

## REFERENCES

1. Siemens W. Poggendorfs Annalen der Chemie und Physik, 1857, 102, p. 66.
2. Loeb B.L., Thompson C.M., Drago J., Takahara H., Baig S. World wide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review. Ozone: Science & Engineering, Paris, 2011, vol. 34.
3. Saveliev A., Pietsch G.J. Some properties of barrier discharges on dielectric surfaces. – Gas discharge conference. Liverpool, 2–6 September 2002.
4. Gordeyena Ye.A., Pures'yev N.I., Tarasov Yu.V., Nazarov Yu.A. *Materialy 32-go Vserossiiskogo seminar «Ozon i drugie*

*ekologicheskoye chistye oksiditeli. Nauka i tekhnologii»* (Proc. of the 32nd Alle-Russia seminar «Ozon and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology». Moscow, 2012, pp. 41–58.

5. Hoskinson A. Measurements and Simulations of Surface Dielectric Barrier Discharges as Plasma Actuators. – Madison, Wisconsin, 2012.

6. Lysov N.Yu., Pashin M.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 11, pp. 43–46.

7. Pashin M.M., Lysov N.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 12, pp. 21–26.

8. Filippov Yu.V., Voblikova V.A., Panteleyev V.I. *Elektrosintez ozona. (Ozone Electrosynthesis)*. Moscow, Moscow State University, 1987, 236 p.

\* \* \*

*Электричество, 2016, № 10, с. 35–38.*

## Эффект замедления процессов накопления и диссипации зарядов статического электричества на поверхности полимерного диэлектрика

ЖУЛИКОВ С.С.

*Рассмотрена математическая модель накопления и диссипации зарядов статического электричества (СЭ) на поверхности полимерного диэлектрика при наличии релаксационной поляризации. На практике данные диэлектрические материалы обычно расположены на токопроводящей поверхности. В качестве простого примера можно привести напольные покрытия, размещённые на бетонном полу. При моделировании принято, что нижняя поверхность диэлектрика находится в идеальном контакте с проводящей заземлённой плоскостью, на верхнюю поверхность осаждаются заряды СЭ. Для упрощения принято, что диэлектрик имеет бесконечные линейные размеры, не зависящее от напряжённости электрического поля удельное объёмное сопротивление  $\rho V_{SI} = const$ , одну функцию релаксации поляризации  $F(t - \Theta) = (1 / \tau_p) \exp[(t - \Theta) / \tau_p]$ , одинаковую по всей поверхности и не изменяющуюся во времени плотность тока электризации  $j_0 = const$ . Для практических целей при проведении оценочных расчётов максимального ожидаемого поверхностного потенциала диэлектрика можно не учитывать процессы медленной поляризации и использовать в исходном уравнении оптическую диэлектрическую проницаемость и удельное объёмное сопротивление диэлектрика, определяемое по току сквозной (остаточной) проводимости.*

*Ключевые слова: полимерный диэлектрик, статическое электричество, поверхностный потенциал, релаксационная поляризация, моделирование поверхностный потенциал диэлектрика, релаксационная поляризация*

При обслуживании технологического оборудования (ТО) в диспетчерских, на релейных щитах, аппаратных связи электрических станций и подстанций на операторе могут накапливаться заряды статического электричества (СЭ). При трении об одежду, ходьбе по напольному покрытию, вставании со стула, снятии плёночных упаковок потенциал оператора может достигать нескольких десятков киловольт. Разряды СЭ с тела оператора приводят к сбоям в работе ТО, а в некоторых случаях к повреждению отдельных его элементов, что снижает надёжность работы объекта. Оператор, как правило, расположен на поверхности полимерного напольного покрытия, уложенного на токопроводящий (бетонный) пол. Потенциал оператора зависит от многих параметров, среди которых особенно важным является способность напольного покрытия рассеивать заряды СЭ благодаря наличию

объёмной проводимости. Для прогнозирования потенциала оператора в процессе обслуживания им ТО необходимо правильно рассчитывать поверхностный потенциал напольного покрытия с учётом его основных электрофизических параметров.

