

## СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., асп. КРИКСИН П. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Высоковольтная электрическая подстанция (ПС) – объект сложный и ответственный. Отказы, повреждения силового оборудования, так же как и сбои в работе вторичных устройств, являлись и являются причиной отключения потребителей, недоотпуска электроэнергии, источником опасности для жизни и здоровья эксплуатационного персонала. Ввиду высоких требований к надежности подстанции необходимо учитывать все влияющие факторы, одним из которых является электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС ТС). ЭМС ТС определяется двумя составляющими: помехоустойчивостью технического средства и окружающей электромагнитной обстановкой (ЭМО). Электромагнитная обстановка характеризуется совокупностью электромагнитных явлений и процессов, среди которых выделяют молниевые влияния, влияния токов короткого замыкания и коммутаций в высоковольтной сети, пр.

В статье приведены результаты исследований и анализа электростатических разрядов (ЭСР) в условиях высоковольтной электрической ПС. Исследования базируются на результатах измерений и расчетов величины ЭСР, проведенных на действующих электрических ПС и в искусственно созданных условиях. Выполнено сопоставление полученных результатов с результатами других авторов, проанализированы основные влияющие факторы.

**Актуальность тематики.** Необходимость обеспечения ЭМС ТС в современной печати поднималась много раз [1, 2]. Обязательное обеспечение ЭМС ТС на высоковольтных электрических ПС предписано рядом современных нормативов [3–5]. В разрезе тематики ЭМС статическое электричество является одним из обязательных для изучения явлений. Результатом воздействия ЭСР на электронные приборы могут быть сбои в работе оборудования, повреждения отдельных элементов, ухудшение эксплуатационных показателей. В целом проблема статического электричества актуальна сама по себе, например в промышленности, где ЭСР могут привести к воспламенению различных субстанций, или в приборостроении, где в результате действия ЭСР повреждаются различные элементы и устройства.

**Описание явления статического электричества.** Разряды статического электричества относятся к природным явлениям. Причиной возникновения статического электричества могут быть процессы электризации трением или индукции [6]. В условиях ПС наиболее вероятно возникновение ЭСР за счет электризации трением при контакте человека с его одеждой, стулом, полом, рабочими предметами. При таком процессе два различных, изначально нейтральных тела соприкасаются, трутся друг о друга, а потом разъединяются. При этом одно тело передает электроны другому и заряжа-

ется положительно, а другое, получившее электроны, – отрицательно. Полярность и величина зарядов зависят как от свойств материала: структуры, поверхности, диэлектрической проницаемости, объемной и поверхностной проводимости, так и от внешних факторов: размера контактной поверхности, интенсивности трения, силы сжатия, скорости разведения, температуры и влажности воздуха [7].

По своей сути статическое электричество связано с процессами выравнивания зарядов между отдельными твердыми телами, жидкими и газообразными средами, имеющими различный электростатический потенциал. Уравнивание потенциалов сопровождается скользящими, коронными, искровыми или подобными молниям разрядными явлениями. Возможно также уравнивание зарядов за счет электропроводности.

По своим свойствам ЭСР – процессы весьма кратковременные, имеющие небольшой энергетический уровень. Токи в процессе разряда составляют от сотен пико- до нескольких микроампер, а сам заряд – от 3 нано до 5 микрокулон [7]. Вместе с тем, несмотря на кратковременность и малость энергии, в результате воздействия ЭСР вероятно появление различных проблем в работе электронных технических средств (ЭТС), которые могут быть как очевидными, приводящими к повреждению устройства, так и скрытыми, когда устройство работает, но его параметры ухудшаются [8].

Влияние на ЭТС может осуществляться как за счет тока, так и напряжения разрядов статического электричества. Под действием напряжения возможно разрушение поверхности кристалла либо сквозной пробой диэлектрика. В результате действия тока на границе оксид – полупроводник может образовываться зона локального расплавления полупроводникового материала, а в оксиде – образование точечного отверстия диаметром до 1 мкм.

