

ВЛИЯНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА 500 КВ НА УСЛОВИЯ ТРУДА ПО ФАКТОРУ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

И.С. Окраинская, А.И. Сидоров*, А.Б. Тряпицын*, Г.А. Круглов***

**г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

***г. Челябинск, Челябинская государственная агроинженерная академия*

EFFECT OF AN OPEN DISTRIBUTION SYSTEM 500 KW RECONSTRUCTION ON WORKING CONDITIONS BY ELECTRIC FIELD STRENGTH FACTOR

I.S. Okrainskaya A.I. Sidorov*, A.B. Tryapitsyn*, G.A. Kruglov***

**Chelyabinsk, South Ural State University*

***Chelyabinsk State Agronomical Engineering Academy*

Анализируется влияние реконструкции на распределение напряженности электрического поля на открытом распределительном устройстве 500 кВ.

Ключевые слова: электрическое поле, открытое распределительное устройство 500 кВ, обслуживающий персонал.

The impact of reconstruction on the distribution of electric field strength in the open distribution system 500 kW is analyzed in the article.

Keywords: electric field, open distribution system 500 kW, staff.

Персонал, обслуживающий электроустановки сверхвысокого напряжения, подвергается воздействию низкочастотного (50 Гц) электромагнитного поля. Величина электрической составляющей поля зачастую превышает предельно допустимый уровень, даже если при его определении учитывалось время воздействия поля на работника. Магнитная же составляющая этого поля, создаваемая оборудованием подстанций 500 кВ, как правило, не превышает предельно допустимый уровень для 8-часового профессионального воздействия [1–3].

Для проведения исследований распределения напряженности электрического поля на открытом распределительном устройстве (ОРУ) авторами была разработана оригинальная методика [1].

При помощи этой методики дважды были проведены измерения напряженности электрического поля на открытом распределительном устройстве 500 кВ одной из подстанций до и после ее реконструкции.

Результаты измерения напряженности электрического поля на подстанции до и после реконструкции представлены на рис. 1, 2. Карты распределения напряженности совмещены с планом размещения оборудования. Условные обозначения оборудования: НДЕ – емкостный трансформатор напряжения; ОПН – ограничители перенапряжения нелинейные; ТН – трансформатор напряже-

ния; ВЗ – высокочастотный заградитель; Р – разъединитель; И – шинная опора; ТТ – трансформатор тока; В – выключатель; РР – разрядник.

Максимальное среди всех зафиксированных значений напряженности электрического поля до реконструкции составляло 28 кВ/м и было отмечено около шинных опор ячейки ВЛ 500 кВ (рис. 1), а после реконструкции составляет около 29 кВ/м и было отмечено также между шинными опорами новой ячейки линии 500 кВ (рис. 2).

Столь высокий уровень напряженности электрического поля после реконструкции обусловлен наличием локального повышения уровня опорной поверхности в месте перехода насыпи дороги через кабельный канал.

Для оценки степени опасного влияния на персонал, обслуживающий оборудование открытого распределительного устройства, интерес представляет величина зон, в которых напряженность электрического поля лежит в диапазоне от E_j до E_{j+5} ; $j \in \{0, 5, 10, 15, 20, 25\}$.

В табл. 1 приведены полученные на основе экспериментальных данных размеры зон различной напряженности электрического поля до и после реконструкции открытого распределительного устройства 500 кВ этой подстанции.

Согласно данным табл. 1 площадь зоны, в которой напряженность электрического поля не пре-

