

*И.С. Украинская<sup>1</sup>, О.В. Номоконова<sup>2</sup>, А.И. Сидоров<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, <sup>2</sup>Забайкальский институт потребительской кооперации Сибирского университета потребительской кооперации; e-mail: ukrainskaya@yandex.ru)

## **О ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА ОПАСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ**

*Предлагается использовать метод логико-вероятностного моделирования для оценки вероятности причинения вреда здоровью работника в зоне воздействия опасного техногенного фактора (на примере электрического поля промышленной частоты).*

*Ключевые слова: метод логико-вероятностного моделирования, вероятность события, электрическое поле промышленной частоты.*

*I.S. Ukrainskaya, O.V. Nomokonova, A.I. Sidorov*

## **ABOUT LOGICAL-PROBABILISTIC MODELING TO ESTIMATE THE PROBABILITY OF HARMFUL EFFECTS ON HUMANS OF DANGEROUS MAN-MADE FACTORS**

*Proposed to use the method of logical-probabilistic modeling to estimate the probability of injury to a worker's health in the territory of exposure to dangerous man-made factors (the example electric field of industrial frequency).*

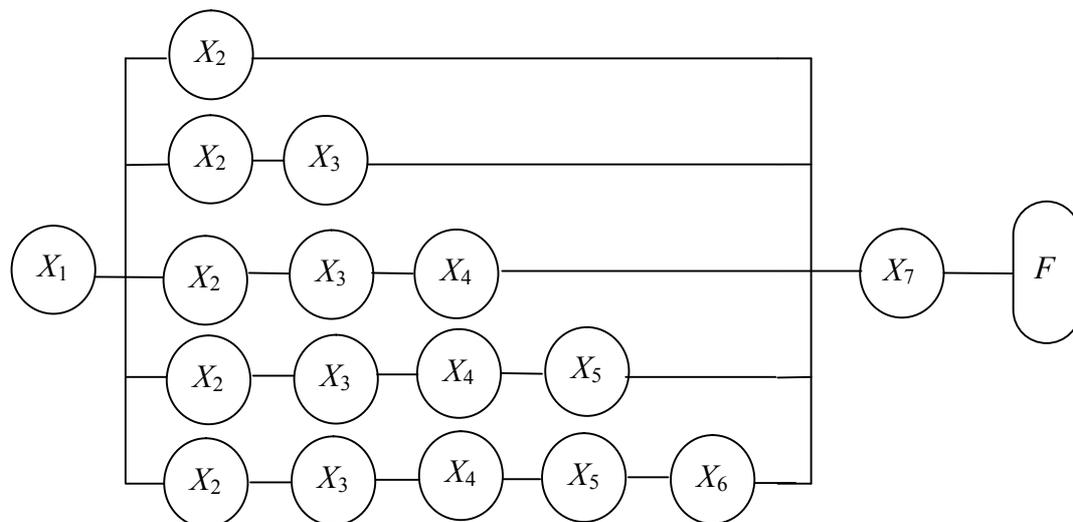
*Key words: method of logical-probabilistic modeling, events probability, electric field of industrial frequency.*

Для описания случайных процессов, связанных с воздействием на человека опасных техногенных или вредных факторов или оценкой эффективности средств и способов защиты от этих факторов, широкое применение нашел метод *логико-вероятностного моделирования (ЛВМ)* [1-5]. Математическая сущность ЛВМ заключается в использовании функций алгебры логики для аналитической записи условий возникновения опасной ситуации и в разработке строгих способов перехода от функций алгебры логики к вероятностным функциям, объективно отражающим степень опасности [6].

Однако, логико-вероятностный метод моделирования опасных событий имеет существенный недостаток, обусловленный трудностями определения конкретных вероятностей этих событий, особенно связанных с ошибочными действиями человека или сознательными нарушениями требований безопасности. Решить эту проблему можно с помощью приложения к методу аппарата теории нечётких множеств, заполняющего пробел там, где нельзя корректно применять статистические методы и теорию вероятностей. *Теория нечётких множеств (ТНМ)* получила своё развитие в работах [7-12].

Ниже рассмотрена основа метода оценки вероятности нахождения работника в опасных зонах на примере дежурного персонала подстанции сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше). Для персонала таких подстанций одним из опасных факторов является электрическое поле промышленной частоты.

На рис. 1 приведена схема возможных опасных событий, учитываемых в логико-вероятностной модели для оценки вероятностей вредного воздействия электрического поля на работника, обслуживающего *электроустановки (ЭУ) сверхвысокого напряжения (СВН)*, а в табл. 1 содержание этих событий.



