

МЕТОДИКА ОГРАНИЧЕНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА ОПЕРАТОРЕ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

П. С. Глазунов¹, С. С. Жуликов², Исам М. А. Абдельшафи²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», институт электроэнергетики, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 17

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2017 г.

Аннотация. Разработана методика ограничения накопления электростатического потенциала оператора до допустимого значения при обслуживании автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) для случая использования в помещениях напольных полимерных покрытий, не обладающих антистатическими свойствами. Допустимое значение потенциала установлено требованием устойчивости АСУ ТП к контактному электростатическому разряду и составляет 6 кВ. Методика позволяет определить условия эксплуатации напольного полимерного покрытия в помещении АСУ ТП: выбрать такую комбинацию значения относительной влажности воздуха и размеров открытых незаземлённых частей поверхности покрытия, при которой потенциал оператора не превысит допустимое значение. В соответствии с методикой при проведении расчётов используется экспериментальная зависимость удельного поверхностного сопротивления напольного покрытия от относительной влажности воздуха. При проектировании новых объектов следует выбирать специальные антистатические напольные покрытия, которые необходимо применять совместно с антистатической обувью (антистатическими ремешками) для обеспечения надежного электрического контакта тела оператора с поверхностью напольного полимерного покрытия. Расчёты подтвердили, что в этом случае электростатический потенциал оператора не превышает допустимое значение для оборудования АСУ ТП.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом, разряд статического электричества, электромагнитные помехи, напольное полимерное покрытие, относительная влажность воздуха.

Abstract. For the floor polymeric coverings that do not have antistatic properties, the technique of restricting accumulation of operator's electrostatic potential to admissible value was developed. This value is established by the requirement of the immunity of the automated process control system (ACS TP) to the contact electrostatic discharge. The technique allows determining the conditions of operation of the floor polymer covering in the control room: select this combination of the relative humidity of air with the dimensions of open ungrounded parts of the covering surface at which the operator's potential does not exceed the admissible value. In accordance with the technique, the dependence of the specific surface resistance of the floor covering on the relative humidity of the air is used in the calculations. When designing new objects, you should choose antistatic floor coverings that must be used in combination with antistatic shoes (antistatic straps) to ensure a reliable electrical contact between the operator's body and the surface of the flooring polymer covering. Calculations confirmed that in this case the electrostatic potential of the operator does not exceed the admissible value for the equipment of ACS TP.

Key words: automated process control system (ACS TP), the discharge of static electricity (ESD), electromagnetic disturbances, floor polymer covering, relative humidity of the air.

1. Введение

Одним из источников электромагнитных помех в диспетчерских промышленных объектов являются разряды статического электричества (СЭ). Использование в технологических помещениях напольных полимерных покрытий большой площади с высокими значениями удельного объёмного сопротивления ($\rho_v \geq 10^{12}$ Ом·м) приводит к значительной электризации, как самих покрытий, так и оперативного персонала, обслуживающего оборудование АСУ ТП. Особенно актуальной эта проблема становится в отопительный сезон. В это время

относительная влажность воздуха в отапливаемых помещениях снижается до 40%. В этот период времени наблюдается наиболее интенсивное накопление зарядов СЭ на операторе: потенциал тела человека может достигать 30 кВ. При определенных условиях между заряженным оператором и заземлёнными корпусами технологического оборудования возникают разряды СЭ [1, 2]. Во время разрядов СЭ по системе заземления распространяются импульсные помехи наносекундной длительности. Имеются многочисленные жалобы от оперативного персонала на болевые ощущения при разрядах СЭ и плохое самочувствие в результате влияния электростатических полей. Импульсные помехи, возникающие при разрядах СЭ, представляют опасность для электронной техники и часто приводят к выходу из строя транзисторов и микросхем, используемых в отдельных блоках технологического оборудования и компьютерах. С точки зрения ЭМС разряды СЭ представляют наибольшую опасность для микропроцессорных устройств [3], входящих в состав оборудования АСУ ТП. Разряды СЭ приводят к сбоям в работе АСУ ТП, нарушению управления технологическим процессом промышленного объекта, и как следствие, к огромным материальным потерям.

