

УДК 621.31

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0031

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ЭМП  
НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ**

© Автор(ы) 2022

SPIN: 1279-3916

AuthorID: 730124

ORCID: 0000-0001-6399-8902

ScopusID: 57170233100

**ЗАКИРОВА Альфия Резавановна**, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Техносферная безопасность»

*Уральский государственный университет путей сообщения**(620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

**Аннотация.** Целью статьи является разработка вероятностного метода оценки воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1. Определить какие вредные производственные факторы воздействуют на электротехнический персонал. 2. Исследовать энергетические параметры ЭМП, воздействующие на персонал: среднесменную энергетическую нагрузку, дозу потенциальной энергии облучения и удельную суточную дозу поглощенной энергии ЭМП. 3. Построить модель событий вредного воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. В связи с отсутствием методов вероятностной оценки воздействия параметров электромагнитных полей (ЭМП) на персонал, в статье предложен метод логико-вероятностного моделирования, позволяющий оценить условную вероятность вредного воздействия на персонал: среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП. Для описания случайных процессов, связанных с воздействием на электротехнический персонал параметров ЭМП применен метод логико-вероятностного моделирования. Математическая сущность моделирования заключается в использовании функций алгебры логики для аналитической записи вредного воздействия параметров ЭМП на персонал и в разработке способов перехода от функций алгебры логики к вероятностным функциям, объективно отражающим степень вредного влияния. Используя имеющиеся данные, оценена условная вероятность возникновения заболеваний персонала от ЭМП. Определен возможный сценарий развития событий при воздействии на персонал параметров ЭМП: среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельной суточной дозы поглощенной энергии ЭМП. Логико-вероятностная модель позволила определить не только степень возможного появления на рабочих местах параметров ЭМП, но и условную вероятность их вредного воздействия на персонал, что ранее не осуществлялось. В статье представлено новое решение актуальной задачи охраны труда по разработке вероятностного метода оценки воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. Приведенная модель может использоваться при комплексной оценке системы управления охраной труда на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** электрическое поле, магнитное поле, вероятность, энергия ЭМП, вредный производственный фактор, логико-вероятностная модель.

**PROBABILISTIC METHOD FOR ASSESSING THE IMPACT OF EMF ENERGY  
FOR ELECTRICAL ENGINEERING PERSONNEL**

© The Author(s) 2022

**ZAKIROVA Alfiya Rezavanovna**, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department «Technospheric safety»

*Ural state university of railway transport**(620034, Yekaterinburg, Russia., Kolmogorova str., 66 e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

**Abstract.** The purpose of the article is to develop a probabilistic method for assessing the impact of EMF energy on electrical personnel. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: 1. Determine which harmful production factors affect electrical personnel. 2. To investigate the EMF energy parameters affecting personnel: the average shift energy load, the dose of potential irradiation energy and the specific daily dose of absorbed EMF energy. 3. To build a model of events of harmful effects of EMF energy on electrical personnel. Due to the lack of methods for probabilistic assessment of the impact of electromagnetic field parameters (EMF) on personnel, the article proposes a method of logical-probabilistic modeling that allows to estimate the conditional probability of harmful effects on personnel: the average energy load, the dose of potential irradiation energy and specific daily doses of absorbed EMF energy. The method of logical-probabilistic modeling is used to describe random processes associated with the impact of EMF parameters on electrical personnel. The mathematical essence of modeling is the use of logic algebra functions to analytically record the harmful effects of EMF parameters on personnel and to develop ways to transition from logic algebra functions to probabilistic functions that objectively reflect the degree of harmful influence. Using the available data, the conditional probability of the occurrence of staff diseases from EMF is estimated. A possible scenario for the

**Keywords:** electric field, magnetic field, probability, EMF energy, harmful production factor, logical-probabilistic model.

**Введение.** Для электротехнического персонала, обслуживающего электроподвижной состав, вредными факторами производственной среды являются: освещенность, микроклимат, шум, электромагнитные поля (ЭМП) [1-4]. Исследование профессиональных рисков [5-12] и вероятности вредного воздействия на персонал производственных факторов – в настоящее время актуально. В законодательстве охраны труда произошли большие изменения, теперь в системе управления охраной труда работодателям необходимо использовать риск-ориентированный подход [13-16]. Актуальность тематики исследования по оценке рисков на железнодорожном транспорте также подтверждается публикациями [17–18], а исследование вероятности вредного воздействия [19-20].