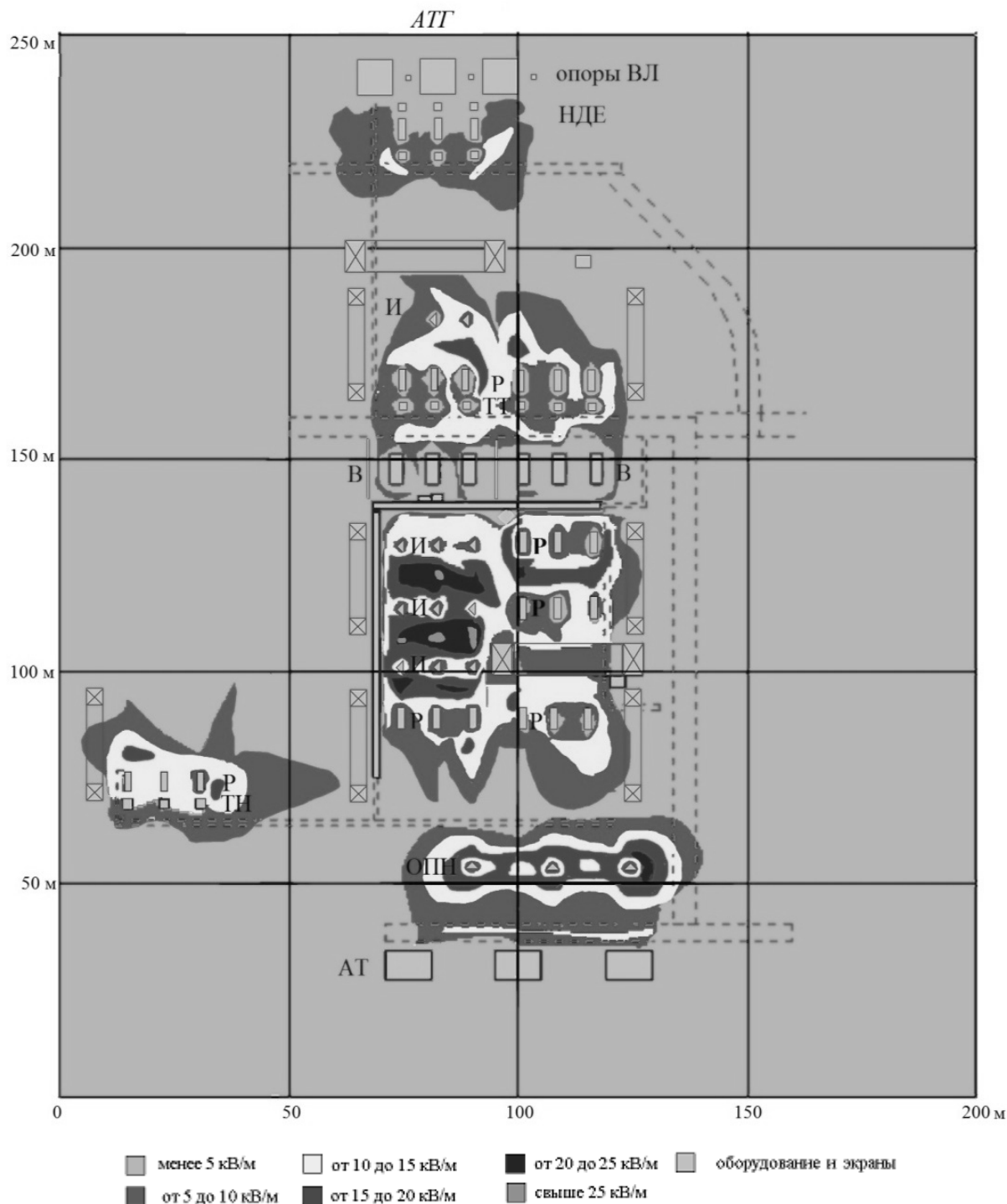


Рис. 1. Карта распределения напряженности электрического поля
на открытом распределительном устройстве 500 кВ до реконструкции

вышает 5 кВ/м и соответственно не ограничивается время нахождения персонала, до реконструкции составляла 82,19 %, а после реконструкции сократилась до 75,67 % от общей территории открытого распределительного устройства, несмотря на ее увеличение.

Площадь зоны, в которой напряженность выше 5 кВ/м, до реконструкции составляла 17,81 %, а после реконструкции – 24,33 %, что приближается

к среднему по предприятию значению – 27,1 %. Величина зоны, в которой напряженность электрического поля превышает 15 кВ/м, до реконструкции составляла менее 3 % (2,98 %), после реконструкции увеличилась и превысила 4 % (4,38 %).