2. Расчётно-экспериментальная методика

В соответствии с существующими нормативными документами потенциал заряженного оператора, обслуживающего оборудование АСУ ТП (степень жесткости 3), не должен превышать 6 кВ при контактном разряде и 8 кВ при воздушном разряде [4, 5]. Наибольшую опасность представляет контактный разряд, так как при его возникновении вся энергия, накопленная в теле человека при статической электризации, передается через корпус оборудования к электронным компонентам. Поэтому в качестве предельно допустимого значения потенциала оператора будем считать потенциал равный 6 кВ.

Величина потенциала оператора зависит от целого ряда параметров, среди которых основными являются:

- интенсивность электризации, характеризуемая плотностью тока электризации j_0 (А/м²) и временем её воздействия, которая определяется ритмичностью и скоростью ходьбы человека, а также выбором контактной пары *подошва обуви - напольное покрытие*; при высокоскоростных технологических процессах $j_0=100$ мкА/м², а в обычных (бытовых) условиях $j_0 \leq 10$ мкА/м² [6];

- удельное поверхностное ρ_s (Ом) и удельное объёмное ρ_v (Ом·м) сопротивления (или удельные поверхностная $\gamma_s=1/\rho_s$ (1/Ом) и объёмная $\gamma_v=1/\rho_v$ (1/Ом·м) проводимости) и диэлектрическая проницаемость ε напольного покрытия, на поверхности которого расположен оператор; удельные поверхностное γ_s и объёмное ρ_v проводимости напольного покрытия обеспечивают диссипацию (стекание) зарядов СЭ соответственно по поверхности и через объём напольного покрытия;

- геометрические параметры напольного покрытия (длина, ширина, толщина) и его расположение относительно заземлённых металлоконструкций и предметов;

- материал обуви оператора и его электроизоляционные свойства;

- относительная влажность воздуха ψ (%), от значений которой зависят удельное поверхностное и удельное объёмное сопротивления напольного покрытия.

Общепринятыми мероприятиями, приводящими к снижению интенсивности электризации и ограничению потенциала оператора [2,3,7,8], являются:

- уменьшение удельного поверхностного сопротивления полимерного напольного покрытия путём обработки его поверхности поверхностно-активными веществами (ПАВ) или увеличением относительной влажности воздуха в помещении (для гидрофильных напольных покрытий);

- ограничение размеров незаземлённых (открытых) частей поверхности напольного покрытия;

- использование антистатических напольных покрытий;

- применение антистатической (проводящей обуви) или антистатических ремешков, закрепляемых на обычной обуви, способствующих диссипации зарядов СЭ с наэлектризованного оператора.

Основной целью работы являлась разработка расчётно-экспериментальной методики, позволяющей определить условия эксплуатации напольного покрытия: относительную влажность воздуха и размеры открытых незаземлённых участков напольного покрытия, при которых потенциал оператора не превышает предельно допустимое значение при контактном разряде на корпус оборудования АСУ ТП.

Исходное расположение оператора на поверхности полимерного напольного покрытия, соответствующее его реальному размещению между рядами заземлённых корпусов оборудования, приведено на рис.1.