Среди наиболее распространенных и связанных с ЭСР механизмов можно выделить: тепловой вторичной пробой, расплавление металлизации, объемный пробой, пробой диэлектрика, поверхностный пробой и газовый дуговой разряд. Первые три механизма определяются током разряда, остальные три – напряжением [7].

**Предмет и объект исследования.** В соответствии с требованиями стандарта [9] испытательный уровень технических средств определяют исходя из приложенного испытательного напряжения. Поэтому в качестве исследуемой величины принято напряжение (потенциал) ЭСР, возникающее в условиях электрической ПС. Кроме того, исследованы зависимость ЭСР от влажности окружающего воздуха и факторы, влияющие на величину ЭСР.

В качестве объекта исследования приняты условия действующей электрической ПС, где наиболее вероятной причиной возникновения ЭСР является электризация трением, возникающая при ходьбе обслуживающего персонала в помещениях закрытых распределительных устройств (ЗРУ) и помещениях релейного щита (РЩ). В процессе ходьбы при соприкосновении подошв обуви с напольным покрытием происходит накопление ЭСР, а разряд – при приближении персонала к заземленным предметам, в том числе к ЭТС.

В качестве наиболее вероятной обуви, в которой движется человек, принимается обувь с резиновой подошвой. Характеристики напольного покрытия принимаются исходя из основных мест установки ЭТС: в ЗРУ – бетонные полы, в помещениях РЩ – бетонные полы с фальшполом, паркет, линолеум.

**Методика исследования.** Исследование величины потенциала ЭСР тела человека  $U_{\text{эп}}$  выполняли методом прямого измерения посредством измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1. Влажность воздуха

в помещении определяли при помощи измерителя влажности воздуха ТКА-ПКМ. На основании полученных данных рассчитали неопределенность измерений. Необходимые для расчета неопределенности измерений метрологические характеристики средств измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики средств измерения

Наименование средства измерения	Основные требования и метрологические характеристики
Измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1	<p>Диапазон измерения потенциала электростатически заряженных объектов <math>U_n</math>:</p> <p>от 0,02 до 10 кВ – с конечными значениями диапазонов <math>U_n</math> 2 и 10 кВ при расстоянии до объекта 2 см;</p> <p>от 0,10 до 50 кВ – с конечными значениями диапазонов <math>U_n</math> 2; 20 и 50 кВ при расстоянии до объекта 10 см.</p> <p>Предел допускаемой относительной погрешности измерения потенциала:</p> $\pm \left[ 5 + 0,2 \left( \frac{U_n}{U_x} - 1 \right) \right], \%$ – при расстоянии до объекта 2 см; $\pm \left[ 10 + 0,5 \left( \frac{U_n}{U_x} - 1 \right) \right], \%$ – при расстоянии до объекта 10 см, <p>где <math>U_x</math> – измеренное значение</p>
Комбинированный прибор: измеритель температуры и относительной влажности воздуха ТКА-ПКМ	<p>Диапазон измерения относительной влажности воздуха от 10 до 98 % с погрешностью измерения <math>\pm 5,0</math> %.</p> <p>Диапазон измерения температуры воздуха от 0 до 50 °С с погрешностью измерения <math>\pm 0,5</math> °С</p>

Для повышения точности результатов число каждых измерений потенциала ЭСР тела человека  $n$  принимали равным 5. Обработку результатов измерений потенциала ЭСР проводили в соответствии с моделью [10]

$$U_{\text{эп}} = U_{\text{эпн}}(1 + \delta U_{\text{эп}}), \quad (1)$$

где  $U_{\text{эпн}}$  – измеренное значение электростатического потенциала тела человека, В;  $\delta U_{\text{эп}}$  – влияющая величина, обусловленная погрешностью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1 при измерении электростатического потенциала, о. е.

