

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

### 5.1. Снижение влияния электрических и магнитных полей промышленной частоты на человека

#### 5.1.2. Математическая оценка и фантомные измерения факторов воздействия на человека электрических и магнитных полей

Мисриханов М.Ш. и Токарский А.Ю., ОАО МЭС Центра; Рубцова Н.Б., ГУ НИИ медицины труда РАМН

##### 5.1.2.1. Электрические и магнитные поля под ВЛ СВН

Электрические поля, создаваемые ВЛ СВН и ультра-высокого напряжения (УВН), сравнительно легко рассчитываются при их расположении над ровной поверхностью земли. В действительности поверхность земли не является ровной, что приводит к расхождению результатов расчетов и измерений примерно на 5 %.

Магнитные поля при обычном (не ферромагнитном) грунте, над которым расположены ВЛ СВН и УВН, не искажаются, и расхождения в результатах расчетов и измерений незначительны и находятся в пределах погрешности приборов измерения.

Для оценки уровней ЭП и МП, создаваемых ВЛ, существуют различные методики и программы расчета, одной из которых является программа «Линия ЭМП»

заны результирующие кривые распределения напряженностей  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$  на уровне 1,8 м в сечении ВЛ 500 кВ в зависимости от расстояния от нижнего провода фазы до земли. Расчеты проведены для линейного напряжения 500 кВ и фазного тока 1050 А. Эти данные позволяют адекватно оценивать возможные уровни ЭП и МП как на рабочих местах, так и в местах проживания населения уже на этапе разработки проектной документации на ВЛ, и корректировать ее для исключения неблагоприятного влияния указанного фактора на человека.

##### 5.1.2.2. Напряжение шага под ВЛ СВН измерения факторов воздействия на человека электрических и магнитных полей

Трассы ВЛ СВН и УВН пересекаются с нефте- и газопроводами, железнодорожными и автомобильными магистралями, где возможен прорыв или пролив нефтепродуктов. На рис. 5.3 в качестве примера для ВЛ 750 кВ

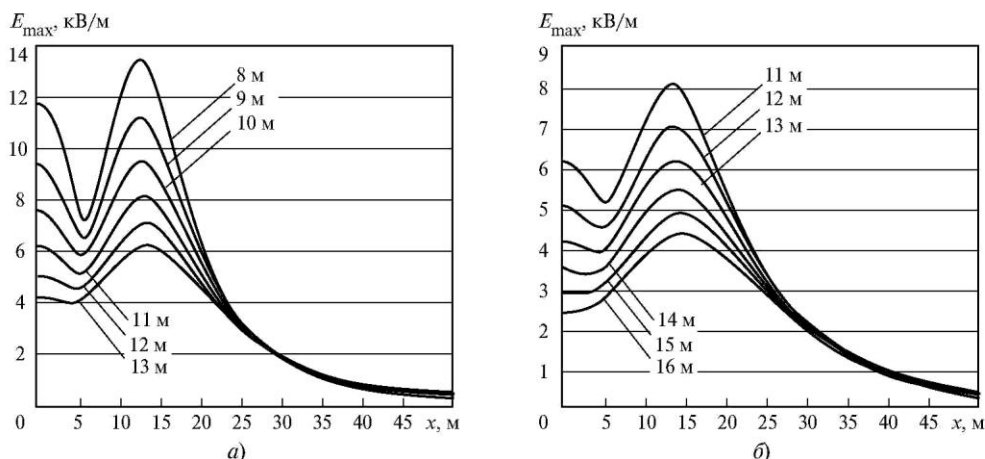


Рис. 5.1. Распределение напряженности  $E_{\max}$  ЭП в сечении ВЛ 500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли для габаритов «нижний провод фазы — земля» от 8 до 13 м (а) и от 11 до 16 м (б)

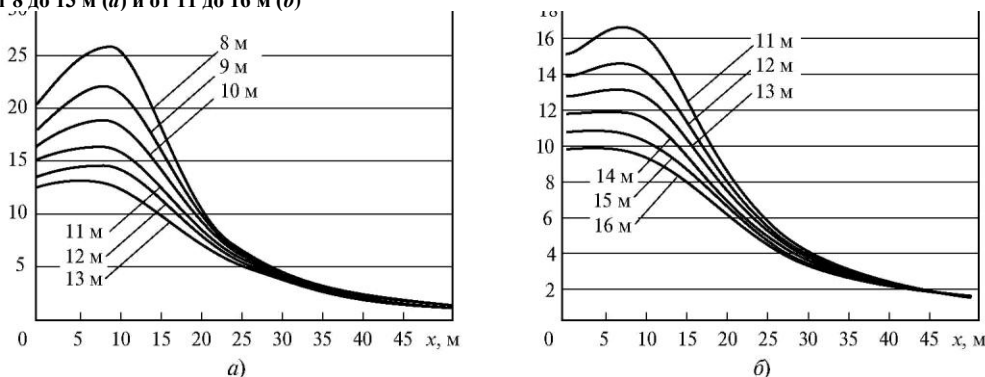


Рис. 5.2. Распределение напряженности  $H_{\max}$  МП в сечении ВЛ 500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли для габаритов «нижний провод фазы — земля» от 8 до 13 м (а) и от 11 до 16 м (б) [31].

Для оценки уровней воздействия этих полей на человека, находящегося вблизи линий высокого напряжения, составлены и продолжают составляться планшеты распределения напряженностей  $E_{\max}$  ЭП и  $H_{\max}$  МП на уровнях 0,5; 1,5 и 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ 110—1150 кВ. В качестве примера на рис. 5.1 и 5.2 пока-

традиционного исполнения с габаритом 12 м показано распределение модуля  $\phi_d$  и фазного угла  $\psi_d$  потенциала на поверхности нефтенасыщенного грунта с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3$  и проводимостью  $\gamma = 3 \cdot 10^{-9} \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ . Значение потенциала под средней фазой принято равным нулю. Прохождение линии над нефтенасыщенным грунтом.

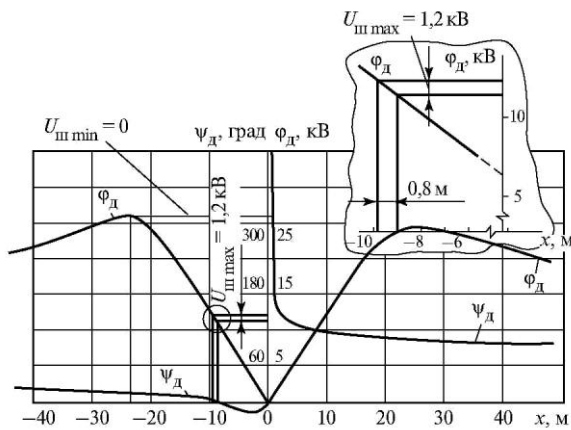


Рис. 5.3. Распределение потенциала по поверхности нефтенасыщенного грунта и определение напряжения шага

### 5.1.2.3. Магнитные поля в зоне работ под напряжением на ВЛ СВН

При проведении работ под напряжением (ПРН) линейный персонал находится в интенсивном МП, которое защитный комплект не экранирует.

Для определения уровней напряженности  $H$  МП в зоне ПРН в целях нахождения опасных зон, где  $H$  превышает предельно допустимые значения, проведены расчеты распределения эквилиний  $H$  в сечении фаз ВЛ 220—1150 кВ переменного тока и ВЛ 1500 кВ постоянного тока. На рис. 5.4 в качестве примера показано распределение эквилиний  $H$  в сечении средней фазы ВЛ 500 кВ, работающей при согласованной нагрузке (мощность нагрузки равна натуральной мощности линии) со значением модуля фазного тока 1039 А. Полученные данные распределения напряженности МП учитывались при обосновании предельно допустимых уровней МП ПЧ при ПРН в «ОБУВ переменных магнитных полей частотой 50 Гц при производстве работ под напряжением на ВЛ 220—1150 кВ» № 5060—89.