**Рис. 1.** Схема событий, учитываемых в логико-вероятностной модели для оценки вероятностей вредного воздействия электрического поля на работника, обслуживающего электроустановки сверхвысокого напряжения

Таблица 1

**Опасные события – элементы логико-вероятностной модели причинения вреда здоровью персонала, обслуживающего ЭУ СВН**

Группа событий	Обозначение события	Содержание события
Событие, связанное с организацией работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования	$X_1$	Выполнение работ на территории ОРУ или вблизи высоковольтных линий электропередачи
События, отражающие нахождение персонала в зонах различной напряжённости электрического поля	$X_2$	Причинение вреда здоровью работника в зоне с напряжённостью электрического поля промышленной частоты 5-10 кВ/м
	$X_3$	Причинение вреда здоровью работника в зоне с напряжённостью электрического поля промышленной частоты 10-15 кВ/м
	$X_4$	Причинение вреда здоровью работника в зоне с напряжённостью электрического поля промышленной частоты 15-20 кВ/м
	$X_5$	Причинение вреда здоровью работника в зоне с напряжённостью электрического поля промышленной частоты 20-25 кВ/м
	$X_6$	Причинение вреда здоровью работника в зоне с напряжённостью электрического поля промышленной частоты выше 25 кВ/м
События, связанные с действиями человека	$X_7$	Нахождение вблизи электроустановки сверхвысокого напряжения без средств индивидуальной защиты (экранирующих комплектов)
Конечное событие	$F$	Причинение вреда здоровью работника при воздействии электрического поля

На открытых распределительных устройствах подстанции дежурный персонал проводит осмотры оборудования и сооружений. Осмотры бывают двух видов: регулярные и внеочередные. Регулярные осмотры проводятся на объектах с постоянным дежурством персонала – не реже 1 раза в сутки, а также дополнительно не реже 1 раза в месяц в темное время суток для выявления разрядов, коронирования. Внеочередные осмотры проводятся после непредвиденного отключения оборудования, при неблагоприятной погоде (сильный туман, мокрый снег, гололед и т. п.) или усиленном загрязнении на ОРУ, а также после отключения оборудования при коротком замыкании.

Продолжительность одного осмотра открытых распределительных устройств подстанции напряжением 500 кВ составляет не менее 30-45 мин. Учёт продолжительности проведения оперативных переключений, подготовки рабочих мест для ремонтного персонала, допуска бригад к работе на территории ОРУ, наблюдения за работой бригады в тех случаях, когда оно необходимо, позволит увеличить время осмотра ориентировочно до 1,0-1,5 часов. Оперативный персонал работает сменами по 12 часов около 170 смен в среднем за год, что составляет около 170-255 часов продолжительности работ непосредственно на ОРУ в год. Общий среднегодовой баланс рабочего времени составляет около 2000 часов. Таким образом, максимальная вероятность нахождения на ОРУ представителей дежурного персонала составляет 0,13.

Наиболее сложно определить вероятность событий, связанную с действиями человека, в частности, вероятность нахождения вблизи электроустановки сверхвысокого напряжения без средств индивидуальной защиты (экранирующих комплектов). Все работники предприятий электрических сетей, выполняющие работы в зоне влияния электрического поля, в обязательном порядке обеспечиваются экранирующими комплектами для защиты от электрического поля. К сожалению, поскольку действие электрического поля на организм человека не вызывает болевых ощущений и не приводит к ощущаемым сразу негативным последствиям, персонал довольно часто пренебрегает использованием экранирующих комплектов. На основании наблюдений за работой дежурного персонала, частоту использования экранирующих комплектов можно оценить как 10-20 %, а вероятность события  $X_7$  – как 0,8-0,9. Примем для дальнейших расчётов вероятность события  $X_7$  равной 0,85.

Вероятности событий  $X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$  могут быть определены по результатам анализа карт распределения напряжённости электрического поля на территории ОРУ (табл. 2).

Если считать, что при своём перемещении по территории ОРУ работник случайным образом попадает в зоны различной напряжённости, тогда:

$$P_i = \frac{S_{E_j \div E_{j+5}}}{S_{ОРУ}} R(\Delta t), \quad i \in \{2, 3, 4, 5, 6\}, \quad j \in \{0, 5, 10, 15, 20, 25\},$$

где  $S_{E_j \div E_{j+5}}$  – площадь зоны напряжённостью от  $E_j$  до  $E_{j+5}$ ;

$S_{ОРУ}$  – площадь открытого распределительного устройства;

$R(\Delta t)$  – коэффициент, учитывающий степень вредного воздействия электрического поля промышленной частоты в зоне напряжённостью от  $E_j$  до  $E_{j+5}$ .

