ЭМП спектра высших гармонических составляющих, а из-за пробелов в области нормирования и защиты (на законодательном уровне) они на медицинский осмотр не направляются. В этом случае предупредить их профессионально обусловленную заболеваемость не представляется возможным.

Нормирование и оценка ЭМП в России и в мировой практике осуществляется раздельно по электрической (E) и магнитной (H) составляющим поля [21]. В

данном случае раздельную оценку и нормирование E и H проводить нецелесообразно, т. к. не существует методики суммирования аддитивного воздействия составляющих ЭМП на организм человека. Необходим новый метод оценки и нормирования рассматриваемых вредных производственных факторов.

Цель работы – разработать новый метод аддитивной оценки и нормирования электрических и магнитных полей до 1 кГц.

За основу метода возможно использовать значимый параметр ЭМП – вектор Пойнтинга [4, 6-7, 19]. Предельно допустимые уровни (ПДУ) ЭМП до 1 кГц, имеющиеся в России, не позволяют использовать предлагаемый метод в полной мере, так как в РФ нормируются ЭМП только частотой 50 Гц [21]. Подход в области нормирования ЭМП в 28 странах Евросоюза (ЕС) предполагает учет всего спектра низких и высоких частот. Нормирование ЭМП в ЕС осуществляется с обозначениями:

- "низкие ALs " и "высокие ALs ". Для электрических полей означает уровни, которые соответствуют специальным защитным или профилактическим мерам, указанным в [22];
- "низкие ALs " для магнитных полей означает уровни, которые соответствуют $ELVs$ для образования сенсорных эффектов и "высокие ALs " означает $ELVs$ для возникновения последствий для здоровья.

ALs соответствуют уровням напряженностей электрических и магнитных полей, рассчитанным или измеренным на рабочем месте в отсутствие работника.

Результаты исследования. На основании нормируемых уровней напряженностей электрических полей в зависимости от частоты можно рассчитать их максимальные значения для различных частот ЭМП и установить уравнения регрессионных моделей E (рис. 1).

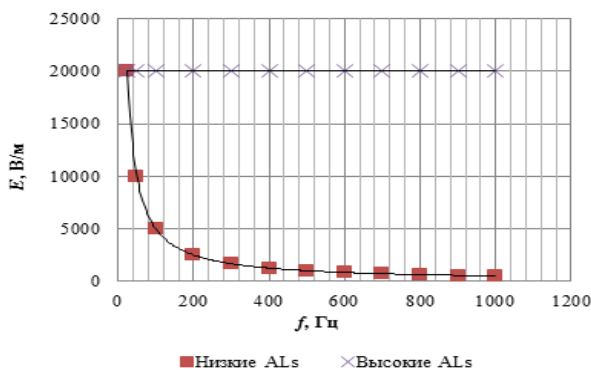


Рисунок 1- ПДУ напряженностей электрических полей

Таблица 2 – Уравнения регрессионных моделей H и коэффициенты детерминации

ALs	уравнения регрессионных моделей H	коэффициент детерминации	возможность использования зависимости	тип функции
Высокие	$y = 24000x^{-1}$	$R^2 = 1$	да	степенная
Низкие	$y = -0,0681x + 86,877$	$R^2 = 0,9381$	да	прямая

Для высоких ALs H получена степенная функция с коэффициентами: $a=24000$, $n=-1$.

Для низких ALs H – линейная функция, с коэффициентами: $k=-0,0681$; $b=86,877$.

ПДУ напряженности электрического поля (низкие ALs) для частоты 25 Гц составляет 20000 В/м, для 1000 Гц – 500 В/м. ПДУ напряженности электрического поля (высокие ALs) от 25 Гц до 1000 Гц является величиной постоянной и равной 20000 В/м.

Уравнения регрессионных моделей E и коэффициенты детерминации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уравнения регрессионных моделей E и коэффициенты детерминации

ALs	уравнения регрессионных моделей E	коэффициент детерминации	возможность использования зависимости	тип функции
Высокие	$y = 500000x^{-1}$	$R^2 = 1$	да	степенная
Низкие	$y = 20000$	-	да	прямая

Для высоких ALs (напряженность электрического поля) получена степенная функция. В общем виде степенная функция имеет вид:

$$y = ax^n \quad (1)$$

Для данного случая, $a=500000$, $n=-1$.