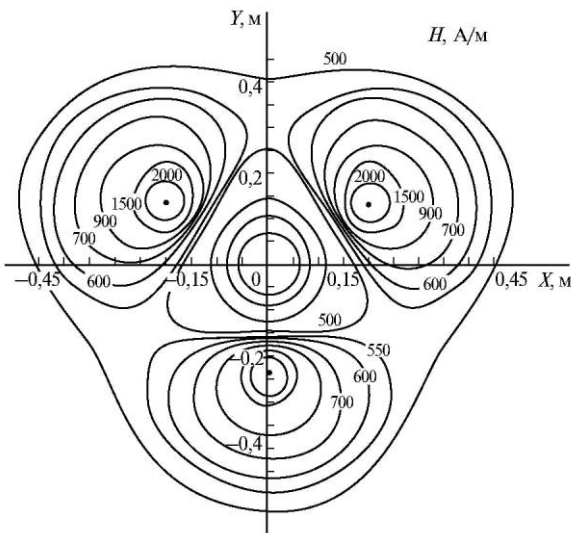


Рис. 5.4. Распределение эквилиний  $H$  в сечении средней фазы ВЛ 500 кВ переменного тока

### 5.1.2.4. Магнитные поля в зоне ПРН во время коротких замыканий

В целях определения вероятности дополнительного неблагоприятного влияния МП на человека было выполнено исследование режимов однофазных коротких замыканий (КЗ), осуществленное на примере конкретной ВЛ 750 кВ (Калининская АЭС — ПС «Владимирская» протяженностью 396,8 км при отключенной линии со стороны Калининской АЭС). Фазы ВЛ состоят из пяти проводов марки АС-330/43 с радиусом расщепления 40 см, а грозозащитные тросы — из двух проводов АС-70/72 с расстоянием 40 см между ними. На линию со стороны ПС «Владимирская» подавалось линейное напряжение 500 кВ. На ПС «Владимирская» регистрировались напряжения и токи в фазах и тросах при однофазном КЗ фазы  $A$  на расстоянии 142 км от ПС. Амплитудное значение тока КЗ в поврежденной фазе достигает 6 кА (рис. 5.5), а наведенного в грозозащитных тросах — 1,5 кА (рис. 5.6), что создает напряженность  $H$  МП на поверхности провода фазы 15,2 кА/м и на поверхности троса

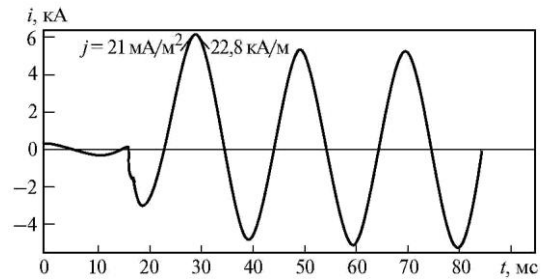


Рис. 5.5. Осциллограмма тока короткого замыкания в поврежденной фазе ВЛ 750 кВ

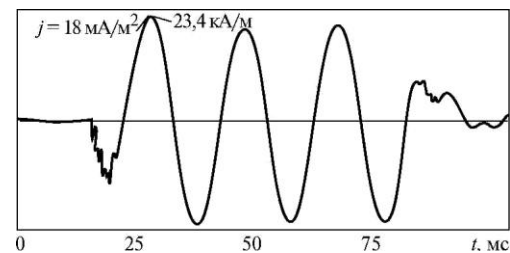


Рис. 5.6. Осциллограмма тока в грозозащитном тросе, наведенного в момент однофазного короткого замыкания ВЛ 750 кВ

15,6 кА/м (амплитудные значения).

В нормальном режиме работы напряжение ВЛ будет 750 кВ, т.е., как и значение тока КЗ, в 1,5 раза большее, чем во время испытаний. Тогда амплитудные значения  $H$  составят: на поверхности провода фазы 22,8 кА/м и на поверхности грозозащитного троса 23,4 кА/м. Это дает превышение действующего в РФ предельно допустимого значения  $H$  [32] для общего воздействия (3,2 кА/м) более чем в 7 раз, а локального воздействия (5,2 кА/м) — в 4,4 раза.

Однако время существования МП такой интенсивности всего 0,06 с, что не позволяет сопоставлять эти значения с нормативными, так как последние установлены не для импульсных, а для непрерывных режимов воздействия. В то же время эта величина почти в 6 раз превышает нормативное значение  $H$  для кратковременных воздействий (4 кА/м), предложенное рекомендациями IN-IRC/IRPA [33, 34].

Такое превышение ставит вопрос о необходимости оценки возможного влияния на организм человека этих уровней МП при учете пусть даже чрезвычайной кратковременности такого рода воздействий. Исходя из того, что, согласно современным представлениям, является наводимый им ток, рассмотрим значения плотностей токов, наводимых МП от токов КЗ в организме человека, рассчитав их по выражению, приведенному в п. 5.1.1, представив его следующим образом:

$$j = \pi R \sigma f \mu_0 \frac{I}{2\pi R_1}$$

где  $B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi R_1}$ ;  $I$  — ток в проводе, А;

$R_1$  — расстояние от центра рассматриваемого органа до оси провода с током;  $\mu$  — магнитная проницаемость органа;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Основными структурами, обеспечивающими нормальную жизнедеятельность организма являются головной мозг и сердце. Наиболее близко расположенным к проводам фазы органом человека, имеющим наибольшую проводимость тканей ( $0,7 \text{ См/м}$  [35]) является его головной мозг. Рассчитаем значения  $j$ , наводимых МП токов КЗ в мозге человека, проводящего замену фазных и тросовых распок под напряжением в момент рассмотренного выше однофазного КЗ для наихудшего случая, когда голова человека находится вплотную к проводу фазы или троса. Средний объем мозга человека составляет  $0,81 \text{ дм}^3$  [35], тогда средний радиус мозга будет  $5,8 \text{ см}$ . С учетом радиусов проводов  $R_1$  составит для провода фазы  $7,5 \text{ см}$ , а для троса  $7 \text{ см}$ .

Разложив в ряд Фурье кривые токов в фазе и тросе, получим действующие значения их первых гармоник (частота  $49,9 \text{ Гц}$ )  $3860 \text{ А}$  — для фазы и  $1070 \text{ А}$  — для троса (высших гармоник практически нет, так как их вклад не превышает  $0,5 \%$ ). По выражению, приведенному выше, рассчитаем значения  $j$  в мозге человека, проводящего работы под напряжением на ВЛ напряжением  $750 \text{ кВ}$ :  $j = 21 \text{ мА/м}^2$  — для провода фазы и  $j = 18 \text{ мА/м}^2$  — для троса.

Согласно [35] значения плотности тока по опасности для человека подразделяются на четыре зоны:

1. При плотности тока  $j$ , находящейся в пределах  $1 \dots 10 \text{ мА/м}^2$ , отмечаются лишь минимальные эффекты, не представляющие опасности для человека.
2. При  $j = 10 \dots 100 \text{ мА/м}^2$  наблюдаются выраженные эффекты (зрительные и со стороны нервной системы).
3. При  $j = 100 \dots 1000 \text{ мА/м}^2$  происходит стимуляция возбудимых структур, возможно неблагоприятное влияние на здоровье.
4. При  $j$ , превышающей  $1000 \text{ мА/м}^2$ , возможна экстрасистолия, фибрилляция желудочков сердца (острое поражающее действие).

Таким образом, человек, проводящий работы под напряжением на ВЛ  $750 \text{ кВ}$ , в момент КЗ подвергается воздействию МП, которое по плотности тока относится к началу второй зоны опасности.

В момент однофазного повторного включения (ОАПВ) в фазе ВЛ появляется ток, осциллограмма которого показана на рис. 5.7. Гармонический анализ кривой фазного тока в момент ОАПВ показывает наличие довольно большого числа составляющих высших гармоник.