Экспериментальные исследования свободной диссипации зарядов СЭ на поверхности полимерных диэлектриков, заряженных в поле коронного разряда, показали, что снижение поверхностного потенциала не подчиняется омическому закону релаксации [1, 2]. В соответствии с омическим законом снижение потенциала происходит по экспоненте с постоянной времени  $\tau$ . Одной из возможных причин нарушения омического закона является наличие в диэлектрике релаксационных (медленных) видов поляризации. Такими видами могут быть межслоевая поляризация, обусловленная неоднородной структурой диэлектрика, или ди-

полярная поляризация, характерная для полярных диэлектриков [3]. Для более детального объяснения этого явления была поставлена задача разработки математической модели накопления и диссипации зарядов СЭ на поверхности полимерного диэлектрика с учётом релаксационных видов поляризации.

При моделировании принято, что нижняя поверхность диэлектрика находится в идеальном контакте с проводящей заземлённой плоскостью, на верхнюю поверхность диэлектрика осаждаются заряды СЭ. Для упрощения принято, что диэлектрик имеет бесконечные линейные размеры, не зависящие от напряжённости электрического поля; удельное объёмное сопротивление  $\rho_{VSt} = \text{const}$ , одну функцию релаксации поляризации  $F(t - \Theta)$ , одинаковую по всей поверхности и не изменяющуюся во времени плотность тока электризации  $j_0 = \text{const}$ .

Для корректного сравнения результатов моделирования процессы накопления (аккумуляции) и диссипации зарядов СЭ были рассмотрены без учёта и с учётом релаксационной поляризации. Исходные уравнения при накоплении зарядов СЭ на поверхности диэлектрика с начальными условиями представлены в виде:

без учёта релаксационной поляризации

$$\begin{aligned} dU_{acc} / dt &= j_0 h \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 - U_{acc} / \rho_{VSt} \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0; \\ j_0 &= \text{const}; U_{acc}(0) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

с учётом релаксационной поляризации

$$\begin{aligned} dU_{p,acc} / dt &= j_0 h \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 - U_{p,acc} / \rho_{VSt} \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 - \\ & - (\varepsilon_s / \varepsilon_{\infty}) \int_0^t [F(t - \Theta) dU_{p,acc} / d\Theta] d\Theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U = \varphi_s$  – поверхностный потенциал диэлектрика, В;  $j_0$  – плотность тока электризации, А/м<sup>2</sup>;  $\rho_V$  – удельное объёмное сопротивление диэлектрика, Ом·м;  $\varepsilon_{\infty}$  – оптическая диэлектрическая проницаемость, учитывающая процессы быстрой (электронной и ионной) поляризации;  $\varepsilon_s$  – статическая диэлектрическая проницаемость [3], учитывающая процессы релаксационной (медленной) поляризации;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $h$  – толщина диэлектрика, м.

Функция релаксации поляризации

$$F(t - \Theta) = (1 / \tau_p) \exp[(t - \Theta) / \tau_p]$$

имеет постоянную времени  $\tau_p$ ; константа  $t$  представляет собой верхний предел интегрирования и определяет момент времени, начиная с которого рассчитывается изменение потенциала;  $(t - \Theta)$  – период времени, в течение которого изменяется поверхностный потенциал.

Последнее слагаемое в правой части уравнения (2) представляет собой изменение (уменьшение) поверхностного потенциала диэлектрика из-за смещения поляризационных зарядов внутри диэлектрика при накоплении на его поверхности зарядов СЭ и увеличении внешнего электрического поля. Применение данного выражения подробно рассмотрено в [4, 5].