Связь между напряженностью электрических полей (низкие ALs) находится в прямой зависимости от частоты и является ее линейной функцией. Линейная функция задается формулой:

$$y = kx + b \quad (2)$$

В этом случае, $kx=0$; $b=20000$.

На основании данных [22] построены зависимости изменения ПДУ напряженности магнитного поля (низкие ALs и высокие ALs) от частоты (рис. 2).

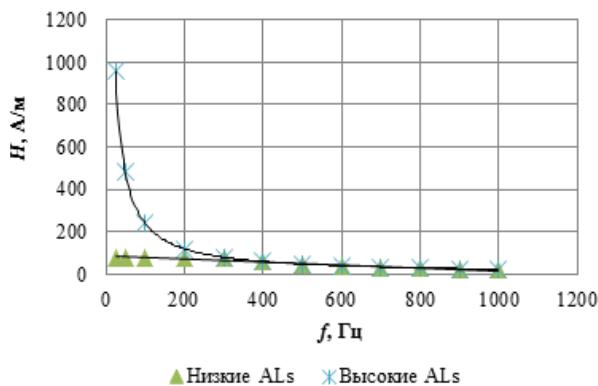


Рисунок 2 – ПДУ напряженностей магнитных полей

ПДУ напряженности магнитного поля 25 Гц для низких ALs – 80 А/м, для высоких ALs – 960 А/м., а ПДУ напряженности магнитного поля 1000 Гц (низкие и высокие ALs) равен 24 А/м. Уравнения регрессионных моделей H и коэффициенты детерминации приведены в таблице 2.

Описав функции изменения напряженностей электрических и магнитных полей в зависимости от частоты, можно определить изменения энергетической нагрузки ЭМП. Для учета аддитивности воздействия

двух рассматриваемых вредных факторов на персонал [23], необходимо каждый из них уменьшить в 2 раза. Впервые на основе рассмотренных данных построен график изменения энергетической нагрузки ЭМП от частоты, который приведен на рисунке 3.

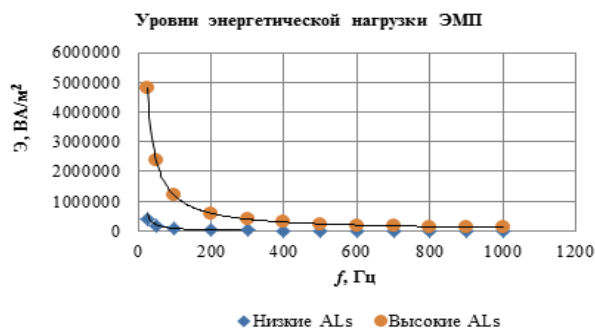


Рисунок 3 - Уровни энергетической нагрузки ЭМП

Диапазон изменения вектора Пойнтинга колеблется для высоких ALs от 4800 до 120 кВА/м², низких ALs

от 400 до 3 кВА/м². Уравнения регрессионных моделей \mathcal{E} и коэффициенты детерминации указаны в таблице 3.

Зависимость энергетической нагрузки ЭМП, для высоких и низких ALs , от частоты поля имеет степенную функцию с коэффициентами: $a=108$, $n=-1$, и соответственно $a=4 \cdot 10^7$, $n=-1,329$.

Так как принцип нормирования ЭМП в России отличается от ЕС, то приведенные уравнения регрессионных моделей H , E , \mathcal{E} помогут осуществить переход от Европейских стандартов к Российским.

Гармонизация российских документов в области стандартизации, содержащих требования охраны труда в части: оценки, контроля и нормирования ЭМП до 1 кГц, с международными стандартами - является приоритетным направлением по совершенствованию технического регулирования и развитию национальной системы стандартизации в области охраны труда в Российской Федерации.

Таблица 3 - Уравнения регрессионных моделей \mathcal{E} и коэффициенты детерминации

ALs	уравнения регрессионных моделей \mathcal{E}	коэффициент детерминации	возможность использования зависимости	тип функции
Высокие	$y = 10^8 x^{-1}$	$R^2 = 1$	да	степенная
Низкие	$y = 4 \cdot 10^7 x^{-1,329}$	$R^2 = 0,9722$	да	степенная

В Концепции гармонизации российских и международных нормативных документов в области охраны труда под международными стандартами понимаются международные европейские стандарты, например [22]. Актуальность задачи гармонизации обусловлена необходимостью использования зарубежных научно-технических достижений в целях повышения уровня защиты персонала от техногенного источника – ЭМП в Российской Федерации. Например, существующая система документов в области стандартизации, содержащих требования защиты населения от ЭМП до 10 кГц, в Российской Федерации выстраивалась с учетом международных принципов и подходов к нормированию ЭМП.

