

Современные кабели должны предусматривать применение стекол высокой прозрачности и однородности, а там, где это необходимо, должен применяться кварцевые структуры высокой степени очистки. Полученные таким путем оптические волокна обладают необходимым показателем преломления. Они позволяют нести световой поток и поддерживать его направление, применяя свойство полного внутреннего отражения от оплетки кабеля. Однако помехи – предметы, которые могут соприкоснуться с ВОЛС в процессе монтажа или прокладки в шахтах и трубах, нарушают показатели преломления и отражения и могут исказить передачу сигнала по ВОЛС. Современные оптические кабели выполняются в виде прозрачной (как правило, кварцевой) сердцевины, которая окружена стеклянной оболочкой с несколько меньшим значением показателя преломления. Потоки световых лучей, используемые для передачи сигналов, направляются в сердцевине, полностью внутренне отражаясь при приближении к границам волокна. На рисунке 1 представлено модель внутренней части двухслойного волокна. Кроме сердцевины с показателем преломления  $n_1$  и коаксиальной оболочки с показателем  $n_2$  здесь присутствует вторая оболочка-оплетка. Оплетка осуществляет предохранение и защиту волокна и служит поглотителем света, падающего извне ВОЛС. Оплетка обладает правильно выбранными коэффициентами преломления и поглощения. Она может препятствовать перекрестной связи с другими волокнами в связке. Оплетка может также подавлять паразитную интерференцию со

световыми лучами, выходящими из сердцевины волокна без отражения от внешней границы оболочки, они поглощаются оплеткой. На рисунке 1 показаны световые потоки, которые порождаются точечным источником, находящимся на оси волокна. Луч, падающий в сердцевину кабеля, является меридиональным. Такой меридиональный луч, падающий из свободного пространства с показателем преломления  $n = 1$  под углом  $\theta_0$  к оси, преломляется при вхождении в сердцевину и распространяется в ней под углом  $\theta$ . Из закона Снеллиуса, учтенного в уравнении Эйконала:

$$\sin\theta_0 = (n_2/n_0)\sin\theta = n_2\sin\theta.$$

До тех пор, пока угол  $\theta$  остается меньше предельного угла  $\theta_{0c}$  полного внутреннего отражения от границы сердцевина – оболочка, определяемого соотношением

$$\cos\theta_{0c} = n_2/n_1,$$

сердцевина волокна будет удерживать этот луч. Следовательно, меридиональные лучи, которые падают на переднюю поверхность волоконной сердцевины под углом  $\theta_{0c}$  и более могут служить основой для применения в технических средствах осуществляющих НСД к ОВ.

#### Литература

1. Utex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.utex-telecom.ru>analytics/engineering-fiber-optic](http://www.utex-telecom.ru>analytics/engineering-fiber-optic).
2. Воздушный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.consultant.ru/popular/air/](http://www.consultant.ru/popular/air/).

УДК 621.38

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ В ПРОЦЕССЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Микитевич В.А., Борбат М.С., Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе рассмотрены некоторые эффекты накопления заряда в диэлектрическом материале в процессе внешнего воздействия. Приводятся результаты и обсуждение экспериментальных исследований особенностей распределения поверхностного электростатического потенциала образца волокнисто-пористого политетрафторэтилена, полученного методом лазерной абляции.

**Ключевые слова:** поверхность, поверхностный электростатический заряд, зарядочувствительный зонд.

### ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CHARGE ACCUMULATION IN DIELECTRIC MATERIAL DURING EXTERNAL INFLUENCE

Mikitsevich V., Borbat M., Pantsialeu K., Vorobey R., Zharin A.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The paper reviews some of the effects of charge accumulation in a dielectric material during external influences. The results and discussion of experimental studies of the distribution features of the surface electrostatic potential of a sample of fibrous porous polytetrafluoroethylene obtained by laser ablation are presented.

**Key words:** surface, surface electrostatic charge, charge-sensitive probe.

*Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by*

**Введение.** В последние два десятилетия наблюдается высокий интерес к изучению электростатики твердых диэлектриков, что подтверждается значительным ростом доли публикаций в

данной области. Получение новых знаний о электрофизических и, в частности, о электростатических свойствах материалов стало возможным благодаря появлению новых экспериментальных

инструментов, таких как сканирующие зондовые микроскопы и сканирующие электроды [1], которые позволяют получать двух- и трехмерные карты распределения потенциала, заряда, емкости, проводимости и др. характеристик поверхности твердых тел. Еще одним фактором, способствующим получению новых и уточнению существующих знаний, стало распространение таких экспериментальных инструментов, как бесконтактные электростатические и зарядочувствительные зонды [2–4], измеряющие электростатический потенциал поверхности.