Анализ величин формулы (1) проводили в соответствии с рекомендациями [10], результаты анализа представлены в табл. 2. Величины рассматривали как некоррелированные.

Таблица 2

Параметры величин формулы (1)

Величина	Свойство и характеристика величины
$U_{эпн}, В$	<p>Тип неопределенности – <math>A</math>;            вид распределения – нормальное;            значение оценки – <math>\bar{U}_{эпн}</math>;            стандартная неопределенность – <math>u(\bar{U}_{эпн})</math></p> <p><i>Примечание.</i> Значения <math>\bar{U}_{эпн}</math> и <math>u(\bar{U}_{эпн})</math> рассчитывали из результатов наблюдений.</p>
$\delta U_{эпн}, о. е.$	<p>Тип неопределенности – <math>B</math>;            вид распределения – равномерное.            значение оценки – <math>\delta \bar{U}_{эпн} = 0</math>;            интервал, в котором находится значение входной величины (<math>\pm r_1</math>):  <math>\pm \left[ 0,05 + 0,002 \left( \frac{U_{пн}}{U_{эпн}} - 1 \right) \right]</math> – при расстоянии до объекта 2 см или  <math>\pm \left[ 0,10 + 0,005 \left( \frac{U_{пн}}{U_{эпн}} - 1 \right) \right]</math> – при расстоянии до объекта 10 см,            при этом диапазон измерения <math>U_{пн} - 2000; 10000 В</math> или <math>U_{пн} - 2000; 20000; 50000 В</math> соответственно;            стандартная неопределенность – <math>u(\delta U_{эпн}) = \frac{r_1}{\sqrt{3}}</math></p> <p><i>Примечание.</i> Значение (<math>\pm r_1</math>) находили исходя из пределов допускаемой относительной погрешности измерения потенциала заряженного объекта с помощью ИПЭП-1.</p>

Средние арифметические значения  $\bar{U}_{эпн}$  и стандартные неопределенности  $u(\bar{U}_{эпн})$  результатов измерений найдем из формул:

$$\bar{U}_{эпн} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_{эпнi}; \quad i = 1, \dots, n_1; \quad (2)$$

$$u(\bar{U}_{эпн}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{эпнi} - \bar{U}_{эпн})^2}. \quad (3)$$

За оценку измеряемой величины потенциала ЭСР  $U_{эпн}$  примем среднее арифметическое значение  $\bar{U}_{эпн}$

$$U_{эпн} = \bar{U}_{эпн}. \quad (4)$$

Коэффициенты чувствительности  $c_1, c_2$  получим при вычислении частных производных:

$$c_1 = \frac{\partial U_{эпн}}{\partial U_{эпн}} = 1; \quad c_2 = \frac{\partial U_{эпн}}{\partial (\delta U_{эпн})} = U_{эпн}. \quad (5)$$

Вклады в неопределенности  $u_1(U_{эпн}), u_2(U_{эпн})$  определим по формулам:

$$u_1(U_{\text{эп}}) = c_1 u(\bar{U}_{\text{эпи}}); \quad u_2(U_{\text{эп}}) = c_2 u(\delta U_{\text{эп}}). \quad (6)$$

Суммарную стандартную неопределенность при измерении  $U_{\text{эп}}$  вычислим следующим образом:

$$u_c(U_{\text{эп}}) = \sqrt{u_1^2(U_{\text{эп}}) + u_2^2(U_{\text{эп}})}. \quad (7)$$

Расширенная неопределенность при измерении  $U_{\text{эп}}$  для коэффициента охвата  $k = 2$ , что соответствует уровню доверия  $p = 95 \%$ , составит

$$A_{U_{\text{эп}}} = k u_c(U_{\text{эп}}). \quad (8)$$

Итоговые величины получим в виде результата измерения плюс/минус расширенная неопределенность

$$U_{\text{эп}} = \bar{U}_{\text{эп}} \pm A_{U_{\text{эп}}} \quad (k = 2; p = 95 \%). \quad (9)$$