Решения для накопления зарядов:

без учёта релаксационной поляризации

$$U_{acc}(t) = (j_0 h \rho_V) [1 - \exp(-t / \rho_V \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0)]; \quad (3)$$

с учётом релаксационной поляризации

$$\begin{aligned} U_{p,acc}(t) &= (j_0 h \tau_p / \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0) \{ [1 / AB + (1 + A) / \\ & / A(A - B)] \exp(At / \tau_p) - [(1 + B) / B(A - B)] \times \\ & \times \exp(Bt / \tau_p) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Параметры  $A$  и  $B$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A &= -1/2 \{ (\varepsilon_s / \varepsilon_{\infty} + \tau_p / \tau) + [(\varepsilon_s / \varepsilon_{\infty} + \tau_p / \tau)^2 - \\ & - 4\tau_p / \tau]^{1/2} \}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B &= -1/2 \{ (\varepsilon_s / \varepsilon_{\infty} + \tau_p / \tau) - [(\varepsilon_s / \varepsilon_{\infty} + \tau_p / \tau)^2 - \\ & - 4\tau_p / \tau]^{1/2} \}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\tau_p$  – постоянная времени релаксации поляризации;  $\tau = \rho_V \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0$  – постоянная времени диссипации зарядов на поверхности диэлектрика при отсутствии релаксационной поляризации.

При  $t = \infty$ , т.е. при бесконечно длительной электризации, получаем установившееся значение поверхностного потенциала диэлектрика:

$$U_{p,acc}(\infty) = U_{acc}(\infty) = j_0 h \rho_V. \quad (7)$$

Исходные уравнения (1) и (2) использовались для моделирования свободной диссипации зарядов со следующими начальными условиями:

$$j_0 = 0; U_{diss}(0) = U_{p,diss}(0) = j_0 h \rho_V. \quad (8)$$

Решения исходных уравнений получены в аналитическом виде:

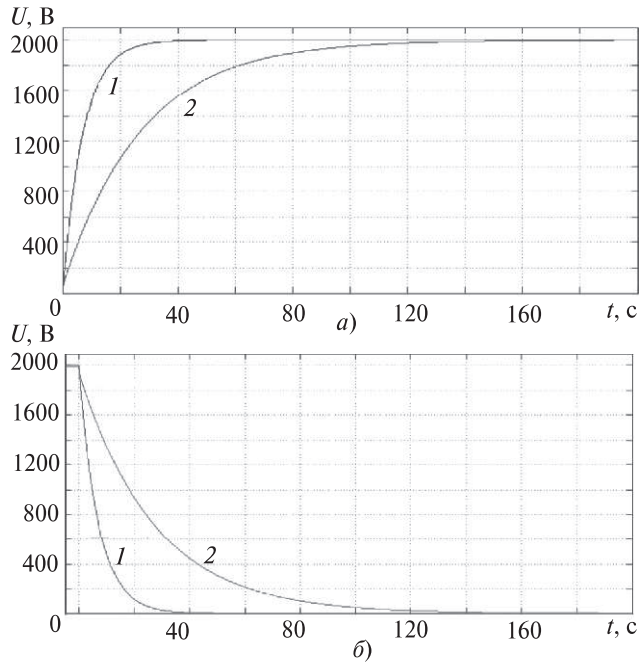
без учёта релаксационной поляризации

$$U_{diss}(t) = (j_0 h \rho_V) \exp(-t / \rho_V \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0); \quad (9)$$

с учётом релаксационной поляризации

$$\begin{aligned} U_{p,diss}(t) &= (j_0 h \rho_V) \{ [1 / (A - B)] [(1 + B) A \exp(Bt / \tau_p) - \\ & - (1 + A) B \exp(At / \tau_p)] \}. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 1,а приведены расчётные кривые изменения поверхностного потенциала диэлектрика при накоплении зарядов на его поверхности с учётом и без учёта процессов релаксационной поляризации.