Новые открытия в электростатике способствуют повышению точности описания различных связанных эффектов. Так, например, в последние годы широко стало приниматься во внимание положение о том, что макроскопические системы в равновесных или квазиравновесных состояниях могут нести избыточный заряд, создавая, конечный электрический потенциал на близком расстоянии от тела [5]. Карты распределения потенциала, полученные на диэлектрических материалах в макро- и микро- масштабе [6], показали, что распределение поверхностного потенциала (заряда) неоднородно, и часто соответствует распределению с фрактальными узорами, что поставило под сомнение одну из ключевых теорий о трибоэлектрическом ряде. Концептуальным изменением является признание роли ионов, как носителей заряда, что позволило рассматривать и описывать «пространственный заряд» с точки зрения ионов и электронов.

**Эффекты накопления заряда в твердых диэлектриках.** Хорошо известно, что заряды могут образовываться в диэлектриках после механического воздействия, путем имплантации либо путем захвата в рамках механизмов релаксации. Свободная энергия механически напряженных твердых тел выше, чем в релаксированном состоянии, и избыток механической или упругой энергии может привести к структурным дефектам, особенно дислокационного типа [7]. При достаточно больших градиентах химического потенциала, избыточная энергия может спровоцировать образование трибоплазмы. В дальнейшем частицы трибоплазмы развиваются через множество параллельных и последовательных реакций, происходящих на поверхности, а также внутри твердого тела.

Зарядение образцов в электронных микроскопах и фотоэлектронных спектрометрах хорошо знакомо тем, кто использует эти методы. Для предотвращения нежелательных эффектов электризации принимаются специальные меры. Например, образцы для сканирующей электронной микроскопии часто покрывают тонкими пленками из проводящих материалов. Фотоэлектронные спектрометры обычно снабжены устройствами ионного заполнения, чтобы избежать накопления заряда на диэлектрических образцах, которое вносит ошибки в энергетическую шкалу полученных спектров.

Заряженные частицы производят механохимические, радиационные или лучевые реакции. В результате эффекты накопления заряда наблюдаются в большинстве случаев при воздействии проникающего излучения [8]. Например, образование свободных радикалов при разрыве химических связей сопровождается реакциями переноса электрона, приводящими к образованию заряженных частиц [9]. Таким образом, результатом может быть один или несколько различных физических эффектов: микроэлектростатические разряды, триболюминесценция, фоновое и тепловое распространение.

Следует отметить, что данные эффекты характерны не только диэлектрикам. Многие металлы покрыты слоем оксида с низкой собственной проводимостью, т. е. диэлектрическим слоем, изолирующим металлическое тело.

**Приборы и методы экспериментальных исследований.** В качестве средств измерений использована сканирующая модификация микропроцессорного зарядочувствительного зонда, разработанного в БНТУ [10; 11].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведены экспериментальные исследования распределения поверхностного электростатического потенциала образца волокнисто-пористого ПТФЭ, полученного методом лазерной абляции. Как известно волокнисто-пористый ПТФЭ не является электрически активным материалом, однако исследования распределения поверхностного потенциала (рисунок 1) показали, что отдельные локальные области поверхности, несут заряды разных знаков. Вероятно, накопление заряда происходит в процессе получения материала, который изначально закреплен на жесткой подложке. При отрыве слоя вспененного ПТФЭ от подложки происходит его зарядение. Результаты картирования распределения поверхностного потенциала, показывают воспроизводимость результатов измерения в отдельных локальных точках поверхности. Таким образом, приобретенный в процессе отрыва волокна от подложки поверхностный заряд достаточно устойчив, что связано с наличием на поверхности волокон электронных ловушек в виде свободных радикалов, образованных под воздействием лазерного излучения.