**Величины, влияющие на потенциал ЭСР.** Для анализа величин, которые могут влиять на потенциал ЭСР, проанализируем аналитическую зависимость из [4, с. 40], позволяющую вычислить потенциал ЭСР  $U_{\text{эп}}$  по результатам косвенных измерений

$$U = \frac{16 j_0 h}{\gamma_V \pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{(2m+1)(2n+1) \left[ 1 + \frac{\gamma_s h}{\gamma_V} \left( \frac{\pi^2}{4} \left( \left( \frac{2m+1}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{2n+1}{l_2} \right)^2 \right) \right) \right]}, \quad (10)$$

где  $j_0$  – плотность тока электризации, мкА/м<sup>2</sup>;  $\gamma_s = 1/\rho_s$ , См;  $\gamma_V = 1/\rho_v$ , См/м – удельные поверхностная и объемная проводимости материала покрытия;  $l_1, l_2, h$  – размеры покрытия и его толщина, м.

Анализ входящих в формулу (10) величин показывает, что значение потенциала ЭСР зависит от:

- свойств трущихся поверхностей (плотность тока электризации, удельные проводимости);
- плотности соприкосновения поверхностей (плотность тока электризации);
- площади соприкосновения поверхностей (размеры покрытия и его толщина).

Среди переменных характеристик, которые наиболее сильно влияют на величину потенциала ЭСР, ряд исследователей выделяет влажность [6–8]. От нее зависит значение удельного сопротивления материала, которое, как видно из (10), непосредственно влияет на величину потенциала.

Изменение влажности в широких пределах влечет изменение удельного сопротивления на несколько порядков – наглядно такая зависимость показана в табл. 3 [6, с. 52].

Ввиду сильного влияния влажности на параметры поверхности и, как следствие, на значение потенциала ЭСР, кроме самой величины ЭСР, проведем также измерение влажности.

**Экспериментальные исследования потенциала ЭСР на высоковольтных электрических ПС.** Измерение потенциала ЭСР проводилось авторами по вышеизложенной методике в рамках работ по обследованию

электромагнитной обстановки на шести электрических ПС в Беларуси в период с 2011 по начало 2012 г. Исследуемые ПС имели открытые распределительные устройства напряжением 110 кВ, ЗРУ 6 (10) кВ и помещения РЦ.

Таблица 3

**Зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности**

Материал	Удельное поверхностное сопротивление, Ом, при влажности, %	
	0	100
Политетрафторэтилен	$5,0 \cdot 10^{17}$	$3,6 \cdot 10^{12}$
Полистирол	$5,0 \cdot 10^{17}$	$8,4 \cdot 10^{11}$
Полиэтилен	$5,0 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^9$
Нейлон	$10^{12}$	$3,8 \cdot 10^9$
Плавленый кварц	$10^{17}$	$6,5 \cdot 10^{10}$
Аминопласт	$6,0 \cdot 10^{14}$	$10^{13}$
Ультрафарфор	$10^{16}$	$10^{13}$

Измерения потенциала ЭСР проводили в помещениях ЗРУ и РЦ. По результатам обработки результатов измерений была получена величина потенциала ЭСР с учетом расширенной неопределенности и построена зависимость потенциала ЭСР от влажности и типа напольного покрытия в помещении.

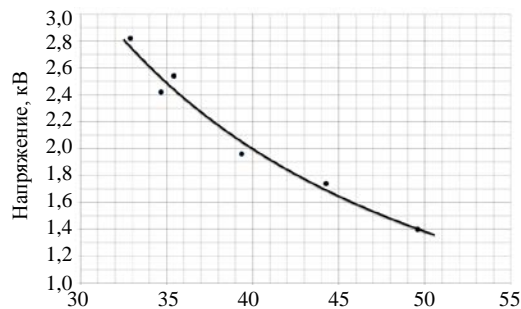
Измеренные величины потенциала ЭСР в помещениях ЗРУ приведены в табл. 4. Потенциал измеряли на человеке в кожаной обуви с резиновой подошвой, проходящем по полу расстояние 10 м.