ятностного моделирования (ЛВМ): среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП. Эти параметры существенно изменяются в зависимости от:

- величины тока (частоты, переменного) и напряжения электроустановок;
- индивидуальных параметров человека (масса и площадь тела человека);
- эффективности используемых организационно-технических средств, при превышении предельно безопасных уровней (ПБУ) среднесменной энергетической нагрузки ЭМП.

На рисунке 1 приведена ЛВМ, из элементов, соответствующих событиям  $(X_i, -X_{i+1})$ .

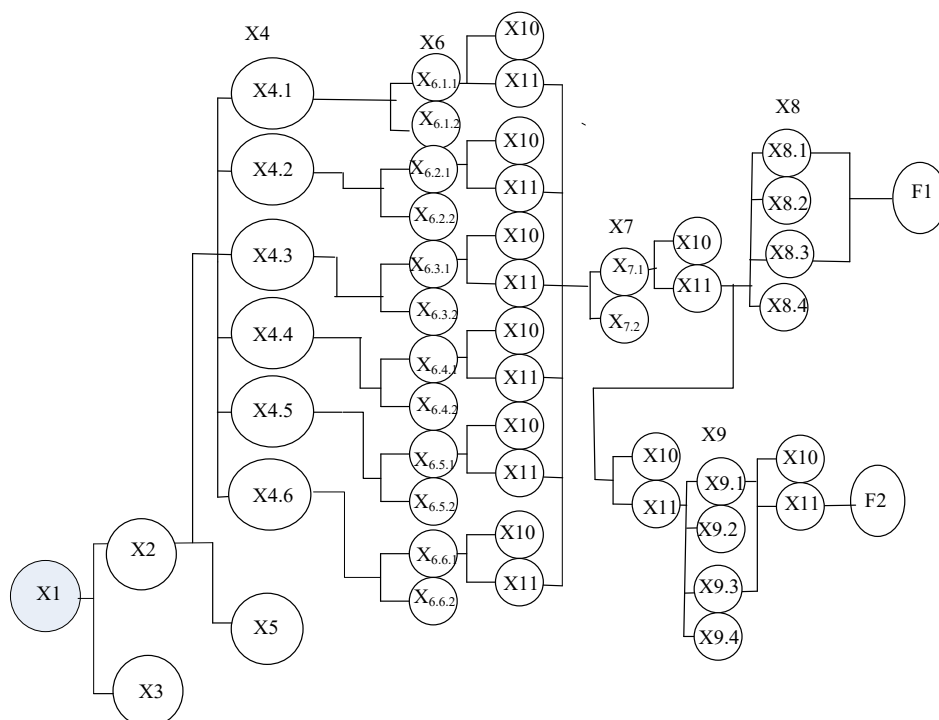


Рисунок 1 – Логико-вероятностная модель оценки неблагоприятного воздействия параметров ЭМП на электротехнический персонал

Рассматриваемая техническая система включает способы, устройства, приспособления, предохраняющие персонал от вредных производственных факторов – элементы защиты. На рисунке 1 представлены: верхние и нижние ветви дерева событий, соответствующие  $X_3; X_5; X_{6.1.2}; X_{6.2.2}; X_{6.3.2}; X_{6.4.2}; X_{6.5.2}; X_{6.6.2}; X_{7.2}; X_{8.2}; X_{8.4}; X_{9.2}; X_{9.4}; X_{10}$  и  $(X_2; X_4; X_{6.1.1}; X_{6.2.1}; X_{6.3.1}; X_{6.4.1}; X_{6.5.1}; X_{6.6.1}; X_{7.1}; X_{8.1}; X_{8.3}; X_{9.1}; X_{9.3}; X_{11})$ .

Ветви дерева событий отражают возможное развитие событий, связанных с воздействием на персонал энергетических параметров ЭМП.

ЛВМ содержит:

– продолжительность экспозиции параметров ЭМП;

– расстояние от источника ЭМП до электротехнического персонала, обслуживающего ЭПС,

Несовместные события –  $X_2$  и  $X_3$ ;  $X_4$  и  $X_5$ ;  $X_{10}$  и  $X_{11}$ , так как появление одного из них исключает появление другого, а  $X_4$ ,  $X_6$  и  $X_7$  – эквивалентные.

В таблице 1 приведены элементы ЛВМ условной вероятности вредного воздействия на персонал, находящегося в кабине электроподвижного состава.