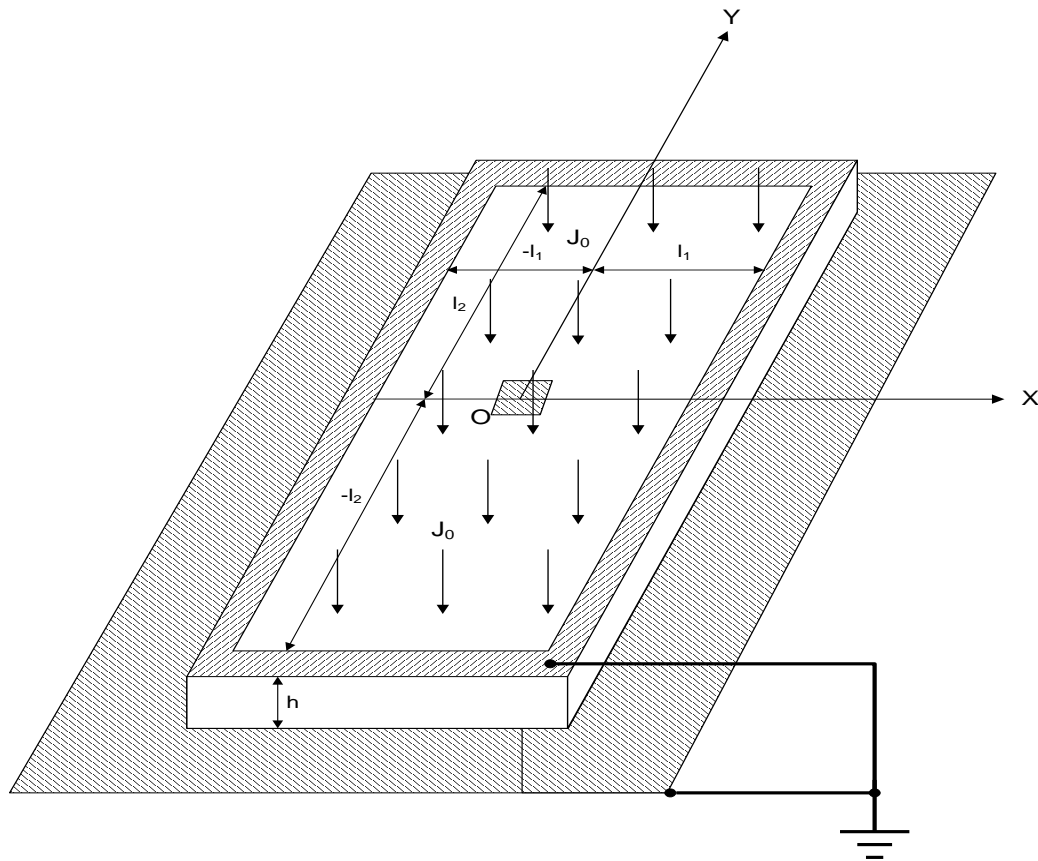


Рис.1. Исходная схема расположения оператора на поверхности полимерного напольного покрытия

Напольное покрытие размерами $2l_1 \times 2l_2$ и толщиной h размещено на заземлённой подложке (бетонном полу) и заземлено по периметру посредством заземлённых металлоконструкций. Оператор, на обуви которого закреплён антистатический ремешок, представлен проводящей плоскостью, размеры которой намного меньше размеров покрытия.

Процесс электризации напольного покрытия и находящегося на его поверхности оператора моделируется зарядкой плотностью тока j_0 , который принимался равным 10 мкА/м^2 . Для представленной модели процесса накопления заряда на операторе справедливо следующее уравнение [9]:

$$\partial U / \partial t = [h\gamma_s / \epsilon\epsilon_0] (\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2) - U\gamma_v / \epsilon\epsilon_0 + j_0 h / \epsilon\epsilon_0 \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} U(x, y, 0) &= 0 \text{ при } |x| < l_1, |y| < l_2 \\ U(-l_1, y, t) &= U(l_1, y, t) \text{ при } |y| < l_2, t > 0 \\ U(x, -l_2, t) &= U(x, l_2, t) \text{ при } |x| < l_1, t > 0 \\ J(x, y) &= j_0 = \text{const} \text{ при } |x| < l_1, |y| < l_2 \end{aligned} \quad (2)$$

где j_0 - плотность тока электризации (А/м^2), h - толщина напольного покрытия (м), γ_s - удельная поверхностная проводимость напольного покрытия ($1/\text{Ом}$), γ_v - удельная объёмная проводимость напольного покрытия ($1/\text{Ом}\cdot\text{м}$), ϵ - диэлектрическая проницаемость материала напольного покрытия; ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$, l_1, l_2 - размеры напольного покрытия (м).

Потенциал оператора достигает максимального значения в точке $O(0, 0)$ в установившемся режиме электризации, т. е. при $t \rightarrow \infty$. Решением исходного уравнения для приведенных выше условий является следующее выражение:

$$U = \frac{16j_0h}{\gamma_v\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{(2m+1)(2n+1) \left\{ 1 + h \frac{\gamma_s}{\gamma_v} \frac{\pi^2}{4} \left[\left(\frac{2m+1}{l_1} \right)^2 + \left(\frac{2n+1}{l_2} \right)^2 \right] \right\}} \quad (3)$$

Для находящихся в эксплуатации напольных полимерных покрытий, не обладающих антистатическими свойствами, рекомендуется применять увлажнение помещений и антистатические ремешки для обуви, обеспечивающие надежный контакт тела оператора с напольным покрытием. Методика заключается в расчётном определении значения относительной влажности воздуха ψ (%) и размеров (площади) напольного покрытия, при которых потенциал оператора не превысит допустимое значение. При проведении расчётов потенциала оператора использовалась экспериментально полученная зависимость удельного поверхностного сопротивления покрытия от относительной влажности воздуха (рис.2). Измерения проводились в климатической камере в соответствии с НТД [10].