Приведенные нами результаты позволяют предположить, что на стадии проектирования требования, изложенные в руководящих указаниях

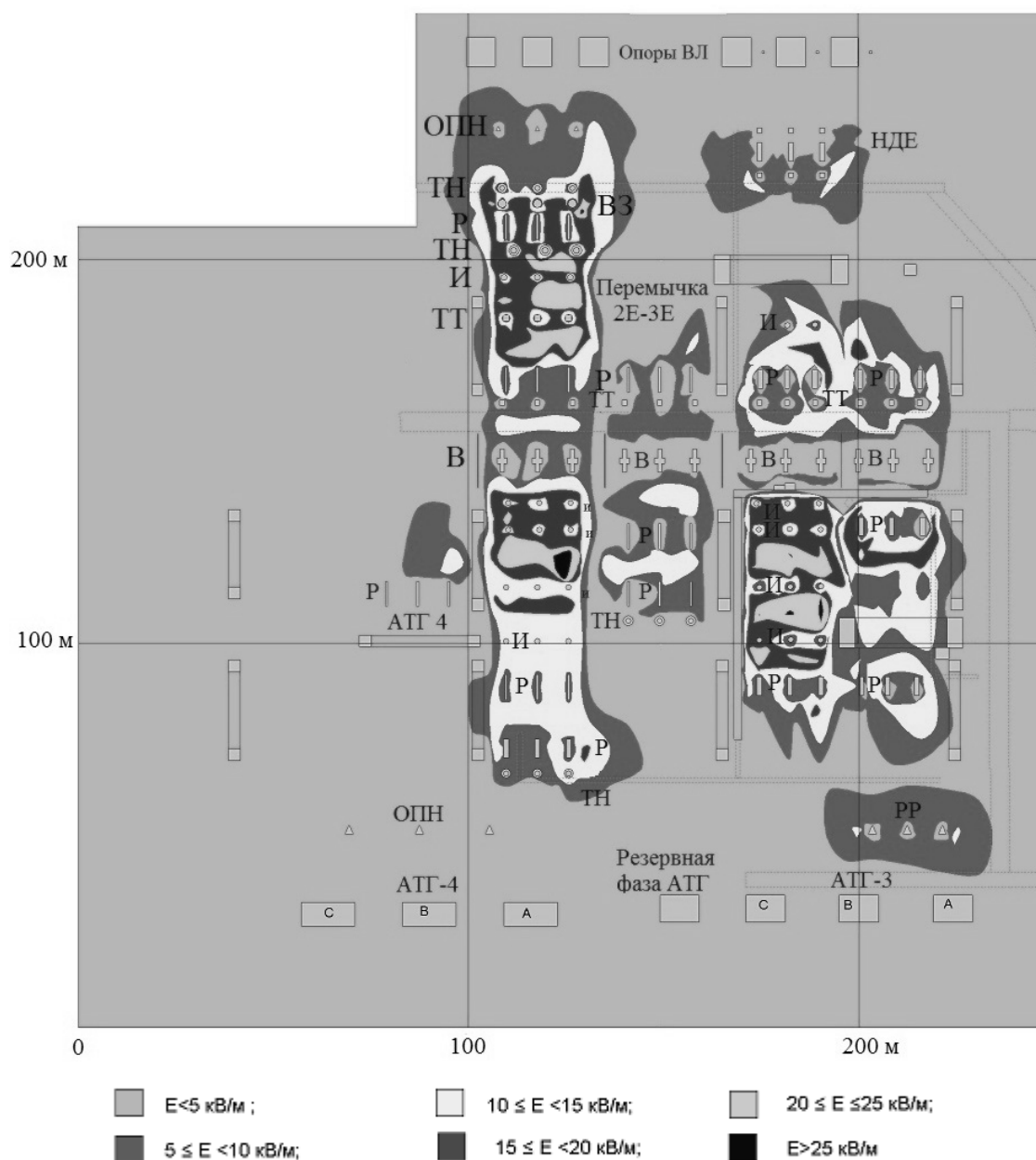


Рис. 2. Карта распределения напряженности электрического поля на открытом распределительном устройстве 500 кВ после реконструкции

[4], не выполняются в полном объеме, в частности п. 2.8, в котором указывается: «Напряженность электрического поля, а также границы зоны влияния и зоны экранирования определяются:

– при проектировании – по результатам измерений в электроустановках с аналогичными конструктивно-компоновочными решениями, а в случае отсутствия аналогов – по результатам расчета, которые должны быть проверены экспериментально в условиях эксплуатации».