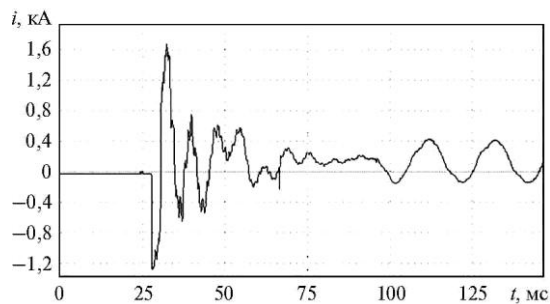


Рис. 5.7. Осциллограмма тока в фазе ВЛ 750 кВ после успешного ОАПВ

В табл. 5.6 даны результаты расчета составляющих ряда Фурье для тока в фазе линии, возникшего в момент успешного ОАПВ.

Таблица 5.6. Составляющие ряда Фурье для тока в фазе в момент успешного ОАПВ

650 GRAPHICAL & HARMONIC ANALYSIS			Dranetz Technologies, Inc.		
Fnd:	339A 210 deg	18th:	35.5% 351 deg	35th:	5.2% 2 deg
2nd:	155.2% 334 deg	19th:	9.5% 93 deg	36th:	3.0% 75 deg
3rd:	211.1% 144 deg	20th:	5.2% 202 deg	37th:	1.3% 19 deg
4th:	48.6% 269 deg	21st:	4.8% 294 deg	38th:	2.5% 58 deg
5th:	48.2% 33 deg	22nd:	4.3% 8 deg	39th:	10.7% 252 deg
6th:	23.7% 108 deg	23rd:	1.9% 14 deg	40th:	6.8% 52 deg
7th:	8.2% 108 deg	24th:	8.0% 19 deg	41st:	4.1% 108 deg
8th:	11.0% 121 deg	25th:	11.6% 184 deg	42nd:	2.3% 186 deg
9th:	10.6% 222 deg	26th:	6.4% 296 deg	43rd:	1.9% 290 deg
10th:	21.1% 14 deg	27th:	6.1% 43 deg	44th:	3.6% 2 deg
11th:	37.2% 78 deg	28th:	4.5% 103 deg	45th:	3.1% 97 deg
12th:	26.1% 238 deg	29th:	2.5% 166 deg	46th:	1.1% 18 deg
13th:	7.9% 350 deg	30th:	0.6% 254 deg	47th:	3.6% 181 deg
14th:	6.0% 65 deg	31st:	1.9% 259 deg	48th:	5.4% 321 deg
15th:	5.8% 75 deg	32nd:	12.6% 32 deg	49th:	4.9% 55 deg
16th:	8.4% 112 deg	33rd:	7.7% 156 deg	50th:	2.8% 144 deg
17th:	19.0% 153 deg	34th:	6.0% 284 deg		

Frequency: 49.9 Hz

Каждая составляющая тока создает МП, которое наводит в мозге человека ток, плотность которого можно рассчитать по выражению, приведенному выше.

На рис. 5.8 показана гистограмма действующих значений составляющих ряда Фурье для плотностей тока  $j$ , наводимого в мозге человека в момент успешного ОАПВ. Суммируя мгновенные значения  $j$ , получаем результирующую кривую плотности тока в мозге человека. На рис. 5.9 приведена результирующая кривая  $j$  срабатывания ОАПВ.

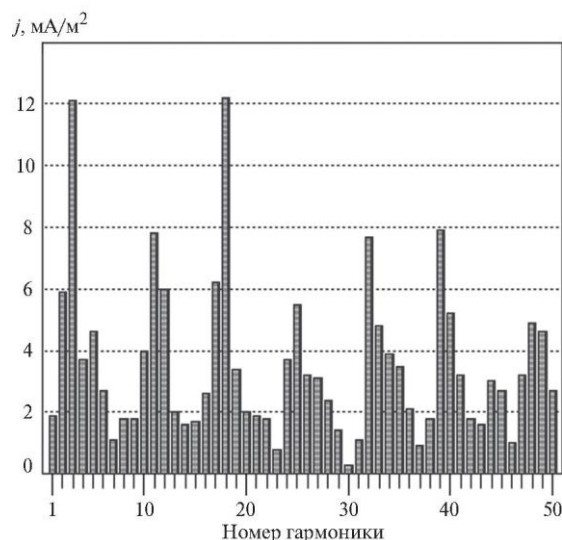


Рис. 5.8. Гистограмма действующих значений составляющих ряда Фурье плотностей тока  $j$  в мозге человека

На рис. 5.10 показана осциллограмма тока, наведенного в грозозащитном тросе в момент ОАПВ, а на рис. 5.11 — результирующая кривая плотности тока, наведенного МП тока грозозащитного троса в мозге человека, проводящего работы под напряжением (например, замену распок грозозащитного троса).

Как видно из рис. 5.9 и 5.11, в отдельные промежутки

времени плотности наводимых в мозге человека токов в импульсе могут превышать  $100 \text{ mA/m}^2$ : для провода фазы и троса соответственно в режиме испытаний 121 и  $77 \text{ mA/m}^2$ , а для рабочего режима ВЛ 750 кВ —  $181,5$  и  $115,5 \text{ mA/m}^2$ .

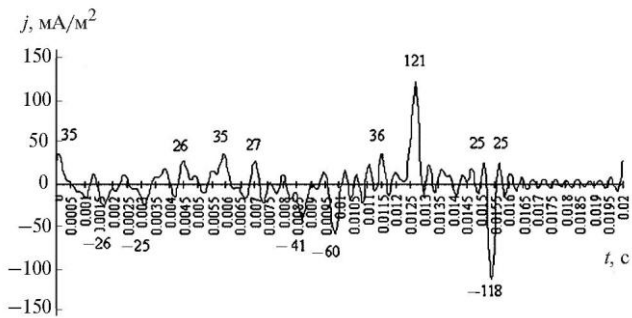


Рис. 5.9. Кривая плотности тока  $j$  в мозге человека, проводящего работы под напряжением на фазе линии в момент успешного ОАПВ

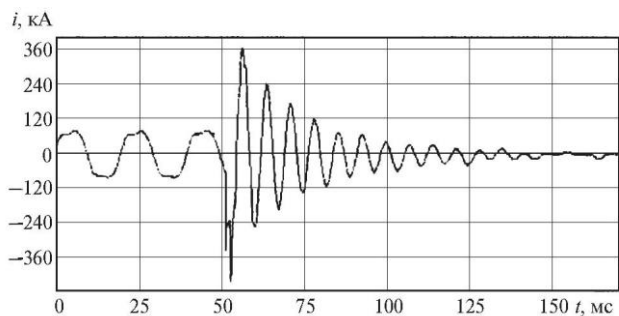


Рис. 5.10. Оциллограмма тока в грозозащитном тросе ВЛ 750 кВ после успешного ОАПВ

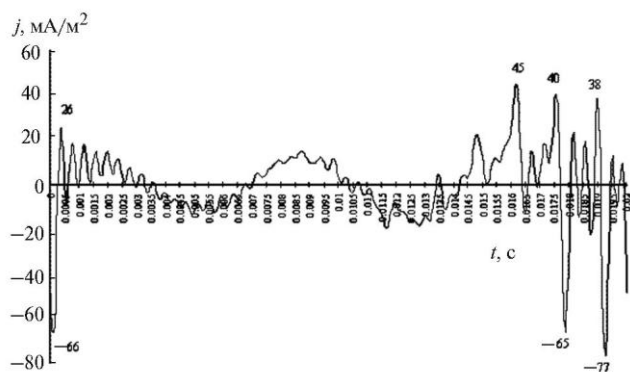


Рис. 5.11. Кривая плотности тока  $j$  в мозге человека, проводящего работы под напряжением на грозозащитном тросе линии в момент успешного ОАПВ