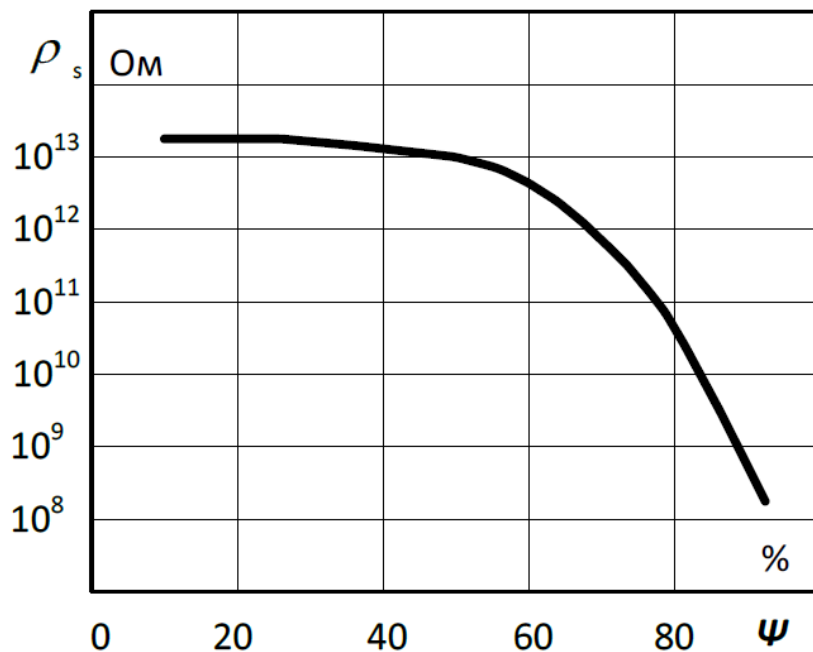


Рис.2 Зависимость удельного поверхностного сопротивления ρ_s гидрофильного напольного покрытия от относительной влажности воздуха

3. Результаты расчёта накопления зарядов статического электричества на операторе

Расчёт потенциала оператора, расположенного на поверхности напольного покрытия толщиной $h = 3$ мм в обычной обуви с антистатическим ремешком, производился с использованием программы *MATLABR2009b*. В исходную формулу введены параметры помещения АСУ ТП квадратной формы размерами $2l_1 \times 2l_2$. Максимальное значение относительной влажности воздуха при расчётах принималось равным 80 % (при температуре 25 °С) в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к условиям эксплуатации средств АСУ ТП, установленных в отдельных помещениях [11]. Результаты расчётов представлены в виде контурных графиков на рис. 3-4.