Следует отметить, что получить результаты расчетным путем, которые были бы достаточно близки к значениям напряженности электрического поля, полученным экспериментально, весьма

затруднительно. Объясняется это тем, что ограничения, накладываемые на геометрию расчетной модели, а также расхождения в исполнении реального и проектируемого оборудования приводят к появлению существенной погрешности расчета по отношению к экспериментальным данным.

На наш взгляд, определенным помощником проектировщикам мог бы стать атлас карт напряженностей электрических полей различных подстанций, а также их фрагментов (в увеличенном масштабе).

На территории открытого распределительного устройства 500 кВ как до, так и после реконструкции отмечаются зоны, в которых напряженность

Таблица 1

Распределение напряженности электрического поля

Измерения проведены	Доля территории открытого распределительного устройства, %, где напряженность электрического поля лежит в диапазоне					
	менее 5 кВ/м	$5 \leq E < 10$	$10 \leq E < 15$	$15 \leq E < 20$	$20 \leq E < 25$	$25 \leq E < 30$
До реконструкции	82,19	9,56	5,27	2,23	0,71	0,04
После реконструкции	75,67	12,85	7,10	3,16	1,15	0,06

превышает 25 кВ/м. Нахождение персонала в этих зонах без средств индивидуальной защиты запрещено.

На основании данных табл. 1 можно отметить следующее: существенно, более чем на 60 %, увеличилась площадь зоны, в которой напряженность поля составляет 20 ... 25 кВ/м, а также на 50 % – площадь зоны, в которой напряженность электрического поля превышает 25 кВ/м. Прирост прочих зон составил 34 ... 35 % для зон напряженностью 5 ... 10 и 10 ... 15 кВ/м, до 41 % – для зоны напряженностью 15 ... 20 кВ/м. Таким образом, в результате реконструкции распределительного устройства 500 кВ произошло увеличение зоны влияния электрического (той зоны, в которой напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м) с преимущественным увеличением зон высокой интенсивности поля, в том числе зоны, в которой не допускается выполнение работ без средств индивидуальной защиты.

Наличие зон высокой интенсивности поля еще не означает, что любой работник, обслуживающий электрооборудование, установленное на распределительном устройстве, при выполнении своих производственных обязанностей ежедневно будет подвергаться воздействию электрического поля столь высокой интенсивности. Так, например, ремонтный персонал часто выполняет работы на оборудовании, где снято напряжение, и, следовательно, в окружающем его пространстве напряженность поля существенно отличается от измеренной во время работы подстанции по нормальной схеме. Кроме того, зоны высокой интенсивности поля наблюдаются часто вблизи оборудования, не требующего постоянного обслуживания или наблюдения со стороны персонала (например, шинные опоры).

Оценить влияние этих зон можно с помощью логической модели, отражающей возможность неблагоприятного воздействия электрического поля на работника, которая имеет вид:

$$F = X_1 \wedge (X_2 \vee (X_2 \wedge X_3) \vee (X_2 \wedge X_3 \wedge X_4) \vee (X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge X_5) \vee (X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge X_5 \wedge X_6)) \vee X_7. \quad (1)$$

Она является развитием модели, предложенной в [5], и построена с учетом логических связей между передвижением персонала по территории открытого распределительного устройства, видом работ и уровнями электрического поля промышленной частоты, существующими на реальных открытых распределительных устройствах.

Модель, отражающая процесс возникновения предпосылок повреждения здоровья при работе с электроустановками сверхвысокого напряжения (ЭУ СВН), включает 8 событий, которые могут быть разделены на следующие группы:

- событие, связанное с организацией работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования (X_1);
- события, отражающие возможность неблагоприятного воздействия электрического поля на персонал (5 элементов модели от X_2 до X_6);
- событие, связанное с использованием работником средств индивидуальной защиты (X_7);
- F – конечное событие.

Содержание событий приведено в табл. 2.

Вероятность элемента X_1 для различных категорий работников может быть найдена при помощи анализа длительности выполнения работ на территории открытого распределительного устройства по следующей формуле:

$$P_1 = \frac{t_{\text{ор}}}{T_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ор}}$ – время выполнения различных работ на территории открытого распределительного устройства; $T_{\text{общ}}$ – среднегодовой баланс рабочего времени для рассматриваемой профессиональной группы.