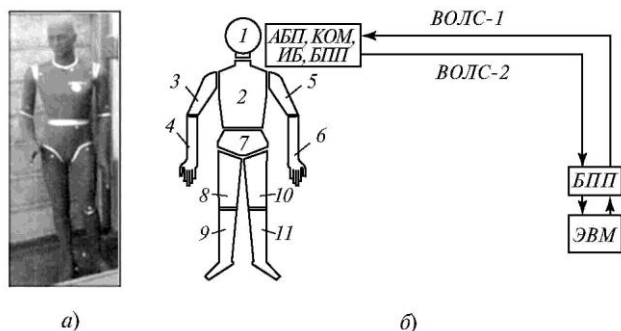


Рис. 5.12. Устройства измерения емкостных и аэрионных токов в частях тела человека на МВСЧ-1 (а), МВСЧ-4 (б)

Таким образом, результаты испытаний показали, что в момент КЗ плотность тока  $j$  находится в области выраженных (ощутимых) воздействий. В момент ОАПВ плотность тока  $j$  находится в зоне стимуляции возбудимых структур. Ток КЗ зависит от сопротивления петли КЗ. Максимальные расчетные значения токов КЗ для сети ВЛ 500 кВ достигают  $20...30 \text{ kA}$  (действующие значения), тогда значения  $H$  и  $j$  могут увеличиться в  $5...6$  раз. Значение и форма фазного тока в момент ОАПВ зависят от напряжения ВЛ, ее параметров (индуктивности, емкости, активного сопротивления и т.д., для различных конструкций линий эти параметры различны) и от характеристик дуги выключателя в момент его включения. Воздушная линия 1150 кВ имеет в  $1,5...1,8$  раза меньшую, чем у ВЛ 750 кВ, индуктивность, в  $1,3...1,7$  раза большую емкость, и на ВЛ такого класса напряжения применяются воздушные выключатели с еще большим секционированием зоны разрыва дуги. Тогда амплитудные значения  $j$  для ВЛ 1150 кВ в момент успешного ОАПВ могут быть в  $2...3$  раза больше, чем у ВЛ 750 кВ. При этом в момент КЗ на линии 1150 кВ  $j$  переходит в зону ощутимых воздействий, а в момент ОАПВ приближается к зоне поражающего действия. Наличие постоянно действующего комплекса неблагоприятных факторов производственной среды при ПРН и условия повышенной опасности при выполнении работ на высоте, что уже является фактором риска, позволяют считать, что токи, наводимые в головном мозге импульсными МП, возникающими при успешных ОАПВ, могут приводить к повышению степени риска потери здоровья и представлять дополнительную опасность для человека.

### 5.1.2.5. Фантомные измерения емкостных и аэрионных токов в частях тела человека, находящегося в ЭП ПЧ

Расчет распределения напряженности ЭП по поверхности тела человека, находящегося под ВЛ СВН или на территории ОРУ ПС высокого напряжения, довольно сложен и недостаточно точен, тем более, если этот расчет должен проводиться для человека, одетого в экранирующий комплект. Также очень сложно математически смоделировать и рассчитать уровни электромагнитного излучения (ЭМИ) коронного разряда (КР), тем более распределение его параметров по поверхности тела человека или животного. В этих случаях целесообразно применять фантомные методы измерения, т.е. проводить измерения на поверхности манекенов человека или животного, выполненных в натуральную величину и помещенных в реальные или максимально приближенные к реальным ЭП или в зону источников ЭМИ.

Устройства измерения емкостных токов в частях тела человека выполнены в форме фантомов (макетов) вертикально стоящего человека (МВСЧ-1 и МВСЧ-4) в натуральную величину (рис. 5.12).

Устройство МВСЧ-1 предназначено для измерения емкостных токов в теле человека, находящегося на потенциале земли, и имеет два слоя покрытия из латунной фольги и электропроводящей эпоксидной краски с проводимостью, равной средней проводимости тела человека. Покрытия разделены на 10 зон измерения (рис. 5.12, а): голова, торс, плечи правое и левое, предплечья правой и левой рук, таз, правая нога, бедро левой ноги и голень со стопой левой ноги. Устройство оснащено выносным блоком управления со стрелочной индикацией результатов измерения. Использовалось для проверки экра-

нирующих свойств комплектов защиты человека от воздействия ЭП.

Устройство МВСЧ-4 предназначено для измерения емкостных и аэроионных токов в частях тела человека, проводящего работы под напряжением на ВЛ СВН. Поверхность МВСЧ-4 разбита на 11 зон измерения (рис. 5.12, б), устройство оснащено автономным блоком питания АБП, коммутатором КОМ, измерительным блоком ИБ, а также блоком приема-передачи БПП цифровой информации по волоконно-оптическим линиям связи ВОЛС, по которым осуществляется управление процессом измерения и получение результатов измерения на ЭВМ, расположенной на потенциале земли. Линии ВОЛС являются не только линиями связи, но и изолирующим звеном между МВСЧ-4, расположенным на потенциале фазы ВЛ СВН или УВН, и ЭВМ, находящейся на потенциале земли.

В каждой измерительной зоне производится 84 измерения за 0,02 с с последующим разложением в гармонический ряд Фурье. В табл. 5.7 приведены результаты измерения аэроионных (постоянная составляющая тока) и емкостных (первая гармоника частотой 50 Гц) токов в частях тела человека, находящегося без защитных средств в зоне ПРН (на фазе) ВЛ 500 кВ. В табл. 5.8 даны результаты измерения тех же токов, но когда устройство МВСЧ-4 одето в защитный костюм (без перчаток и ботинок).

Таблица 5.7. Аэроионные и емкостные токи в частях тела человека, находящегося на фазе ВЛ 500 кВ без защитного костюма

Номер зоны	Постоянная составляющая, мкА	Первая гармоника (50 Гц), мкА
1	-53,7	242,7
2	-88,2	197,5
3	14,5	98,7
4	167,3	494,3
5	21,5	65,1
6	-96,1	223,9
7	42,7	197,3
8	-156,1	185,7
9	121,2	949,2
10	21,2	159,2
11	-212,5	647,4

Таблица 5.8. Аэроионные и емкостные токи в частях тела человека, находящегося на фазе ВЛ 500 кВ в защитном костюме

Номер зоны	Постоянная составляющая, мкА	Первая гармоника (50 Гц), мкА
1	0,8	0,9
2	1,2	4,9
3	0,9	0,9
4	12,2	35,8
5	0,6	0,7
6	1,6	4,7
7	1,2	0,6
8	0,5	0,6
9	-0,3	4,6
10	0,7	0,5
11	4,0	46,9

Аэроионные токи на ВЛ 500 кВ в зоне ПРН соизме-

рими с амплитудными значениями емкостных токов ПЧ и составляют 15...84 % последних. Применение экранирующего костюма снижает значения токов аэроионов (без учета зон с незащищенными участками) в 16 (плечо правой руки) — 294 (бедро правой ноги) раза.

Емкостные токи ПЧ по сравнению с токами аэроионов ослабляются более эффективно: в 41 (торс) и 313 (область таза) раз. Представленные результаты подтверждают предположение о наличии в зоне ПРН не только ЭП, МП и емкостных токов ПЧ, но также аэроионных токов и показывают высокую эффективность экранирующих комплектов в части защиты работающих как от емкостных, так и от аэроионных токов, что обусловило отсутствие необходимости их дополнительной регламентации при ПРН, когда требуется обязательное применение экранирующих комплектов.

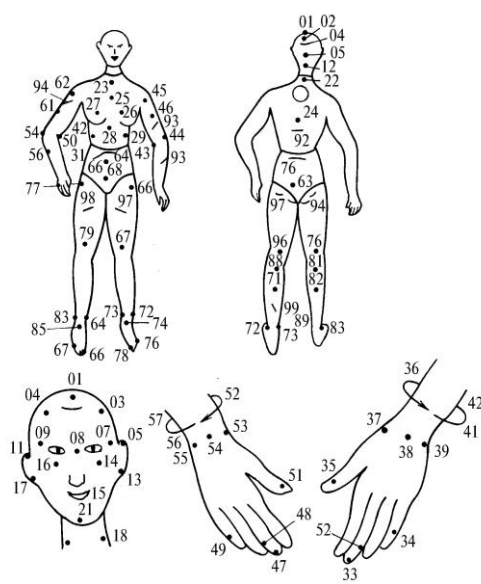
#### 5.1.2.6. Фантомные измерения распределения напряженности ЭП ПЧ на поверхности тела человека

Распределение напряженности  $E$  ЭП на поверхности тела человека проводилось с помощью устройств МВСЧ-2 и МВСЧ-3. Устройства выполнены в виде фантома вертикально стоящего человека в натуральную величину, усилены изнутри покрытием из стеклоткани с эпоксидной смолой и имеют два наружных покрытия из алюминиевой фольги и электропроводящей краски.