Таблица 1 – Элементы логико-вероятностной модели

Группа событий	Обозначение событий	Содержание
События, связанные с эксплуатацией электроустановок	$X_1$	Эксплуатация и обслуживание оборудования, расположенного на ЭПС:
	$X_2, X_3$	работа электрооборудования на переменном токе свыше 50 А до 50 А.
	$X_4 (X_{4.1} \dots X_{4.6})$	Наличие в токе спектра высших гармонических составляющих.
	$X_5$	ЭУ работает на постоянном токе.
События, связанные с воздействием на персонал параметров ЭМП	$X_6$	Воздействие на персонал $\mathcal{E}(f)$ :
	$X_{6.1.1} \dots X_{6.6.2}$	наблюдается превышение ПБУ или не наблюдается.
	$X_7$	Влияние на персонал $\Sigma \mathcal{E}(f)$ :
	$X_{7.1} - X_{7.2}$	наблюдается превышение ПБУ или не наблюдается.
	$X_8$	Персонал подвергается воздействию $D_{co}(f)$ :
	$X_{8.1} - X_{8.2}$	уровни $D_{co}(f)$ превышают ПБУ ( $S$ до 1,73 м <sup>2</sup> ) или не превышают.
	$X_{8.3} - X_{8.4}$	уровни $D_{co}(f)$ превышают ПБУ ( $S$ более 1,73 м <sup>2</sup> ) или не превышают.
	$X_9$	На персонал воздействуют $D_{cp}(f)$ :
	$X_{9.1} - X_{9.2}$	уровни $D_{cp}(f)$ превышают ПБУ ( $m$ до 70 кг) или не превышают.
	$X_{9.3} - X_{9.4}$	уровни $D_{cp}(f)$ превышают ПБУ (при $m$ свыше 70 кг) или не превышают.
	$X_{10}, X_{11}$	Использование электротехническим персоналом устройств для оценки и контроля энергетических параметров ЭМП или неиспользование.
Конечное событие	$F_1, F_2$	Вредное влияние энергетических параметров ЭМП на электротехнический персонал, обслуживающий ЭПС.

\*  $\mathcal{E}(f)$  – энергетическая нагрузка ЭМП со спектром высших гармонических составляющих,  $\Sigma \mathcal{E}(f)$  – аддитивная (суммарная) энергетическая нагрузка,  $D_{co}(f)$  – дозы потенциальной энергии облучения,  $D_{cp}(f)$  – удельные суточные дозы поглощенной энергии ЭМП.

**Результаты.** Соответственно, условная вероятность вредного воздействия на персонал дозы потенциальной энергии облучения ЭМП определяется:

$$P(F_{1.1}) = P_{x1} \vee p_2 \vee (p_{4.1} \wedge p_{4.2} \wedge p_{4.3} \wedge p_{4.4} \wedge p_{4.5} \wedge p_{4.6}) \vee (p_{6.1.1} \wedge p_{6.2.1} \wedge p_{6.3.1} \wedge p_{6.4.1} \wedge p_{6.5.1} \wedge p_{6.6.1}) \wedge p_{11} \vee (p_{7.1} \wedge p_{11}) \vee (p_{9.1} \wedge p_{11}) \quad (1)$$

Условная вероятность вредного влияния на персонал удельных суточных доз поглощенной энергии:

$$P(F_{2.1}) = P_{x1} \vee p_2 \vee (p_{4.1} \wedge p_{4.2} \wedge p_{4.3} \wedge p_{4.4} \wedge p_{4.5} \wedge p_{4.6}) \vee (p_{6.1.1} \wedge p_{6.2.1} \wedge p_{6.3.1} \wedge p_{6.4.1} \wedge p_{6.5.1} \wedge p_{6.6.1}) \wedge p_{11} \vee (p_{7.1} \wedge p_{11}) \vee (p_{9.1} \wedge p_{11}) \quad (2)$$

или

$$P(F_{2.2}) = P_{x1} \cdot (1 - (1 - p_2)) + (1 - [1 - (1 - p_{4.1} \cdot p_{4.2} \cdot p_{4.3} \cdot p_{4.4} \cdot p_{4.5} \cdot p_{4.6}) + (1 - (1 - p_{6.1.1} \cdot p_{6.2.1} \cdot p_{6.3.1} \cdot p_{6.4.1} \cdot p_{6.5.1} \cdot p_{6.6.1}) \cdot p_{11})] + 1 - [1 - (1 - p_{7.1} \cdot p_{11}) + (1 - (1 - p_{9.1} \cdot p_{11}))]$$