Рассмотрим определение вероятности события X_1 для дежурного персонала подстанции. 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 открытом распределительном устройстве, а также после отключения оборудования при коротком замыкании. Продолжительность одного осмотра открытых распределительных устройств подстанции напряжением 500 кВ составляет не менее 30–45 мин.

На рис. 3 приведена структурная схема, соответствующая рассматриваемой модели.

Учет продолжительности проведения оперативных переключений, подготовки рабочих мест для ремонтного персонала, допуска бригад к работе на территории распределительного устройства, наблюдение за работой бригады в тех случаях когда оно необходимо позволит увеличить эту цифру 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 открытом распределительном устройстве в год. Общий среднегодовой баланс рабо-

чего времени составляет около 2000 часов. Таким образом, максимальная вероятность нахождения на открытом распределительном устройстве представителей дежурного персонала, определенная по формуле (2), 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 защи-

Таблица 2

Элементы логико-вероятностной модели

Группа событий	События	Содержание события
Событие, связанное с организацией работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования	X_1	Выполнение работ на территории открытого распределительного устройства
События, отражающие нахождение персонала в зонах различной напряженности электрического поля	X_2	Возможность неблагоприятного воздействия на здоровье работника в зоне с напряженностью электрического поля промышленной частоты 5–10 кВ/м
	X_3	Возможность неблагоприятного воздействия на здоровье работника в зоне с напряженностью электрического поля промышленной частоты 10–15 кВ/м
	X_4	Возможность неблагоприятного воздействия на здоровье работника в зоне с напряженностью электрического поля промышленной частоты 15–20 кВ/м
	X_5	Возможность неблагоприятного воздействия на здоровье работника в зоне с напряженностью электрического поля промышленной частоты 20–25 кВ/м
	X_6	Возможность неблагоприятного воздействия на здоровье работника в зоне с напряженностью 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	Возможность неблагоприятного воздействия электрического поля на работника

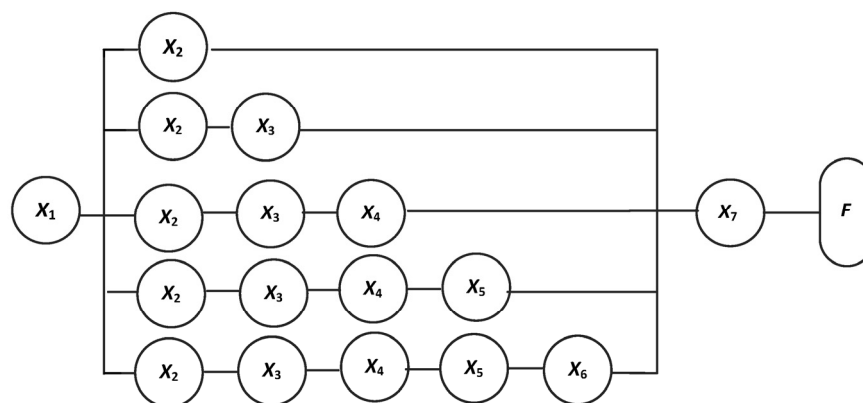


Рис. 3. Логико-вероятностная модель оценки возможности неблагоприятного воздействия электрического поля на работника, обслуживающего электроустановки сверхвысокого напряжения

ты от электрического поля. К сожалению, поскольку действие электрического поля на организм человека не вызывает болевых ощущений и не приводит к ярко выраженным неблагоприятным последствиям сразу после воздействия, персонал довольно часто пренебрегает использованием экранирующих комплектов. На основании наблюдений за работой дежурного персонала, для которого оценивается риск в данной статье, мы оцениваем частоту их использования как 10...20 %, а вероятность события X_7 как 0,8...0,9. Примем для дальнейших расчетов вероятность события X_7 равной 0,85.