Устройство МВСЧ-2, показанное на рис. 5.13, а, предназначено для измерений, проводимых в полевых условиях, и оснащено 82 емкостными измерительными электродами, установленными в акупунктурных точках (рис. 5.13, б), встроенным автономным источником питания, системой коммутации и измерения, а также блоком цифровой индикации результатов измерения, расположенным на спине устройства. Управление процессом измерения автоматическое. Устройство использовалось для измерения распределения напряженности  $E$  ЭП на поверхности тела человека на рабочих местах персонала подстанции и линейного персонала, а также для проверки экранирующих свойств комплектов защиты человека от воздействия ЭП. На рис. 5.14 показана блок-схема системы измерения напряженности ЭП на поверхности фантомного устройства МВСЧ-2. В недействующем состоянии каждый измерительный электрод соединен с проводящей поверхностью МВСЧ-2. При проведении измерения с помощью  $i$ -го электрода последний через коммутатор подключается к входному резистору усилителя  $R_{вх}$ , а резистор, в свою очередь, подключен к проводящей поверхности МВСЧ-2. От усилителя измеренный сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а от АЦП — на блок индикации. Параллельно от коммутатора на блок индикации передается номер электрода, а от усилителя — номер предела измерения.

Блок индикации размещен на спине МВСЧ-2. На индикацию выводятся: номер точки измерения, действующее значение измеряемого тока (нА) и номер предела измерения.

Устройство содержит четыре предела измерения. Каждому пределу соответствует свой коэффициент, на который необходимо умножить измеренную величину тока, выведенную на блок индикации. Пределам 1, 2, 3 и 4 соответствуют коэффициенты 1, 4, 20 и 100 (рис. 5.15).



а)

б)

Рис. 5.13. Устройство МВСЧ-2 на ОРУ 750 кВ подстанции «Белый Раст» (а) и схема размещения измерительных электродов на поверхности устройства МВСЧ-2 (б)

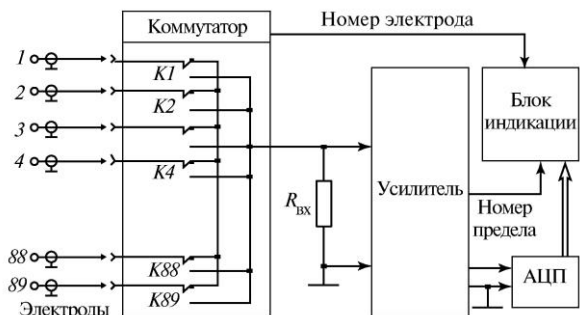


Рис. 5.14. Блок-схема системы измерения напряженности ЭП на поверхности фантомного устройства

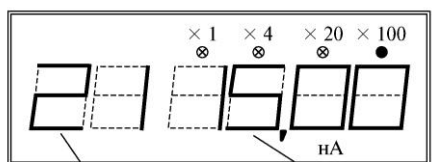


Рис. 5.15. Блок индикации устройства МВСЧ-2

Действующее значение напряженности  $E$  ЭП в каждой точке измерения определяется по выражению:

$$E = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 f S_{эл}}$$

где  $I$  — действующее значение измеренного тока;  $S_{эл}$  — площадь поверхности измерительного электрода;  $f$  — частота тока (50 Гц);  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Устройство МВСЧ-3 (рис. 5.16), предназначенное для измерения распределения  $E$  ЭП по поверхности тела человека в лабораторных условиях, оснащено 64 емкостными измерительными датчиками, блоком питания от сети 220 В, встроенными системами коммутации и измерения, а также системой ввода-вывода информации на ЭВМ, с которой осуществляются управление процессом измерения и обработка результатов измерений.

Устройство МВСЧ-3 использовалось для стендовой проверки экранирующих свойств комплектов защиты чело-

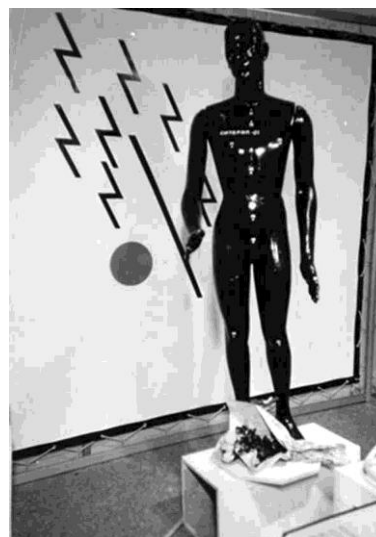


Рис. 5.16. Устройство МВСЧ-3

века от воздействия ЭП.

В табл. 5.9 приведены выборочные результаты измерения  $E$  на поверхности устройства МВСЧ-2, находящегося на дорожке ОРУ подстанции 750 кВ. Устройство МВСЧ-2 измеряет емкостный ток, протекающий через измерительный электрод с нормированной площадью поверхности. В дальнейшем ток пересчитывается в напряженность  $E$  ЭП.

Измерения показали, что при напряженности неискаженного ЭП на уровне 1,8 м от поверхности земли, равной 17 кВ/м, напряженность на поверхности тела МВСЧ-2 изменялась от 2,8 (грудь) до 243 кВ/м (кончик носа).

Таким образом, результаты измерений показывают значительные различия в уровнях искаженного ЭП на поверхности тела человека и свидетельствуют о возможности локальных эффектов ЭП при уровнях неискаженного поля, укладывающихся в нормативные значения. Эти данные использованы при разработке «Санитарных норм и правил выполнения работ в условиях воздействия переменных электрических полей промышленной частоты (50 Гц)» № 58021 и при разработке концепции едино-

го принципа нормирования электрической и магнитной составляющих ЭМП ПЧ

Таблица 5.9. Выборочные результаты измерения  $E$  на поверхности устройства МВСЧ-2, находящегося на ОРУ ПС 750 кВ «Белый Раст»

Номер точки	$S_{\text{аль}}, \text{см}^2$	$I, \text{нА}$	Предел измерения	$E, \text{кВ/м}$
1	1	10,00	2	143,87
5	1	6,40	2	92,07
8	1	4,71	2	67,76
11	1	8,01	2	115,24
15	1	3,38	3	243,14
18	9	9,38	2	14,99
24	9	7,00	3	55,95
25	9	7,06	1	2,82
32	1	10,40	2	149,62
51	1	4,44	1	15,96
68	9	4,50	2	7,19
75	1	12,00	1	43,16
84	9	3,58	3	28,61

### 5.1.2.7. Фантомные измерения электромагнитного излучения коронного разряда

В целях изучения влияния ЭМИ коронного разряда на живые организмы изготовлен специальный стенд, рабочими элементами которого являются игольчатый и заземленный электроды  $ИЭ$  и  $ЗЭ$ . На  $ИЭ$  подается постоянное напряжение  $\pm 75 \text{ кВ}$ , а на  $ЗЭ$  размещаются подопытные животные (мыши), подвергаемые воздействию факторов высокого напряжения постоянного тока. Интенсивность ЭМИ коронного разряда широкополосного спектра измеряется с помощью фантома мыши, установленного на заземленном электроде (рис. 5.17). Фантом имеет металлическое покрытие, которое через балластный резистор  $R_6$  соединено с  $ЗЭ$ .