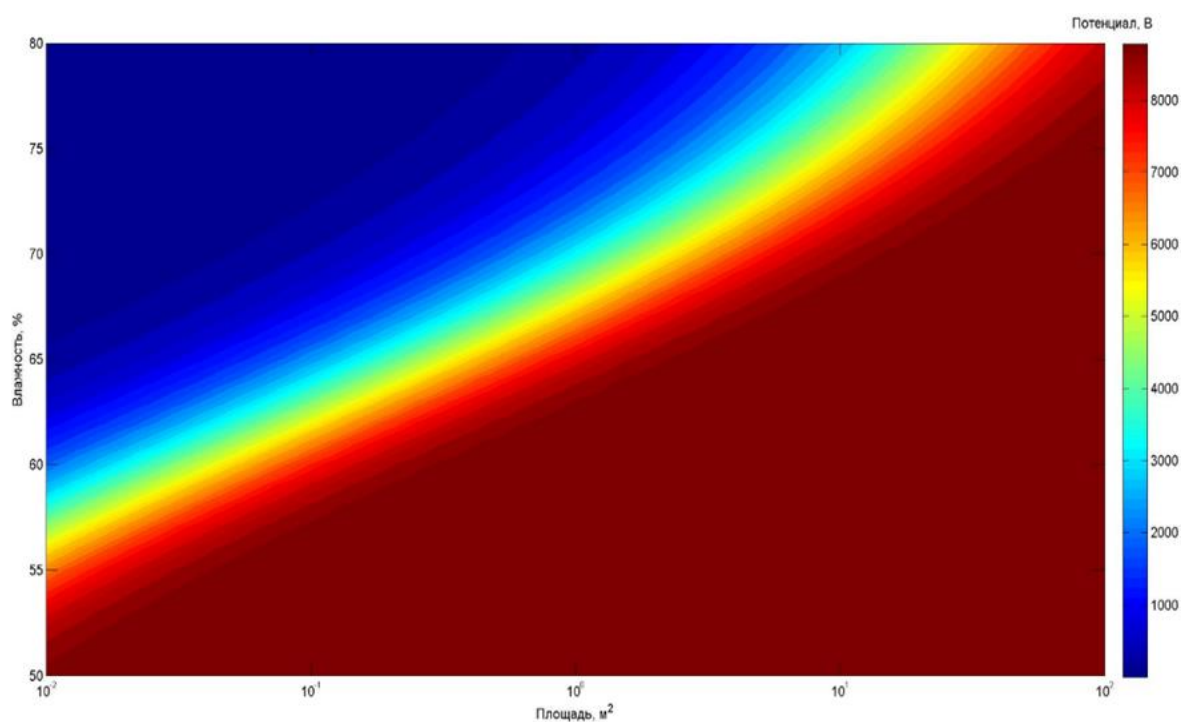


Рис.3 Контурный график зависимости потенциала оператора от площади напольного покрытия и относительной влажности воздуха

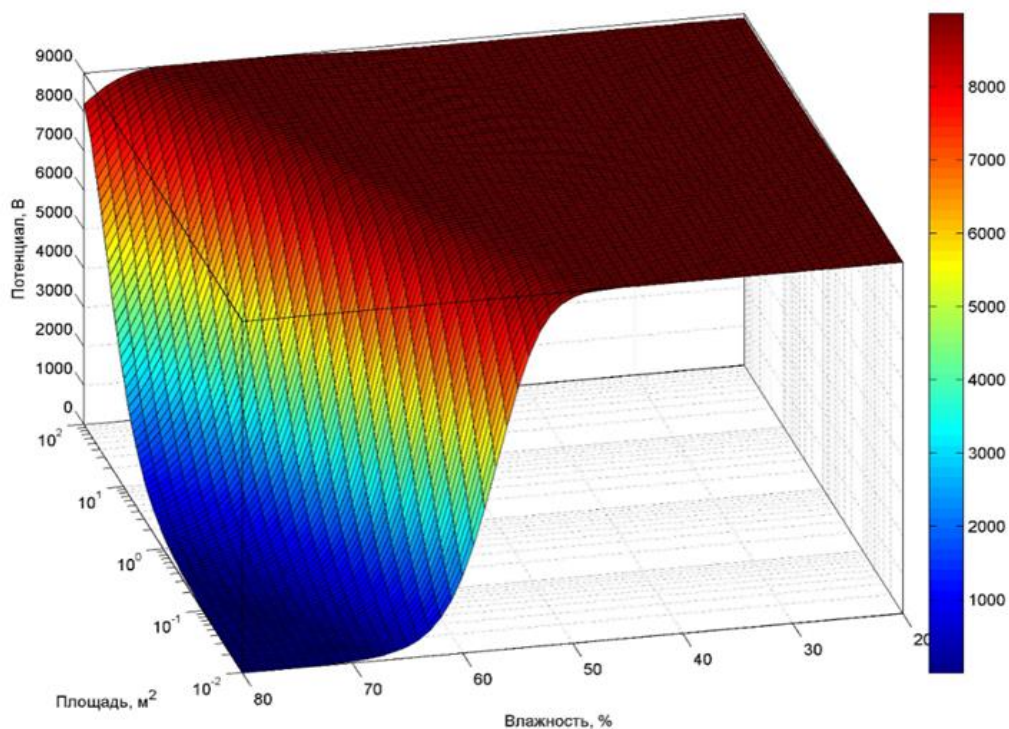


Рис. 4 Контурный 3-D график зависимости потенциала оператора от площади напольного покрытия и относительной влажности воздуха