Вероятности элементов (X_2, X_3, X_4, X_5, X_6), связанных с возможностью возникновения неблагоприятного воздействия на человека в зонах различной напряженности электрического поля, могут быть определены по результатам анализа карт распределения напряженности электрического поля на ОРУ (см. табл. 1). Если считать, что при своем перемещении по территории ОРУ работник случайным образом попадает в зоны различной напряженности, тогда

$$P_i = \frac{S_{E_j + E_{j+5}}}{S_{ОРУ}} R(\Delta t), \quad (3)$$

где $i \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$; $S_{E_j + E_{j+5}}$ – площадь зоны напряженностью от E_j до E_{j+5} ; $j \in \{0, 5, 10, 15, 20, 25\}$; $S_{ОРУ}$ – площадь открытого распределительного устройства; $R(\Delta t)$ – коэффициент, учитывающий степень вредного воздействия электрического поля промышленной частоты в зоне напряженностью от E_j до E_{j+5} .

Для подстанций площади зон различной напряженности 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 величина зоны определенной напряженности электрического поля является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения (закону Гаусса).

Степень вредного воздействия электрического поля промышленной частоты на организм челове-

ка учтена в формуле для определения предельно допустимого времени нахождения человека в зоне действия электрического поля. Так, например, пребывание в электрическом поле напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня; допустимое время пребывания в электрическом поле напряженностью от 5 до 20 кВ/м включительно вычисляются по формуле

$$T_{\text{доп}} = \frac{50}{E_i} - 2, \text{ ч}, \quad (4)$$

где E – напряженность воздействующего электрического поля в контролируемой зоне, кВ/м; при напряженности электрического поля от 20 и до 25 кВ/м время пребывания персонала в электрическом поле не должно превышать 10 мин; предельно допустимый уровень напряженности воздействующего электрического поля устанавливается равным 25 кВ/м, пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

В качестве коэффициента, учитывающего степень вредного воздействия электрического поля различной напряженности, может быть принято значение функции [6]

$$R(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}, \quad (5)$$

где Δt – допустимое время нахождения работника в зоне $[E_j; E_{j+5}]$;

$$\lambda = \frac{1}{\bar{E}_j}, \quad (6)$$

где $\bar{E}_j$ – среднее значение напряженности электрического поля в зоне $[E_j; E_{j+5}]$.

Допустимое время Δt нахождения работника в зоне напряженностью от E_j до E_{j+5} , определенное для среднего значения напряженности электрического поля в этой зоне, а также значения коэффициента $R(\Delta t)$, использованные далее в расчетах, приведены в табл. 3.

Определим вероятности элементов структурной логической модели как нечеткие числа с треугольным заданием функции принадлежности. Примем в качестве P_i среднее значение доли открытого распределительного устройства, занимаемой зоной, в которой напряженность электрического поля лежит в диапазоне от E_j до E_{j+5} , умноженное на коэффициент $R(\Delta t)$.

Таблица 3

Значения коэффициента $R(\Delta t)$

Зона напряженностью $[E_j; E_{j+5}]$, кВ/м	Среднее значение напряженности в зоне $\bar{E}_j$, кВ/м	Допустимое время Δt (ч) нахождения работника в зоне	Коэффициент $R(\Delta t)$
5 ÷ 10	7,5	4,67	0,54
10 ÷ 15	12,5	2,00	0,85
15 ÷ 20	17,5	0,86	0,95
20 ÷ 25	22,5	0,17	0,99
>25	–	0	1

Результаты расчета

Элемент модели X_i	Вероятность P_i элемента до реконструкции	Вероятность P_i элемента после реконструкции
X_1	0,13	0,13
X_2	0,0516	0,0694
X_3	0,0448	0,0604
X_4	0,0212	0,0300
X_5	0,0070	0,0114
X_6	0,0004	0,0006
X_7	0,85	0,85
$P(F)$	0,00595	0,00811

Значения вероятностей элементов логической модели оценки возможности неблагоприятного воздействия электрического поля на работника приведены в табл. 4.

Вероятность конечного события в логической модели (рис. 3) рассчитывается с использованием теорем умножения вероятностей для последовательно соединенных элементов и теорем сложения вероятностей для элементов, включенных в модель параллельно.

Применяя правила редукции для каждой пары параллельно соединенных элементов, получаем формулу для вычисления вероятности неблагоприятного воздействия электрического поля на работника, применимую к модели (см. рис. 3):

$$P(F) = P_1(1 - (1 - P_2)(1 - P_2P_3)(1 - P_2P_3P_4) \times \\ \times (1 - P_2P_3P_4P_5)(1 - P_2P_3P_4P_5P_6))P_7. \quad (7)$$

Значения вероятностей элементов логической модели оценки возможности неблагоприятного воздействия электрического поля на работника и результаты расчета приведены в табл. 4.