Измеряемый сигнал с резистора  $R_6$  через экранированный кабель  $ЭК$  подается в систему измерения, состоящую из высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного (НЧ) каналов. Канал НЧ работает в диапазоне частот от нуля до 200 Гц и состоит из усилителя низкой частоты  $УНЧ$  и аналого-цифрового преобразователя  $АЦП$ , сигнал с которого в цифровой форме поступает через устройство сопряжения  $УСО$  на ЭВМ и принтер  $П$ . Канал НЧ позволяет производить 84 измерения за 0,02 с. Канал ВЧ работает в диапазоне частот от 200 Гц до 10 МГц и состоит из усилителя высокой частоты  $УВЧ$ ,  $АЦП$  и периферийного блока памяти  $ПБП$ , связанного с ЭВМ через  $УСО$ . Канал ВЧ производит 4096 измерений за 0,005 с.

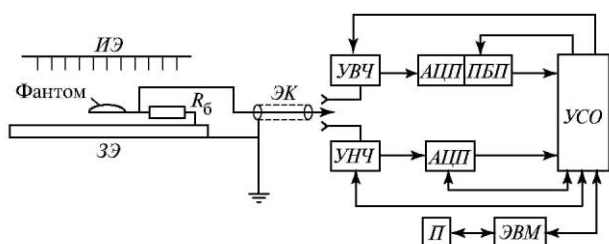


Рис. 5.17. Стенд и схема измерения электромагнитного излучения коронного разряда

На рис. 5.18 и 5.19 показаны примеры вольт-секундных характеристик напряжения на фантоме мыши при подаче на  $ИЭ$  напряжения соответственно  $+75 \text{ кВ}$  и  $-75 \text{ кВ}$ .

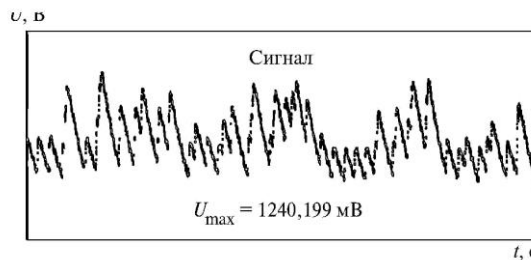


Рис. 5.18. Вольт-секундная характеристика напряжения, наведенного на фантоме мыши ЭМИ короткого разряда постоянного тока при напряжении на  $ИЭ$ , равном  $+75 \text{ кВ}$

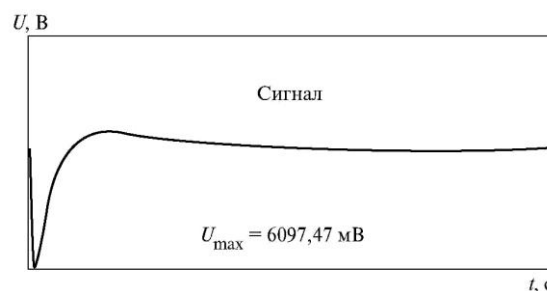


Рис. 5.19. Вольт-секундная характеристика напряжения, наведенного на фантоме мыши ЭМИ коронного разряда постоянного тока при напряжении на  $ИЭ$ , равном  $-75 \text{ кВ}$

На рис. 5.20,  $a$  и  $b$  и показаны расчетные (по данным рис. 5.18 и 5.19 соответственно) кривые амплитудно-частотных спектров (АЧС) напряженности  $E$ , создаваемой на поверхности мыши ЭМИ коронного разряда постоянного тока, полученные в результате пересчета в напряженность ЭП с дальнейшим разложением в интеграл Фурье с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

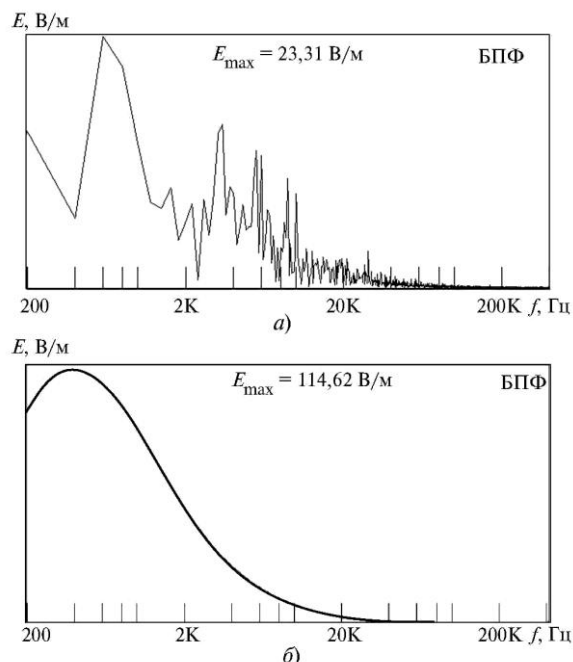


Рис. 5.20. Амплитудно-частотный спектр напряженности ЭП на поверхности фантома мыши, наведенного ЭМИ коронного разряда постоянного тока при напряжении на  $ИЭ$ , равном  $+75 \text{ кВ}$  ( $a$ ) и  $-75 \text{ кВ}$  ( $b$ )

При положительной полярности напряжения на  $ИЭ$  всплески напряжения, наведенного ЭМИ коронного разряда на фантоме мыши, очень частые, а амплитуды находятся в пределах  $200 \dots 1500 \text{ мВ}$ . При отрицательной полярности всплески сравнительно редки, но их ампли-

туды имеют большие значения: 500...7000 мВ.

Форма кривой АЧ С  $E$  при положительной полярности сложна, а максимумы амплитуд  $E$  достигают значений 10...50 В/м на частотах 0,5...1,0 кГц. При отрицательной полярности максимумы амплитуд  $E$  достигают значений 50...200 В/м на частотах 300...800 Гц. Для обеих полярностей амплитуды  $E$  затухают при частоте 100 кГц и более.

Полученные данные свидетельствуют о том, что ЭМИ широкополосного спектра коронного разряда по своим спектральным характеристикам сходны с имеющимися на рабочих местах пользователей ПЭВМ, что требует особого внимания в части исключения их неблагоприятного влияния на человека.

#### 5.1.2.8. Инструментальные методы оценки уровней электрического и магнитного полей промышленной частоты на рабочих местах персонала электросетевых объектов

Для действующих источников контроль уровней ЭМП осуществляется преимущественно посредством инструментальных измерений. Так, «Методические указания по определению электромагнитного поля воздушных высоковольтных линий электропередачи и гигиенические требования к их размещению» № 4109—86 определяют как размеры санитарно-защитных зон ВЛ напряжением 330, 500, 750 и 1150 кВ, так и рекомендации по проведению инструментальных измерений в пределах санитарно-защитной зоны.

Тем не менее простая регистрация уровней ЭП и МП ПЧ на рабочих местах персонала не может дать объективной картины интенсивности-временных параметров воздействия фактора на работающих. В реальных условиях для гигиенической оценки ЭП и МП ПЧ как методы расчета приведенного времени (по СанПиН 2.2.4.1191—03), так и методика измерений в зоне размещения ВЛ ЭП и МП ПЧ на рабочих местах персонала используются крайне редко, так как при эксплуатации и обслуживании электроустановок рабочие места не фиксированы, а в течение всей рабочей смены отдельный работник (или группа работников) перемещаются в зоне выполнения работ. Этот вопрос приобретает особую значимость при проведении аттестации рабочих мест, так как согласно требованиям Р 2.2.2006—05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» необходимо устанавливать класс и степень вредности условий труда в зависимости от их соответствия гигиеническим регламентам.

В ГУ НИИ медицины труда РА М Н была разработана и апробирована система гигиенической оценки интенсивности-временных параметров воздействия ЭП и МП на рабочих местах персонала ОРУ и ВЛ, позволяющая достаточно адекватно оценивать степень экспозиции различных категорий работающих к фактору и сопоставлять эти значения с соответствующими гигиеническими регламентами. Система гигиенической оценки уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ СВН строится на основании измерений уровней электрической и магнитной составляющих на всех возможных рабочих местах персонала (во всех ячейках оборудования), данных о характере профессиональной деятельности отдельных групп работающих и хронометражных исследований.