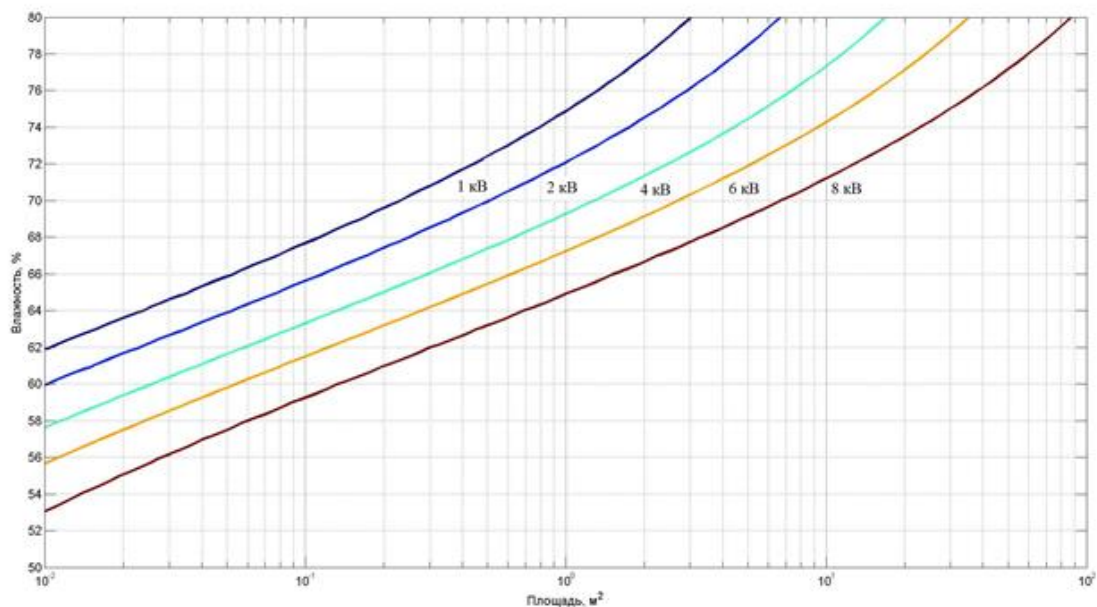


Рис. 5 График зависимости потенциала оператора от площади напольного покрытия и относительной влажности воздуха с использованием изолиний

Используя график на рис. 5, можно выбрать несколько вариантов сочетаний относительной влажности воздуха и площади напольного покрытия, при которых потенциал оператора не будет превышать 6 кВ. Например, для площади напольного покрытия 20 м^2 относительная влажность воздуха в помещении АСУ ТП должна быть более 77%. Если по каким-то причинам это невозможно сделать, то для более низких значений относительной влажности воздуха в помещении АСУ ТП необходимо реализовать метод ограничения размеров открытых незаземлённых частей напольного покрытия. При использовании второго метода на поверхность напольного покрытия наносится полупроводящая ($\rho_v = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) краска или проводящая клейкая лента [12] в виде сетки с максимально допустимыми размерами ячейки, определяемыми по изолиниям графика, представленного на рис. 5. При этом наружная окантовка покрытия должна быть заземлена посредством присоединения к заземлённым металлоконструкциям оборудования или здания. Например, при влажности воздуха 67% площадь ячейки должна составлять не более $(1 \times 1) \text{ м}^2$.

Из рис. 2, 3 следует, что при низких значениях относительной влажности воздуха (менее 50%) и больших размерах напольного полимерного покрытия (более $10 \times 10 \text{ м}^2$) контурный график имеет характерное «плато», которому соответствует предельное установившееся значение потенциала 9 кВ. Для этих условий эксплуатации определяющей является диссипация зарядов СЭ через объём полимерного покрытия, а диссипацией зарядов по его поверхности можно пренебречь. При этом потенциал оператора может быть рассчитан по формуле:

$$U(\infty) = j_0 \rho_v h = 10^{-5} \text{ А} / \text{м}^2 \cdot 3 \cdot 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 9000 \text{ В} \quad (4)$$

Для вновь проектируемых объектов в помещениях АСУ ТП следует использовать антистатические напольные покрытия, керамическую (кварцвиниловую) напольную плитку или бетонные полы с $\rho_v = (10^5 \div 10^{10}) \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в сочетании с антистатической обувью или антистатическими ремешками, создающими надёжный электрический контакт тела оператора с поверхностью напольного полимерного покрытия.