Таблица 4

**Величина потенциала ЭСР в помещениях ЗРУ**

№ п/п	Объект	Относительная влажность, %	Величина потенциала ± расширенная неопределенность, В
1	ПС № 1, ЗРУ 10 кВ	32,9	2852 ± 258
2	ПС № 2, ЗРУ 10 кВ	44,3	1787 ± 198
3	ПС № 3, ЗРУ 10 кВ	49,6	1455 ± 199
4	ПС № 4, ЗРУ 10 кВ	35,4	2565 ± 179
5	ПС № 5, ЗРУ 6 кВ	39,4	1989 ± 169
6	ПС № 6, ЗРУ 6 кВ	34,7	2444 ± 242

По результатам данных табл. 4 на рис. 1 приведены значения потенциала ЭСР и соответствующие им величины влажности. Отдельные точечные измерения аппроксимированы стандартной степенной функцией программы Excel.



Влажность, %

Рис. 1. Зависимость величины потенциала ЭСР от влажности в помещении ЗРУ с бетонным полом (точками указаны результаты измерения на отдельных ПС; сплошной линией – аппроксимирующая функция)

Измерение величины потенциала ЭСР проводили также на ПС в помещениях РЦ. Напольное покрытие в исследуемых помещениях было выполнено в виде фальшпола (бетонное основание, отверстия в котором закрывали стальные листы). Потенциал измеряли на человеке в кожаной обуви с резиновой подошвой, проходящем по полу расстояние 10 м. Результаты измерений приведены в табл. 5.

Таблица 5

Величина потенциала ЭСР в помещениях РЦ

№ п/п	Объект	Относительная влажность, %	Величина потенциала ± ± расширенная неопределенность, В
1	ПС № 1, РЦ	35,5	2461 ± 201
2	ПС № 2, РЦ	46,7	1824 ± 143
3	ПС № 3, РЦ	44,0	1953 ± 175
4	ПС № 4, РЦ	30,2	2642 ± 142
5	ПС № 5, РЦ	48,6	1402 ± 148
6	ПС № 6, РЦ	36,0	2179 ± 173

По данным табл. 5 построен график на рис. 2.

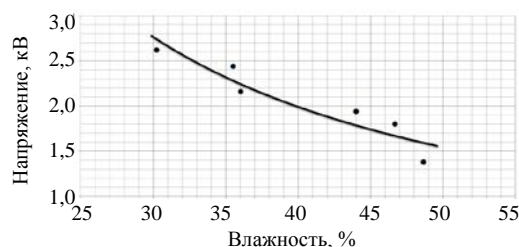


Рис. 2. Зависимость величины потенциала ЭСР от влажности в помещении РЦ с фальшполом (точками указаны результаты измерения на отдельных ПС; сплошной линией – аппроксимирующая функция)

**Измерения потенциала ЭСР для иных типов напольного покрытия.**

В рамках проводимых исследований дополнительно измеряли потенциал ЭСР на человеке при его движении по линолеуму и паркету, т. е. по тем материалам, которые иногда применяются в помещениях РЦ или ОПУ. Исследования проводили в жилых помещениях, влажность воздуха изменяли путем распыления воды. Человек проходил по исследуемому покрытию 10 м в кожаной обуви с резиновой подошвой. Каждый эксперимент повторяли не менее пяти раз. Результаты измерений приведены в табл. 6, 7 и на рис. 3, 4.

Таблица 6

Величина потенциала ЭСР в помещениях с линолеумом

№ п/п	Относительная влажность, %	Величина потенциала ± ± расширенная неопределенность, В
1	36,7	11587 ± 879

2	45,4	7506 ± 574
3	65,6	5623 ± 357

По данным табл. 6 построен график на рис. 3.