Для оценки уровней ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах линейного персонала (осуществляющего эксплуатацию ВЛ СВН) была разработана стандартизован-

ная схема измерений, позволяющая по 35 точкам (местам измерений) осуществлять гигиеническую оценку уровней ЭП и МП в пролете ВЛ в пределах санитарно-защитных зон (рис. 5.21). На основании результатов измерений строится матрица распределения уровней ЭП и МП ПЧ. Далее гигиеническая оценка уровней ЭП и МП, так же как и для ОРУ, строится на основании данных о характере и видах деятельности и хронометражных исследований.

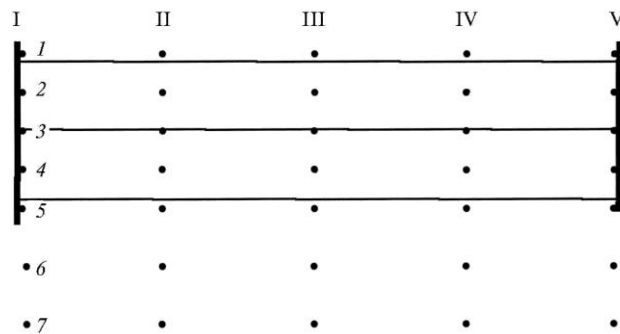


Рис. 5.21. Схема проведения измерений уровней ЭП и МП ПЧ в пределах санитарно-защитной зоны ВЛ

Особо следует отметить, что при регистрации уровней МП ПЧ запрашиваются данные об уровнях нагрузки на соответствующих участках электрических сетей. Анализ данных ведется с учетом доли нагрузки в момент измерений от номинальной (максимальной расчетной).

На основании результатов измерений строятся графическое изображение (гистограмма) распределения уровней ЭП и МП (для ОРУ и ВЛ соответственно), рассчитываются средневзвешенные значения уровней ЭП и МП ПЧ ( $E$  и  $H$ ) для каждого электросетевого объекта.

«Экспозиционные нагрузки» как основной критерий степени воздействия фактора на работающих для соответствующих профессиональных групп определяются на основании интенсивности и интенсивности-временных характеристик воздействия ЭП и МП ПЧ. Это осуществляется путем пересчета полученных средневзвешенных значений  $E$  и  $H$  в условно высчитываемые экспозиционные нагрузки: за рабочую смену и за год с учетом числа рабочих смен в году для каждой профессиональной группы. Полученные данные пересчитываются на условно усредненную для каждой профессиональной группы «нагрузку» за 1 сут и в 1 ч. Расчеты производятся по приведенным ниже формулам:

$$\mathcal{E}N_E = \frac{E_{\text{средне-взвеш.}} TN}{365 \cdot 24},$$

$$\mathcal{E}N_H = \frac{H_{\text{средне-взвеш.}} (I_{\text{max}} / I_i) TN}{365 \cdot 24}$$

где  $\mathcal{E}N_E$  — экспозиционная нагрузка по ЭП;  $\mathcal{E}N_H$  — экспозиционная нагрузка по МП;  $E_{\text{средне-взвеш.}}$  — средневзвешенное значение напряженности ЭП на ОРУ или в зоне ВЛ;  $H_{\text{средне-взвеш.}}$  — средневзвешенное значение напряженности МП на ОРУ или в зоне ВЛ;  $T$  — среднее время работы за смену;  $N$  — число рабочих смен в году; 365 — число дней в году; 24 — число часов в сутках;  $I_{\text{max}}/I_i$  — отношение максимального рабочего тока к току электроустановки при измерениях.

При анализе ЭМИ на рабочих местах персонала, обслуживающего ОРУ и ВЛ, доля мест измерений с определенными уровнями напряженности ЭП определяется



«шагом» 1 кВ/м, МП — «шагом» 1 А/м.

В качестве примера можно привести результаты измерений на ОРУ напряжением 500 кВ и в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) 20 пролетов ВЛ напряжением 500 кВ, находящихся на территории европейской части РФ. Измерения проводились на высоте 1,8; 1,5 и 0,5 м от поверхности земли и представлены с учетом размещенных на ОРУ стационарных средств защиты.

Так, на основании результатов измерений уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ в 350 точках из диаграммы распределения уровней напряженности ЭП и МП ПЧ (рис. 5.22) можно видеть, что доля мест измерений с уровнями до 5 кВ/м (не требующими ограничения времени пребывания за рабочую смену) составляет 21 % рабочих мест, с уровнями от 5 до 20 кВ/м — 73,6 %, а более 20 кВ/м (где запрещается пребывание в течение промежутка времени более 10 мин) — лишь 5,4 % рабочих мест. При этом не было выявлено рабочих мест, требующих дополнительного применения средств защиты — с уровнями более 25 кВ/м. Однако расчет средневзвешенного значения напряженности ЭП ПЧ для данного ОРУ 500 кВ показал, что он составляет 10,7 кВ/м, что в значительной степени превышает уровень 5 кВ/м, позволяющий осуществлять работы без ограничения времени пребывания.

По результатам измерения уровней напряженности МП ПЧ, которые производились при нагрузке, составлявшей 25 % номинальной, можно видеть (см. рис. 5.22), что в большинстве случаев (81,4 %) зарегистрированные уровни не превышали 5 А/м, что значительно ниже предельно допустимых уровней (ПДУ) для условий производственных воздействий. Средневзвешенное значение измеренных напряженностей МП составило 4,6 А/м. Однако с учетом того, что измерения производились при нагрузке, составлявшей лишь 25 % номинальной, для адекватной гигиенической оценки возможных уровней МП на рабочих местах полученное значение следует умножить на четыре. Соответственно средневзвешенное значение напряженности МП ПЧ на данном ОРУ составит 18,6 А/м (что также ниже ПДУ для условий произ-

водственных воздействий).

Измеренные уровни напряженности ЭП и МП ПЧ в пределах СЗЗ ВЛ напряжением 500 кВ (табл. 5.10) показывают высокую степень совпадения полученных данных с расчетными, а также позволяют рассчитать средневзвешенное значение напряженности ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах линейного персонала, обслуживающего данные энергообъекты.

Расчет средневзвешенного значения напряженности ЭП ПЧ для условий наземных работ в пределах СЗЗ ВЛ 500 кВ показал, что он составляет 8,8 кВ/м. Рассчитанные значения средневзвешенного уровня напряженности МП показали, что он составляет 3,7 А/м для условий нагрузки 25 % номинальной, т.е. для адекватной гигиенической оценки следует считать, что средневзвешенное значение напряженности МП ПЧ на рабочих местах линейного персонала, обслуживающего ВЛ 500 кВ, должно составлять 14,8 А/м.

Условная дозиметрия — расчет экспозиционных нагрузок, проведенный для различных групп персонала, осуществляющего эксплуатацию и обслуживание ПС и ВЛ 500 кВ, с учетом временного параметра (табл. 5.11), свидетельствует о том, что в наибольшей степени воздействию ЭП и МП ПЧ подвергается персонал линейной службы и ремонтной службы подстанций. Персонал службы релейной защиты и автоматики экспонирован к ЭМП ПЧ в 2 раза меньше, чем линейный и ремонтный, а экспозиционные нагрузки персонала оперативно-диспетчерской службы приблизительно в 4 раза меньше, чем у линейного и ремонтного.

Сопоставление полученных данных с результатами аналогичного расчета для условий работы при соблюдении нормативных требований для всего рабочего дня — для ЭП при уровнях 5 кВ/м (по 8 ч в день) и для МП — 80 А/м показывает, что условная экспозиция по ЭП ПЧ на час за год должна составлять не более 1,02 кВ/м, тогда как по магнитной составляющей она должна быть не более 16,4 А/м.