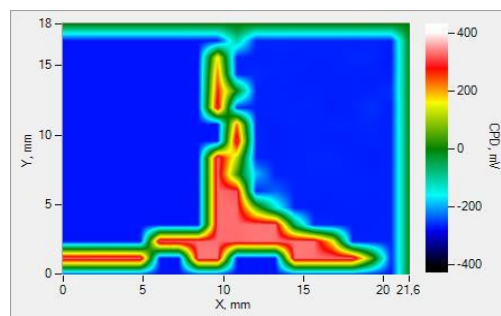


Рисунок 1 – Карта распределения поверхностного электростатического потенциала волокнисто-пористого ПТФЭ

**Заключение.** Для исследования механизмов заряжения поверхности диэлектрических материалов под действием внешних факторов разработаны требования и методика подготовки образцов, для обеспечения более высокого уровня чистоты экспериментальных исследований, исключая влияние факторов спонтанной электризации. Теоретически обоснованы режимы дополнительного внешнего воздействия лазерным облучением, для отработки методики контроля технологических режимов производства специальных материалов с заданными свойствами.

#### Литература

1. Measurements of electrostatic potentials and electric fields in some industrial environments / P. Llovera [et al.] // *J. Electrostat.* – 2009. – Vol. 67. – P. 457–461.
2. Пантелеев, К.В. Методы сканирующей зондовой электрометрии в исследовании свойств диэлектрических материалов / К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин // *Перспективные материалы и технологии: монография* / С.М. Алдошин [и др.] ; под ред. В.В. Рубаника. – Минск : Изд. центр БГУ, 2021. – С. 125–139.
3. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. *Informatics* / K. Pantsialeuev [et al.] // *Control, Measurement in Economy and Environmental Protection.* – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.

4. Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods / V.A. Pilipenko [et al.] // *Devices and Methods of Measurements.* – 2017. – V. 8, № 4. – P. 344–356.
5. Patterns of Electrostatic Charge and Discharge in Contact Electrification / S.W. Thomas [et al.] // *Angewandte Chemie.* – 2008. – Vol. 120, iss. 35. – P. 6756–6758.
6. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics / A. Galembeck [et al.] // *Polymer.* – 2001. – Vol. 42. – P. 4845–4851.
7. Vasiliu-Oprea, C. Macromolecular mechanochemistry: polymer mechanochemistry / C. Vasiliu-Oprea, F. Dan // *Cambridge International Science.* – 2006. – 390 p.
8. Gross, B. Radiation-induced charge storage and polarization effects, Chapter 4. – In: Sessler GM (ed) *Electrets, topics in applied physics*, 1987. – Berlin: Springer.
9. Burgo, T.A.L. Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces / T.A.L. Burgo, T.R.D. Ducati // *Langmuir*, 2012. – Vol. 28. – P. 7407–7416.
10. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик / В.А. Микитевич [и др.] // *Приборы и методы измерений.* – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.
11. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // *Приборы и методы измерений.* – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

УДК 621.313.333.2

## ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕИСПРОВНОСТЯМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ИХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Мирош Д.В., Громыко И.Л.

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Электропривод с асинхронным двигателем (далее АЭД) обладает простой конструкцией, высокой надежностью и сравнительно небольшой стоимостью. Низковольтные АЭД – наиболее распространенный и широко применяющийся тип электрических машин. В связи с этим вопрос о повышении качества и надежности этих устройств имеет на сегодняшний день важное значение.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, диагностика, неисправности, ремонт, электрические машины.

## FUNDAMENTALS OF PROCESSES LEADING TO ASYNCHRONOUS MOTOR MALFUNCTIONS AND METHODS OF THEIR DIAGNOSIS

Mirosh D.V., Gromyko I.L.

*Belarusian State University of Transport  
Gomel, Republic of Belarus*

**Abstract.** An electric drive with an asynchronous motor (hereinafter referred to as AED) has a simple design, high reliability and relatively low cost. Low-voltage AEDs are the most common and widely used type of electric machines. In this regard, the issue of improving the quality and reliability of these devices is of great importance today.

**Key words:** asynchronous electric motor, diagnostics, malfunctions, repairs, electric machines.

*Адрес для переписки: Мирош Д.В., ул. Кирова, 34, г. Гомель, 246653, Республика Беларусь  
e-mail: dimamiroshheat@gmail.com*

Исследование многообразия процессов, приводящих к неисправностям любой электрической машины неизбежно вытекает всего из двух основных: механических и электрических неисправностей. В некоторых случаях также отмечают моральный вид износа, что обусловлено появлением

нового оборудования и заметным падением технико-экономических показателей старого.

Для асинхронных электродвигателей механический износ возникает главным образом в подшипниковых узлах, так как эта часть электродвигателя является связующим звеном между статором и