**Распределение напряжённости электрического поля на территории  
открытого распределительного устройства – 500 кВ**

Наименование подстанции	Доля территории ОРУ, %, где напряжённость электрического поля лежит в диапазоне					
	менее 5 кВ/м	$5 \leq E < 10$	$10 \leq E < 15$	$15 \leq E < 20$	$20 \leq E < 25$	$25 \leq E < 30$
Магистральная	49,78	22,74	22,91	4,19	0,31	0,07
Козырево	55,04	34,23	8,82	1,91	0	0
Тагил	57,34	25,54	12,8	3,99	0,34	0
Кропачево	58,16	25,17	10,98	4,46	1,24	0
Пыть-Ях	59,98	19,78	16,28	3,78	0,13	0,04
Калино	60,52	28,24	9,43	1,77	0,04	0
Сомкино	67,03	11,73	18,27	2,97	0	0
Удмуртская	71,41	15,35	10,28	2,86	0,1	0
Смеловская	72,19	15,73	8,33	3,3	0,44	0,01
Сибирская	73,5	22,04	4,39	0,07	0	0
Приваловская	75,43	22,96	1,56	0,05	0	0
Курган	75,81	23,8	0,38	0,01	0	0
Южная	76,28	18,72	3,75	1,24	0,02	0
Челябинская	77,22	18,49	3,67	0,6	0,02	0
Трачуковская	77,32	18,43	3,75	0,44	0,06	0
Шагол	78,02	8,54	9,11	3,8	0,54	0
Луговая	78,33	14,61	6,4	0,64	0,02	0
Златоуст	80,12	14,24	5,45	0,19	0,002	0
Ильково	80,41	14,22	4,12	0,51	0,73	0
Кустовая	81,38	12,23	5,56	0,7	0,11	0,03
Белозерная	81,56	15,92	2,36	0,16	0	0
Магнитогорская	81,75	15	2,92	0,32	0,01	0
БАЗ	82,19	9,56	5,27	2,23	0,71	0,04
Вятка	82,45	14,09	2,9	0,52	0,04	0
Северная	86,18	11,29	2,24	0,29	0	0
<b>Средние значения</b>	72,78	18,11	7,28	1,64	0,19	0,01

Для всех подстанций, данные по которым приведены в табл. 2, площади зон различной напряжённости электрического поля различны. Их величина варьируется в зависимости от большого числа различных факторов, возникающих как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации распределительного устройства. Учесть влияние всех факторов не представляется возможным, поэтому примем гипотезу о том, что площадь зоны определённой напряжённости электрического поля является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения.

Степень вредного воздействия электрического поля промышленной частоты на организм человека учтена в формуле для определения предельно допустимого времени нахождения человека в зоне действия электрического поля напряжённостью  $[E_i, E_{i+5}]$  с экспоненциальным распределением, которое описывается функцией

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где параметр  $\lambda$  обратно пропорционален средней напряжённости электрического поля в зоне от  $E_i$  до  $E_{i+5}$ .

Исходя из допущения о равномерном распределении напряжённости в зоне  $[E_i, E_{i+5}]$ , получим

$$\bar{E}_i = \frac{E_i + E_{i+5}}{2},$$

откуда

$$\lambda = \frac{2}{E_i + E_{i+5}}.$$

Вероятность того, что время безопасной работы в зоне  $[E_i; E_{i+5}]$  не превышает максимально допустимого значения, определяется равенством  $P(T < t_{\text{доп}}) = F(t)$ , где

$$F(t) = \int_0^{t_{\text{доп}}} \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t_{\text{доп}}}.$$

Следовательно, вероятность возникновения опасной ситуации из-за превышения допустимого времени работы в зоне  $[E_i; E_{i+5}]$  равна

$$P(T > t_{\text{доп}}) = 1 - P(T < t_{\text{доп}}) = e^{-\lambda t_{\text{доп}}}.$$

При исследовании влияния других опасных факторов на здоровье персонала использование логико-вероятностного моделирования позволит достаточно просто оценить вероятность возникновения того или иного опасного события.

#### Литература

1. **Сидоров А.И.** Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. Челябинск: ЧГТУ, 1993. 444 с.
2. **Окраинская И.С.** Организационно-системные методы повышения уровня электробезопасности на открытых горных работах: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Челябинск, 1997. 152 с.
3. **Шаврина Н.А.** Электромагнитная обстановка вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Челябинск, 2007. 128 с.
4. **Номоконова О.В.** Применение нечётких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Челябинск, 2003. 100 с.
5. **Скуртова И.В.** Повышение безопасности и безвредности при ведении работ по техническому обслуживанию линий электропередачи сверхвысокого напряжения: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Челябинск, 2008. 100 с.
6. **Рябинин А.И., Черкесов Г.Н.** Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
7. **Кофман А.** Введение в теорию нечётких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
8. **Нечёткие** множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Пospelова Д.А. М.: Наука, 1986. 312 с.
9. **Орловский С.А.** Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. 208 с.
10. **Гвоздик, А.А.** Решение нечетких уравнений // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1984. № 5. С. 176–183.
11. **Аверкин А.Н.** Нечёткие числа в системах искусственного интеллекта и управления. Тверь: СНИИ, 1991. 11 с.
12. **Лукас В.А.** Основы фазы-управления: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. 62 с.