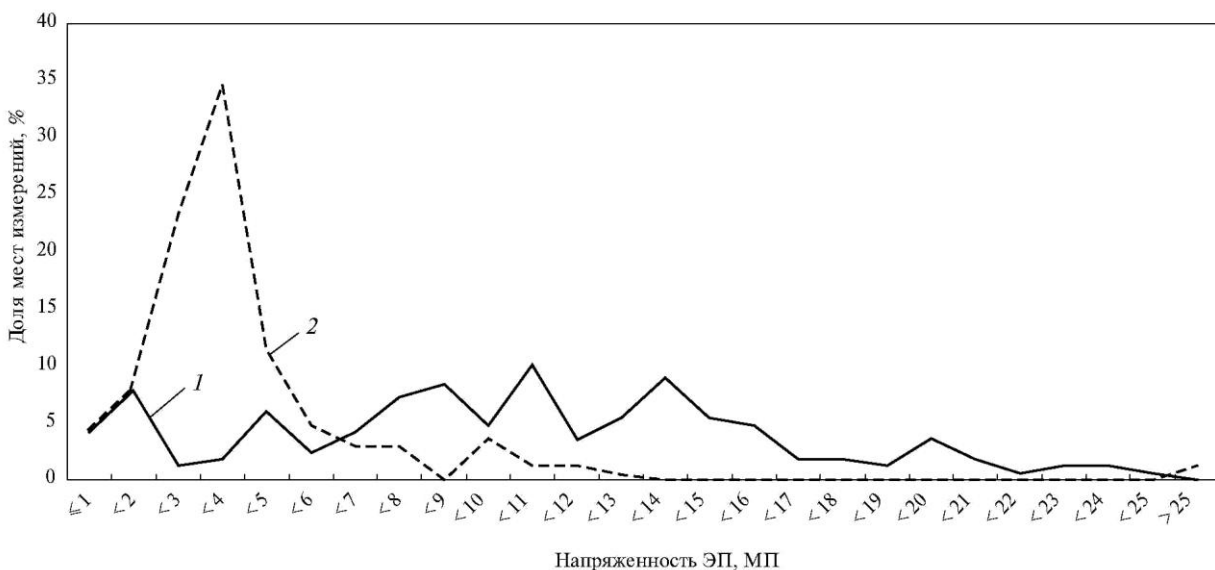


Рис. 5.22. Долевое распределение уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ 500 кВ:  
1 — напряженность ЭП, кВ/м; 2 — напряженность МП, А/м

Таблица 10. Уровни напряженности ЭП и МП ПЧ в пределах санитарно-защитных зон ВЛ 550 кВ (кВ/м; А/м)

Параметр	Места измерений (в соответствии со схемой по рис. 5.21)					
		I	II	III	IV	V
Напряженность ЭП 50 Гц, кВ/м $\frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{min}} \dots E_{\text{max}}}$	1	$\frac{1,5}{0,5 \dots 3,0}$	$\frac{4,5}{1,3 \dots 5,7}$	$\frac{6,8}{1,3 \dots 3,7}$	$\frac{4,4}{3,6 \dots 11,0}$	$\frac{1,4}{1,0 \dots 2,1}$
	2	$\frac{1,1}{0,1 \dots 3,6}$	$\frac{3,1}{2,5 \dots 4,5}$	$\frac{5,4}{3,9 \dots 8,0}$	$\frac{4,2}{3,6 \dots 5,0}$	$\frac{1,0}{0,5 \dots 3,5}$
	3	$\frac{0,4}{0 \dots 1,1}$	$\frac{3,3}{0,7 \dots 5,7}$	$\frac{6,8}{2,7 \dots 8,0}$	$\frac{3,0}{1,5 \dots 10,0}$	$\frac{0,4}{1,0 \dots 2,0}$
	4	$\frac{1,1}{0,5 \dots 2,9}$	$\frac{3,4}{1,5 \dots 6,7}$	$\frac{5,3}{4,0 \dots 8,0}$	$\frac{3,1}{2,3 \dots 9,0}$	$\frac{0,7}{0,5 \dots 1,5}$
	5	$\frac{1,3}{0,7 \dots 3,0}$	$\frac{4,8}{0,5 \dots 6,5}$	$\frac{7,0}{2,2 \dots 14,0}$	$\frac{6,7}{2,4 \dots 10,0}$	$\frac{1,3}{0,5 \dots 1,7}$
	6	$\frac{1,4}{0,4 \dots 2,0}$	$\frac{3,4}{0,9 \dots 7,0}$	$\frac{3,5}{1,1 \dots 4,8}$	$\frac{3,1}{1,5 \dots 4,8}$	$\frac{1,7}{0,4 \dots 2,9}$
	7	$\frac{1,4}{0 \dots 2,8}$	$\frac{1,1}{0 \dots 3,0}$	$\frac{1,2}{0 \dots 1,7}$	$\frac{1,4}{0 \dots 1,7}$	$\frac{1,3}{0 \dots 1,7}$
Напряженность МП 50 Гц, А/м $\frac{H_{\text{ср}}}{H_{\text{min}} \dots H_{\text{max}}}$	1	$\frac{1,6}{0,27 \dots 3,6}$	$\frac{2,1}{0,48 \dots 2,8}$	$\frac{3,9}{0,54 \dots 4,64}$	$\frac{2,2}{0,67 \dots 3,6}$	$\frac{1,7}{0,44 \dots 3,04}$
	2	$\frac{1,5}{0,24 \dots 3,04}$	$\frac{3,5}{0,46 \dots 5,2}$	$\frac{5,8}{0,2 \dots 7,04}$	$\frac{1,6}{0,54 \dots 2,72}$	$\frac{1,5}{0,32 \dots 2,96}$
	3	$\frac{1,7}{0,16 \dots 3,04}$	$\frac{3,8}{0,40 \dots 5,2}$	$\frac{5,2}{0,42 \dots 5,6}$	$\frac{3,1}{0,48 \dots 4,16}$	$\frac{1,7}{0,32 \dots 3,04}$
	4	$\frac{1,4}{0,16 \dots 2,0}$	$\frac{3,3}{0,34 \dots 4,8}$	$\frac{5,4}{0,30 \dots 5,6}$	$\frac{1,6}{0,38 \dots 2,8}$	$\frac{1,7}{0,24 \dots 4,0}$
	5	$\frac{1,2}{0,48 \dots 1,76}$	$\frac{1,9}{0,26 \dots 2,88}$	$\frac{3,8}{0,32 \dots 4,64}$	$\frac{3,2}{0,35 \dots 4,64}$	$\frac{1,8}{0,24 \dots 4,0}$
	6	$\frac{0,3}{0,2 \dots 1,68}$	$\frac{0,8}{0,24 \dots 2,4}$	$\frac{0,9}{0,16 \dots 3,2}$	$\frac{0,5}{0,40 \dots 1,68}$	$\frac{0,3}{0,24 \dots 0,88}$
	7	$\frac{0,2}{0,14 \dots 1,76}$	$\frac{0,5}{0,24 \dots 1,6}$	$\frac{0,4}{0,16 \dots 0,8}$	$\frac{0,5}{0,22 \dots 1,68}$	$\frac{0,3}{0,16 \dots 0,8}$

Таблица 5.11. Расчетные значения экспозиционных нагрузок по электрической и магнитной составляющим ЭМП ПЧ различных профессиональных групп персонала, обслуживающего ПС и ВЛ 500 кВ

Группа персонала	Параметр	Средневзвешенное значение	Экспозиционная нагрузка			
			за смену	за год	на сутки за год	на час за год
Линейный	E, кВ/м	8,1	60,6	10 718,4	29,4	1,22
	H, А/м	14,8	103,6	18 026,4	49,39	2,06
Ремонтная служба ПС	E, кВ/м	10,7	64,2	11 170,8	30,6	1,27
	H, А/м	18,6	111,6	19 418,4	53,20	2,21
Служба релейной защиты	E, кВ/м	10,7	26,75	4 654,5	12,75	0,53
	H, А/м	18,6	46,5	8 091,0	22,17	0,92
Оперативно-диспетчерский	E, кВ/м	10,7	16,05	2 921,1	8,0	0,33
	H, А/м	18,6	27,9	5 077,8	13,91	0,58