При проведении расчётов установившегося потенциала оператора ($t \rightarrow \infty$), расположенного на поверхности антистатических и полупроводящих напольных покрытий в антистатической обуви, рекомендуется использовать упрощенную формулу (4), учитывающую диссипацию зарядов СЭ только через объем напольного покрытия. При учёте диссипации зарядов по поверхности напольного покрытия расчётные значения потенциала оператора будут менее значительны, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта потенциала оператора для различных напольных покрытий и полов, обладающих антистатическими свойствами

№ п/п	Используемые материалы и их характеристики	U_{\max} допустимое, В	U_{\max} расчетное, В
1	1. Бетонные полы без покрытия $\rho_V = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 10^{-1} \text{ м}$. 2. Антистатический ремешок для обуви.	6 000	1
2	1. Напольная керамическая плитка $\rho_V = 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. 2. Антистатический ремешок для обуви.	6000	0,5
3	1. Кварц-виниловая плитка $\rho_V = 8 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. 2. Антистатический ремешок для обуви.	6000	24
4	1. Антистатический линолеум «Tarkett» $\rho_V = 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. 2. Антистатический ремешок для обуви.	6 000	20
5	1. Панельный фальшпол с антистатическим покрытием $\rho_V = 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. 2. Антистатический ремешок для обуви.	6 000	200

4. Заключение

1. Для напольных покрытий, не обладающих антистатическими свойствами (для промышленных объектов находящихся в эксплуатации), разработана

методика снижения потенциала оператора до допустимого значения, определяемого из условия соблюдения требования устойчивости АСУ ТП к разрядам СЭ:

- увеличение относительной влажности воздуха до значения, при котором потенциал оператора не превышает допустимое значение при существующей геометрии открытых незаземлённых частей поверхности напольного покрытия;

- ограничение размеров открытых незаземлённых частей поверхности напольного покрытия путем нанесения на нее полупроводящей ($\rho_v=10^6$ Ом·м) краски или проводящей клейкой ленты в виде сетки с размером ячейки, при которой потенциал оператора не превышает допустимое значение для нормируемого значения относительной влажности воздуха в помещении.

2. Для вновь проектируемых промышленных объектов в помещениях АСУ ТП рекомендуется использовать антистатические напольные покрытия, керамическую (кварц-виниловую) напольную плитку или бетонные полы со значениями удельного объёмного сопротивления, находящегося в диапазоне $10^5 \div 10^{10}$ Ом·м в сочетании с антистатической обувью или антистатическими ремешками.

3. Методика может быть рекомендована для применения на промышленных предприятиях различного назначения, использующих оборудование АСУ ТП: объектах энергетики (электрических станциях и подстанциях), металлургических и химических заводах, нефтеперекачивающих станциях.

Литература

1. Максимов Б. К., Обух А. А. Защита от статического электричества. - М.: МЭИ, 1982. - 68 с.
2. Максимов Б. К., Обух А. А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. - М.: Энергия, 1978 г. - 80 с.
3. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. - М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. - 352 с.

4. ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (МЭК 61000-4-2:2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний».
5. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний».
6. Статическое электричество в химической промышленности / Попов Б.Г., Веревкин В.Н., Бондарь В.А. и др. - Л.: Химия, 1977. - 240 с.
7. ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования».
8. Жуликов С.С. Способы ограничения зарядов статического электричества на операторе при обслуживании оборудования объектов энергетики. «Энерго-эксперт», №2, 2014 г., стр. 58-61.
9. Maksimov B. K., Zhulikov S. S., Obukh A. A. Accumulation and dissipation static electricity charges on solid dielectric surface for a wide range of bulk and surface conductivities. 7-th International Symposium on High voltage engineering (ISH'91). Electrostatics and biological effects. Dresden, 1991, p. 41-44.
10. ГОСТ 64433.3-71 «Материалы электроизоляционные твёрдые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении».
11. СТО 70238424.27.100.010-2011 «Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) ТЭС. Условия создания. Нормы и требования».
12. Проводящая клейкая лента для заземления. Fur Erdung: Leitfähiges Klebeband. // DE Elektromeister. Elektrohandwerk, 1996, т. 71, № 18.

Ссылка на статью:

П. С. Глазунов, С. С. Жуликов, Исам М. А. Абдельшафи. Методика ограничения накопления зарядов статического электричества на операторе при обслуживании автоматизированных систем управления технологическим процессом. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/3/text.pdf>