При превышении ПБУ параметров ЭМП у персонала возникает условная вероятность заболевания  $P(F_{1.1})$  и  $P(F_{2.2})$ , которая зависит как от специфики работы электротехнического персонала, так и его индивидуальных физиологических параметров. Проанализировав карты специальной оценки условий труда по фактору «неионизирующие электромагнитные поля», для которого в России установлены четыре класса условий труда: с класса 2 (допустимый) до 3.3 (вредный), можно определить есть превышение ПДУ (предельно допустимых уровней) или нет. А как определить условные вероятности:  $p_6$ ,  $p_8$  и  $p_9$

– не известно, поэтому были проведены экспериментальные исследования на биологических объектах. На специально разработанной экспериментальной установке (получен патент, авторы: д.т.н., профессор Кузнецов К.Б., к.т.н., доцент Закирова А.Р.) создавались необходимые уровни энергетической нагрузки ЭМП. Биологами ИнГУ в том числе, д.б.н., профессором Плиевой А.М., наблюдались изменения роста стволовых клеток биологических объектов. Проведя анализ полученных результатов, д.т.н., профессором Кузнецовым К.Б., к.т.н., доцентом Закировой А.Р. с помощью математического аппарата теории нечетких

множеств определены численные значения условной вероятности возникновения заболеваний у персонала от вредного действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП:

$$P(x) = a + b \ln(D_{\text{co}} t),$$

$$P(x_g) = 0,12 + 0,23 \ln(D_{\text{co}} t), \quad (3)$$

где  $D_{\text{co}}$  – уровни дозы потенциальной энергии облучения ЭМП, ВА·ч;  $t$  – длительность экспозиции, ч;  $a, b$  – коэффициенты в уравнении, равные 0,12 и 0,23.

В соответствии с (3) условная вероятность заболевших людей (персонала) от действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП (198 кВА·ч) в зависимости от длительности экспозиции составляет за 1 сутки – 1,9%, месяц – 18%, год – 36% или с применением метода линейной интерполяции 0,02; 0,18 и 0,36..

Условная вероятность ухудшения состояния здоровья персонала от вредного влияния удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП описывается уравнением:

$$P(x_g) = 0,30 + 0,35 \ln(D_{\text{ст}} t), \quad (4)$$

где  $D_{\text{ст}}$  – уровни удельных суточных доз поглощенной энергии, ВА·ч;  $t$  – длительность экспозиции, ч;  $a, b$  – коэффициенты в уравнении, равные 0,3 и 0,35.

При действии на человека удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП в 2,83 кВА·ч/кг условная вероятность за сутки составит 2,5%, месяц – 45%, год – 77% или соответственно 0,03; 0,45 и 0,77.

Внедрение организационно-технических мероприятий будет способствовать снижению параметров ЭМП до допустимого уровня.

**Обсуждение.** В 2021 г. вступили в силу новые правила по охране труда, которые заменили более сотни действовавших ранее нормативных документов. Появились обязанности у работодателей по расчету профессиональных рисков с выявлением опасностей и их контролем. Многие ученые в настоящее время занимаются решением проблем, связанных с разработкой новых методов и методик оценки рисков, вероятности возникновения заболеваемости персонала от вредных производственных факторов. Результаты полученных исследований способствуют развитию методологии определения вероятности возникновения заболеваемости электротехнического персонала от воздействия электромагнитных полей.

Проведенные исследования показали необходимость оценивать на рабочих местах электротехнического персонала, не только электрическую и магнитную составляющую ЭМП, а так же энергетическую нагрузку ЭМП, что согласуется с результатами исследований Шимони К., руководителя кафедры теоретической электротехники Будапештского технического университета, основанных на корректном применении методов математического моделирования в теории электромагнитных полей. Необходимость оценки дозы потенциальной энергии облучения ЭМП и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП подтверждается работами д.т.н., профессора Кузнецова К.Б. (УрГУПС).

Используя ЛВМ можно определить условную вероятность вредного действия параметров ЭМП, при необходимости ее снизить, своевременно разработав организационно-технические мероприятия, и тем самым предупредить профессиональную заболеваемость электротехнического персонала.

**Заключение.** Исследование показало, что имеется логарифмическая зависимость условной вероятности возникновения заболеваемости персонала от энергетических параметров ЭМП.