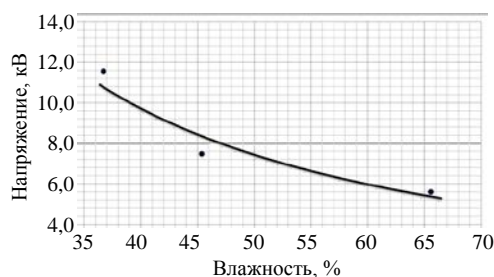


Рис. 3. Зависимость величины потенциала ЭСР от влажности в помещении с линолеумом (точками указаны результаты отдельных измерений; сплошной линией – аппроксимирующая функция)

Таблица 7

**Величина потенциала ЭСР в помещениях с паркетом**

№ п/п	Относительная влажность, %	Величина потенциала ± ± расширенная неопределенность, В
1	27,9	16921 ± 2001
2	45,7	10519 ± 1153
3	66,9	7304 ± 739

По данным табл. 7 построен график на рис. 4.

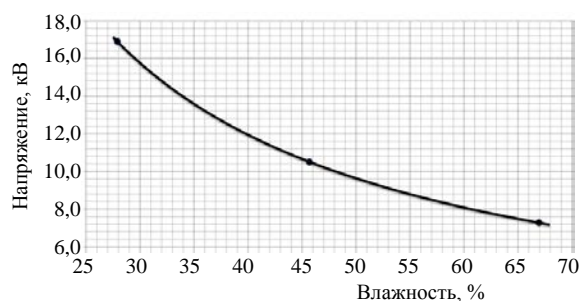
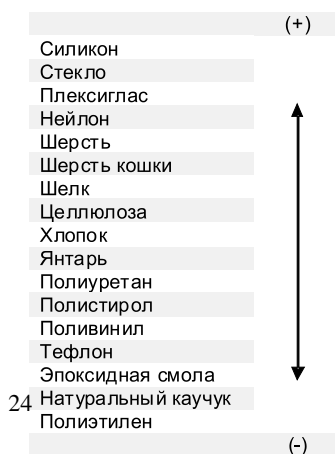


Рис. 4. Зависимость величины потенциала ЭСР от влажности в помещении с паркетом (точками указаны результаты отдельных измерений; сплошной линией – аппроксимирующая функция)



**Зависимость потенциала ЭСР от параметров поверхностей.** Величина ЭСР, как было сказано выше, существенно зависит от параметров электризующихся тел. Величина зарядов, возникающая при трении двух тел, может быть определена по трибоэлектрической шкале (рис. 5) [8]. При этом при трении двух материалов тот из них, что расположен в ряду выше, заря-

Рис. 5. Трибоэлектрическая шкала



жается положительно и тем сильнее, чем более разнесены материалы по шкале.

Среди прочих параметров электризующихся тел наиболее важными являются их удельные сопротивления, так как от их величины зависит скорость стекания заряда и, как следствие, уравнивания потенциала. Зависимость удельного объемного сопротивления от вида материала приведена в табл. 8 [8].

Таблица 8

Материал	Удельное объемное сопротивление, Ом · м
Бетон	$6,3 \cdot 10^5$
Ксилолит	$6,3 \cdot 10^5$
Асфальт	$10^{12}-10^{14}$
Линолеум	$10^6-10^{10}$
Поливинилиденевая плитка	$10^7-10^9$
Поливинилхлоридная плитка	$10^{12}-10^{14}$
Цементно-песчаный пол	$2,2 \cdot 10^5$
Клинкерный кирпич	$1,2 \cdot 10^5$
Керамическая плитка	$8,8 \cdot 10^5$
Березовый паркет	$6,4 \cdot 10^5$

Существенную зависимость потенциала ЭСР от объекта, получающего заряд, подтверждают также данные исследований других авторов [7, 8], результаты которых приведены в табл. 9.