**Рис. 1.** Характерные кривые изменения поверхностного потенциала диэлектрика при накоплении зарядов на его поверхности (а) и при диссипации зарядов на его поверхности (б): 1 — без учёта релаксационной поляризации; 2 — с учётом

Как следует из рис. 1,а, при накоплении зарядов наиболее опасным, с точки зрения возникновения разрядов СЭ, является процесс, которому соответствует кривая 1 (наиболее быстрое увеличение поверхностного потенциала).

На рис. 1,б приведены расчётные кривые изменения поверхностного потенциала диэлектрика при свободной диссипации зарядов на его поверхности с учётом и без учёта процессов релаксационной поляризации. При диссипации зарядов наиболее опасным является процесс, которому соответствует кривая 2 (наиболее медленное снижение поверхностного потенциала).

Эффект замедления можно объяснить тем, что в процессе электризации часть осаждаемых на поверхность свободных зарядов связывается с поляризованными внутри диэлектрика зарядами противоположной полярности. Данный процесс происходит не мгновенно, а с некоторым замедлением, определяемым постоянной времени релаксации поляризации  $\tau_p$ . В процессе накопления зарядов релаксационная поляризация действует в сторону ослабления напряжённости электрического поля внутри диэлектрика и снижения его поверхностного потенциала.

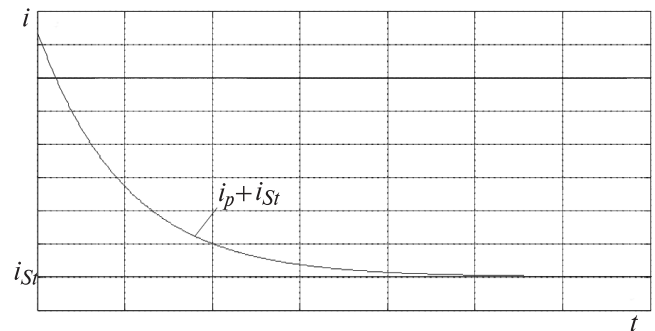
При свободной диссипации ( $j_0 = 0$ ) происходит уменьшение избыточных зарядов на поверхности за счёт наличия свободных носителей в диэлектрике (тока проводимости) и снижение потенциала диэлектрика. Поляризованные в диэлектрике заряды с замедлением реагируют на снижение потенциала и возвращаются в исходное нейтральное со-

стояние, высвобождая при этом связанные на поверхности заряды. При диссипации зарядов релаксационная (медленная) поляризация действует в сторону увеличения напряжённости электрического поля внутри диэлектрика и увеличения его поверхностного потенциала.

Значение установившегося поверхностного потенциала диэлектрика определяется количеством избыточных (не связанных) зарядов на поверхности диэлектрика и зависит от соотношения плотности тока электризации  $j_0$  и сквозной (стационарной) проводимости диэлектрика  $\gamma_{VS_t} = 1/\rho_{VS_t}$ :

$$U_{p.acc}(\infty) = U_{acc}(\infty) = j_0 h \rho_{VS_t}$$

Для практических целей при проведении оценочных расчётов максимального ожидаемого поверхностного потенциала диэлектрика можно не учитывать релаксационные виды поляризации, используя в исходном уравнении оптическую диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_\infty$  и удельное объёмное сопротивление диэлектрика  $\rho_{VS_t}$ , определяемое по сквозному току проводимости  $i_{S_t}$ , протекающему через диэлектрик после завершения поляризационных процессов (рис. 2).