Определено, что условная вероятность заболеваемости персонала от действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП (198 кВА·ч) в зависимости от длительности экспозиции изменяется от 1,9% (сутки) до 36% (год), а при действии удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП в 2,83 кВА·ч/кг составит 2,5% за сутки и 77% – год.

Впервые разработана логико-вероятностная модель, позволяющая оценивать энергетические параметры ЭМП относительно электротехнического персонала. Решение модели показало, что оценка условной вероятности вредного воздействия на персонал параметров ЭМП может быть описана с применением теории нечетких множеств.

Модель может использоваться в компании ОАО «РЖД» при проведении комплексной оценке системы управления охраной труда на железнодорожном транспорте. С целью предупреждения профессиональных заболеваний электротехнического персонала необходимы дальнейшие исследования вероятности вредного влияния параметров ЭМП при нахождении его в машинном отделении электроподвижного состава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. Екатеринбург: УрГУПС. 2017. – 188 с.
2. Закирова А.Р. Концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 87-93.
3. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на электротехнический персонал // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 27-31.
4. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field. / 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. electronic edition. 2017. – pp. 8076222.
5. Маркеленкова Н.А.. Оценка профессиональных рисков неионизирующего излучения на пониженных подстанциях. / Новые горизонты. VIII научно-практическая конференция с международным участием. Брянск. – 2021. – С. 998-1002.
6. О.Ю. Устинова, Н.В. Зайцева, Е.М. Власова, В.Г. Костарев Корпоративные программы профилактики нарушения здоровья вредных предприятий как инструмент управления профессиональным риском // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 2. – С. 72-82.
7. Титова Е.Я., Голубь С.А. Современные проблемы охраны здоровья сотрудников крупного промышленного предприятия, работающих в условиях профессиональных вредностей // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 4. – С. 83-90.
8. Пазуха А.А. Анализ профессиональных рисков при обслуживании и ремонте устройств контактной сети // Наука



и техника транспорта. – 2020. – № 4. – С. 85-93.

9. Самчук-Хабарова Н.Я., Гапонов В.Л., Дудник В.В., Кузнецов Д.М. Аспекты совершенствования этапов управления рисками. // Качество и жизнь. – 2020. – № 2 (26). – С. 14-18.

10. А.В. Федосов, Н.Х. Абдрахманов, А.С. Гусева, Р.Р. Ахметьянов. Возможность применения результатов неразрушающего контроля для оценки профессиональных рисков в системе управления охраной труда// Безопасность техногенных и при-родных систем 2022. – № 1. – С. 4-8.

11. Стрилевская М.А. Анализ системы управле-ния охраны труда (СУОТ) на транспорте / Современ-ное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. – 2016. – С. 403-408.

12. Макаров П. В. Профессиональные риски / Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 144 с.

13. Nikulin A., Nikulina A.Y. 2017. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. Ecology, Environment and Conservation, 23(1). – pp. 351-355.

14. Sabrina Letícia Couto da Silvaa. Critical factors of success and barriers to the implementation of occupational health and safety management systems: A systematic review of literature/Sabrina Letícia Couto da Silvaa, Fernando Gonçalves Amarala. Safety Science. 2019, volume 117. – pp. 123-132.

15. Shalimova A.V., Filin A.E., Davydenko A.A. Analysis of evaluation results of occupational health, industrial and environmental safety management systems at enterprises of mining and smelting complex. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. – 2020. – 1. – pp. 100-105.

16. Korshunov G.I., Rudakov M.L., Kabanov E.I. The use of a risk-based approach in safety issues of coal mines / Journal of Environmental Management and Tourism, 9(1), 2018. – pp. 181-186.

17. Gintautas Bureika, Eduardas Gaidamauskas, Jonas Kupinas, Marijonas Bogdevicius, Stasys Steišūnas. Modelling the Assessment of Traffic Risk at Level Crossings of Lithuanian Railways. Transport. 2017. Vol. 32(3). Vilnius Gediminas Technical University. – pp. 282-290

18. Bohus Leitner. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology. ScienceDirect. Procedia Engineering 187. 2017. pp. 150-159

19. Yan Fang, M.A.K. Rasel, Peyton C. Richmond. Consequence risk analysis using operating procedure event trees and dynamic simulation. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 67. September 2020. – pp 104235.

20. Cesar Qeral, Kevin Fernández-Cosials,. Jose Posada. Application of Expanded. Reliability Engineering & System Safety. Volume 205. January 2021. – pp. 107246.

*Статья поступила в редакцию 27.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*