Таблица 9

Объект (человек), получающий заряд	Напряжение, кВ
Идущий по полу с поливинилхлоридным покрытием	200–9000
Работающий за верстаком	100–3000
Держащий пластмассовую сумку перед верстаком	300–7000
Заполняющий приемный бункер автоматического сортировочного устройства	100–2000
Идущий по нейлоновому ковру	10000–15000
Идущий в ботинках на каучуковых подошвах	1000
Идущий по ковру в ботинках на каучуковых подошвах	14000
Идущий по полу, вымощенному плиткой, в ботинках на каучуковых подошвах	13000
Идущий по деревянному полу	800
Сидящий на рабочем месте	3000

В исследованиях [4] показана зависимость потенциала ЭСР от характеристик напольного покрытия и одежды оператора (табл. 10).

По результатам исследований авторы получили следующие зависимости величины потенциала от параметров напольного покрытия (указаны максимальные из измеренных значений плюс расширенная неопределенность):

- 2,7 кВ – фальшпол;
- 3,1 кВ – бетонное покрытие;
- 12,5 кВ – линолеум;

- 18,9 кВ – паркет, покрытый лаком.

Полученные результаты и зависимости подтверждают выводы других авторов: величина потенциала тем выше, чем больше удельное сопротивление напольного покрытия.

Таблица 10

Характеристика		Наибольший потенциал оператора, кВ
напольного покрытия	одежды и обуви оператора	
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Синтетическая одежда и обувь	30,0
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Синтетическая одежда и кожаная обувь	30,0
Обычный (виниловый) линолеум	Синтетическая одежда и обувь	15,0
Токопроводящий (бетонный) пол или антистатический линолеум	Синтетическая одежда и обувь	12,0
Обычный (виниловый) линолеум	Синтетическая одежда и кожаная обувь	8,0
Токопроводящий (бетонный) пол или антистатический линолеум	Синтетическая одежда и кожаная обувь	6,0
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Хлопчатобумажная одежда и кожаная обувь	4,0
Обычный (виниловый) линолеум	Хлопчатобумажная одежда и кожаная обувь	2,0
Токопроводящий (бетонный) пол или антистатический линолеум	Хлопчатобумажная одежда и кожаная обувь	0,5

**Зависимость потенциала ЭСР от влажности.** Результаты проведенных исследований (табл. 4–7, рис. 1–4) показывают сильную зависимость потенциала ЭСР от влажности окружающего воздуха. Такие же существенные зависимости величины потенциала ЭСР от влажности отмечены и другими авторами (например, [8]).

Как видно из [8], с увеличением влажности в от 10 до 55 % значение потенциала ЭСР уменьшается в 4–15 раз. Зависимости потенциала ЭСР для различных материалов от влажности приведены в [7, 8, 11].

**Помехоустойчивость технических средств.** Как было отмечено ранее, в результате воздействия ЭСР в работе ЭТС могут возникать различные нарушения. Для исключения появления проблем при эксплуатации ЭТС необходимо, чтобы их помехоустойчивость была выше величины воздействующих помех. Помехоустойчивость ЭТС определяется и классифицируется исходя из степени жесткости испытаний (испытательного уровня). Данные по испытательным уровням для величин ЭСР приведены в [9].

Требования к испытательному уровню ЭТС устанавливаются в зависимости от особенностей их применения, в частности от диапазонов изменения влажности, электризирующей способности материалов. Некоторые рекомендации по выбору испытательного уровня приведены в [9].

Применительно к высоковольтным подстанциям, исходя из представленных в статье материалов, можно заключить:

- в помещениях высоковольтных электрических ПС с обычными бетонными полами ЭТС будет помехоустойчиво, если его испытательный уровень составляет не менее 2;
- при применении в качестве напольного покрытия линолеума или паркета испытательный уровень ЭТС должен быть выше 2 и устанавливаться исходя из дополнительных исследований: анализа изменения влажности, применяемых материалов и их электризующей способности.