Заключение. Впервые рассматривается определение и установление безопасных уровней напряженности электрической и магнитной составляющих по их энергии в низкочастотном диапазоне, что позволит при использовании данного принципа сохранить здоровье персоналу, работающему при эксплуатации электроустановок тягового электроснабжения.

В соответствии с теорией Д. Максвелла: электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности, оценивать вредное воздействие ЭП и МП раздельно для тяговых сетей электрических железных дорог неправомерно. Необходимо устранить пробел в правовых нормах, например, гармонизировать ПДУ электрических и магнитных полей до 1 кГц в России.

По приведенным уровням и зависимостям изменения энергетической нагрузки ЭМП от частоты можно оценивать аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на персонал суммированием энергетических воздействий ЭМП от токов различной частоты,

рода тока и продолжительности облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации. – Москва: Проспект, КноРус, 2014. – 224 с.
2. Бей Ю.М. и др. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986. 320 с.
3. Э.В. Тер-Оганов, А.А. Пышкин Электроснабжение железных дорог, Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 431с.
4. Кузнецов К.Б. Основы электробезопасности в электроустановках. ФГБУ ДПО Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 495 с.
5. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Транспорт, 1999. 464 с.
6. K.B. Kuznetsov, A.R. Zakirova, «Higher Harmonic Components of Rectifiers Magnetic Fields and their Adverse Health Effects». Procedia Engineering, vol. 129, 2015, pp. 415-419.
7. K.B. Kuznetsov, A.R. Zakirova, «Assessment of Harmful Health Effects of AC Rectifier Converters Harmonic Components». Procedia Engineering, vol. 129, 2015, pp. 420-426.
8. Закирова А.Р., Кузнецов К.Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания. Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4 (24). С. 82-89.
9. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов железнодорожного транспорта .УМК МПС, 2002. 638 с.
10. Y.I. Khohlov, D.V Gizzatullin., «Modeling of electromagnetic processes in a compensated rectifier with voltage feedback based on autonomous voltage inverter with PWM». Bulletin of the South Ural State University. Series: Energetics, 2008, vol 11 (111), p. 32-38.
11. Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. Транспорт, 1979. 264с.
12. Четвергов В.А., Маслов Г.П., Поздняков О.И., Шалимов М.Г., Отчет № 960 о научно-исследовательской работе:

Опытно-конструкторская разработка, исследование и эксплуатационное освоение двенадцатипульсовых выпрямителей тяговых подстанций, 1980. 149с.

13. Шалимов М.Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. Транспорт, 1990. 128с.

14. Адольф Й. Шваб. Электромагнитная совместимость, Энергоатомиздат, 1995. 480с.

15. Арриллага ДЖ, Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. Энергоатомиздат, 1990. 320с.

16. Трейвас М.Д., Высшие гармонические составляющие выпрямленного напряжения и их снижение на тяговых подстанциях постоянного тока. Транспорт, 1964. 100с.

17. Бадер М.П., Электромагнитная совместимость. Часть 3. Гармонический анализ влияющих токов и напряжений. Тр. МИИТ. 1999. 148с.

18. Косарев А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Интекс, 2008. 480 с.

19. Закирова, А.Р., Кузнецов, К.Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4 (24). С. 82-89.

20. Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. 760 с.

21. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». – Новосибирск: Издательство Норматика. 2017. 68 с.

22. Директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2013/35/ЕС от 26 июня 2013 г. «О минимальных требованиях безопасности для работников в отношении рисков, связанных с физическим воздействием (электромагнитные поля) (20-я отдельная Директива в значении Статьи 16(1) Директивы 89/391/ЕЭС), и об отмене Директивы 2004/40/ЕС» 2014. 33с.

23. Кацнельсон Б. А., Новиков С. М. // Гигиена и санитария. 1986. № 5. С. 59–62.

Статья поступила в редакцию 09.08.2020

Статья принята к публикации 14.09.2020