**Рис. 2.** Характерная кривая изменения тока в цепи измерительного прибора после подачи на образец диэлектрика напряжения постоянного тока при наличии релаксационной поляризации в диэлектрике

**Заключение.** Анализ полученных аналитических решений позволил сделать следующие выводы о влиянии релаксационной поляризации на изменение поверхностного потенциала диэлектрика в процессе накопления и диссипации зарядов:

при накоплении зарядов релаксационная поляризация замедляет скорость увеличения поверхностного потенциала диэлектрика по сравнению с омическим законом;

при свободной диссипации зарядов релаксационная поляризация замедляет скорость снижения поверхностного потенциала диэлектрика по сравнению с омическим законом;

степень замедления скорости накопления и диссипации зарядов зависит от соотношения значений статической  $\epsilon_s$  и оптической  $\epsilon_\infty$  диэлектри-



ческих проницаемостей и значения постоянной времени релаксации поляризации  $\tau_p$ ;

релаксационная поляризация не оказывает влияния на значение установившегося (при  $t = \infty$ ) поверхностного потенциала диэлектрика при накоплении зарядов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksimov, V.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 Intern. Symposium on High voltage engineering (ISH'91). Electrostatics and biological effects. Dresden, 1991, pp. 41–44.

2. Страхов Ю.А., Тихонов А.В., Жуликов С.С. Экспериментальная установка для исследования электростатических свойств твёрдых диэлектрических материалов. — Сб. научных трудов Московского энергетического института, 1987, № 124, с. 100–106.

3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1985, 304 с.

4. Скнави Г.И. Физика диэлектриков. — М.; Л.: Госиздат, 1949, 500 с.

5. Фрелих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960, 251 с.

*Автор: Жуликов Сергей Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1981 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском техническом университете связи и информатики «Разработка методов и технических средств для решения проблем электромагнитной совместимости на объектах связи». Доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 10, pp. 35–38.*

## The Effect of Slowing the Processes of Accumulation and Dissipation the Charges of Static Electricity on the Surface of Polymer Dielectric

ZHULIKOV Sergei Sergeyeovich (National Research University «MPEI», Moscow, Russia) — Senior Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)

*Paper considers mathematical model of static electricity SE charge accumulation and dissipation on polymer dielectric surface when relaxation polarization is present. In practice dielectrics under consideration lie on conductive material. Simple example represents floor revetment lying on concrete floor. It was assumed in model that bottom dielectric surface has ideal contact with conducting grounding plane while upper surface of dielectric gain ES charge. To simplify we assumed that dielectric has infinite linear dimensions, its volume resistance does not depend on electrical field strength ( $\rho_{VS} = \text{const}$ ), dielectric has single polarization relaxation function  $F(t - \Theta) = (1 / \tau_p) \exp[(t - \Theta) / \tau_p]$  and electrostatic charging current density  $j_0$  constant through entire dielectric area and unvarying with time. In practice when estimation is made of maximum expected dielectric surface potential one cannot consider relaxation polarization and can use, in initial equation, optical permittivity and volume resistivity of dielectric defined by stationary conductivity current.*

**Key words:** *polymer dielectric, static electricity surface potential, relaxation polarization, made simulation*

#### REFERENCES

1. Maksimov, V.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 Intern. Symposium on High voltage engineering (ISH'91). Electrostatics and biological effects. Dresden, 1991, pp. 41–44.

2. Strakhov Yu.A., Tikhonov A.V., Zhulikov S.S. *Sbornik nauchnykh trudov Moskovskogo energeticheskogo instituta — in Russ. (Collection of scientific papers of the Moscow Power Engineering Institute)*, 1987, No. 124, pp. 100–106.

3. Bogoroditskii N.P., Pasyнков V.V., Tareyev B.M. *Elektrotekhnicheskiye materialy: Uchebnyk dlya vuzov (Electrotechnical materials)*. Leningrad, Publ. Energoatomizdat, 1985, 304 p.

4. Scanavi G.I. *Fizika dielektrikov (Physics of Dielectrics)*. Moscow, Leningrad, Publ. Gosizdat, 1949, 500 p.

5. Frelikh G. *Teoriya dielektrikov. Dielektricheskaya pronitsayemost' i dielektricheskiye poteri (The theory of dielectrics. The dielectric constant and dielectric losses)*. Moscow. Publ. «Inostrannaya literatura», 1960, 251 p.