## ВЫВОДЫ

1. Разряды статического электричества являются распространенным и высоковероятным источником помех на высоковольтной электрической подстанции. Наиболее вероятной причиной появления электрических разрядов в условиях электрической ПС является электризация трением.

2. Потенциал электрических разрядов – переменная величина, которая зависит от ряда факторов: параметров трущихся поверхностей, условий трения, влажности окружающего воздуха. Степень влияния указанных факторов на потенциал ЭСР является весьма сильной: изменение влажности в диапазоне от 10 до 55 % влечет за собой изменение потенциала ЭСР до 15 крат.

3. В условиях высоковольтной электрической подстанции в помещениях закрытых распределительных устройств и релейного щита при влажности не менее 20 % на теле персонала, который ходит в кожаной обуви с резиновой подошвой, возможно возникновение потенциала ЭСР величиной до 3 кВ.

4. В случаях применения в качестве напольного покрытия в помещениях с ЭТС линолеума величина потенциала может достигать 12 кВ, а при применении покрытого лаком паркета – 18 кВ.

5. Помехоустойчивость ЭТС, применяемых в помещениях ЗРУ и РЩ с бетонным полом, обеспечивается при испытательном уровне не менее 2.

6. В случае применения в помещениях с ЭТС напольного покрытия из линолеума или паркета необходимая величина испытательного уровня будет выше 2. Необходимое конкретное значение должно анализироваться дополнительно с учетом диапазона изменения влажности, применяемых материалов и возможной величины их электризации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К р и к с и н, П. В. Заземляющее устройство подстанции – основа обеспечения электромагнитной совместимости технических средств: опыт Белорусской энергосистемы / П. В. Криксин, Н. В. Бохан // Энергия и Менеджмент. – 2011. – № 6 (63).
2. Ф у р с а н о в, М. И. Очевидные нарушения требований электромагнитной совместимости на высоковольтных электрических подстанциях: примеры и возможные последствия / М. И. Фурсанов, П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. – 2012. – № 1 (64).
3. М е т о д и ч е с к и е указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ от электромагнитных влияний и грозовых воздействий: СТП 09110.47.104–08. – Минск: БелГЭИ, 2008.

4. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства: СТО 56947007-29.240.044–2010.
5. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях: СО 34.35.311–2004.
6. Максимов, Б. К. Статическое электричество в промышленности и защита от него / Б. К. Максимов, А. А. Обух. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
7. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость / Э. Хабигер. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
8. Горлов, М. И. Статическое электричество и полупроводниковая электроника / М. И. Горлов // Природа. – 2006. – № 12.
9. Электромагнитная совместимость. – Ч. 4-2: Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам: СТБ МЭК 61000-4-2–2006.
10. Слаев, В. А. Руководство по выражению неопределенности измерения / В. А. Слаев. – СПб.: ГП ВНИИМ имени Д. И. Менделеева, 1999.
11. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам: ГОСТ Р 51317.4.2–99.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 15.05.2012

УДК 621.311

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ОДНОФАЗНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВОЗДУШНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

**Канд. тех. наук, доц. КАЛЕНТИОНОВ Е. В., магистрант МАЗУРЕК Ю. А.**

*Белорусский национальный технический университет*

Однофазные повреждения в воздушных распределительных электрических сетях составляют до 80 % от общего количества повреждений [1, 2].

В распределительных электрических сетях с изолированной нейтралью однофазное повреждение не приводит к отключению потребителей, поскольку данный аварийный режим работы не вызывает искажения величины междуфазных напряжений. Однако такой режим обладает рядом недостатков, таких как:

- образование дуговых перенапряжений в сети;
- возможность пробоя изоляции;
- возможность возникновения двойных замыканий;
- опасность электропоражения персонала, посторонних лиц и др.

Специфика режимов работы нейтрали и конструктивного исполнения линий электропередачи 6–35 кВ не позволяет одновременно выявить повреждение и селективно определить его место с помощью средств релейной защиты и автоматики. Как правило, защита от однофазных поврежде-