Вероятность повреждения здоровья до реконструкции подстанции составляла $P(F)=5,95 \cdot 10^{-3}$, а после проведения реконструкции подстанции вероятность повреждения здоровья составила $P(F)=8,11 \cdot 10^{-3}$.

Выводы

1. После реконструкции подстанции произошло увеличение размера зон, в которых напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м (от 17,81 % до 24,32 % территории открытого распределительного устройства). Существенно, более чем на 60 %, увеличилась площадь зоны, в которой напряженность поля составляет от 20 до 25 кВ/м, а также на 50 % увеличилась площадь зоны, в которой напряженность электрического поля превышает 25 кВ/м. Прирост прочих зон составил от 34 до 35 % для зон напряженностью 5 ... 10 и 10 ... 15 кВ/м и до 41 % – для зоны напряженностью 15 ... 20 кВ/м. Таким образом, в результате реконструкции ОРУ 500 кВ произошло увеличение зоны влияния электрического поля (той зоны, в которой напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м) с преимущественным увеличе-

нием зон высокой интенсивности поля, в том числе зоны, в которой не допускается выполнение работ без средств индивидуальной защиты. Учитывая относительно небольшую наполненность территории открытого распределительного устройства оборудованием доля, зоны влияния электрического поля остается меньшей, чем в среднем на подстанциях предприятия магистральных электрических полей.

2. Выполненные расчеты позволяют сделать вывод о некотором (на 36 %) увеличении риска повреждения здоровья персонала после проведения реконструкции подстанции.

Литература

1. Сидоров, А.И. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: монография / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 204 с.
2. Сидоров, А.И. Характеристика напряженности магнитного поля на открытых распределительных устройствах подстанций предприятия Магистральные электрические сети Западной Сибири // А.И. Сидоров, И.С. Окраинская // Сб. докл. десятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2008». – СПб: ВИТУ, 2008. – С. 638–641.
3. СанПиН 2.2.4.1191–03. Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003. – 17 с.
4. Руководящие указания по защите персонала, обслуживающего распределительные устройства и воздушные линии электропередачи переменного тока напряжением 400, 500 и 750 кВ, от воздействия электрического поля / Министерство энергетики и электрификации СССР. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1981. – 24 с.
5. Сидоров, А.И. Оценка риска повреждения здоровья персонала ЭУ СВН по фактору электрическое поле / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, Н.А. Шаврина // Сб. докл. девятой Российской на-

учно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006». – СПб., 2006. – С. 590–594.

6. Окраинская, И.С. О логико-вероятностном моделировании для оценки вероятностей

вредного воздействия на человека опасных технических факторов / И.С. Окраинская, О.В. Номоконова, А.И. Сидоров // Технологии техносферной безопасности. Интернет-журнал. – Вып. 1 (41). – февраль 2012. – <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-1/10-01-12.ttb.pdf>

Поступила в редакцию 12.03.2012 г.

Окраинская Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8-(351) 267-96-26, e-mail: okrainskaya@yandex.ru

Okrainskaya Irina Sergeevna is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor, an assistant professor of Life Safety Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: occupational safety in power engineering. Telephone: 8 (351) 267-96-26, e-mail: okrainskaya@yandex.ru

Сидоров Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8(351) 267-94-49; e-mail: bgd-susu@mail.ru

Sidorov Alexander Ivanovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor, a head of Life Safety Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: occupational safety in power engineering. Telephone: 8 (351) 267-94-49, e-mail: bgd-susu@mail.ru.

Круглов Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры тепловодогазоснабжения, Челябинская государственная агроинженерная академия. Область научных интересов – охрана труда. Контактный телефон: 8 (351) 267-94-49.

Kruglov Gennady Alexandrovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Department of Heat, Water and Gas Supply of Chelyabinsk State Agronomical Engineering Academy. Research interests: occupational safety. Telephone: 8 (351) 267-94-49.

Тряпицын Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8 (351) 267-96-26.

Tryapitsyn Alexander Borisovich is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor, an assistant professor of Life Safety Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: occupational safety in power engineering. Telephone: 8-(351) 267-96-26.