



## ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ

*В работе описаны условия возникновения и механизмы воздействия частичных разрядов на высоковольтную изоляцию электротехнического оборудования. Представлены преимущества диагностики и контроля состояния электроизоляционной системы высоковольтного оборудования путем измерения частичных разрядов. Показаны причины и проявления разрушающего действия разрядов в трансформаторах, генераторах, кабелях, в том числе кабелях с бумажно-пропитанной и полиэтиленовой изоляцией. Дано описание подходов и основных результатов компьютерного моделирования электроразрядных и тепловых процессов при протекании частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей.*

Эксплуатационная надежность, безопасность и срок службы высоковольтного оборудования в значительной степени определяются состоянием его электроизоляционной системы. В период создания и освоения такого оборудования отечественная и зарубежная практика столкнулась с явлением частичных разрядов (ЧР) как фактором влияния на снижение электрической прочности изоляции, причину повреждения оборудования. Первые такие сведения о ЧР появились в 30-х годах прошлого столетия. Необходимым стало изучение разрядов с целью максимального их устранения, снижения их интенсивности в изоляции электрических машин и кабелей. Первые сообщения о результатах применения электрического метода измерения частичных разрядов появились в конце 30-х годов, а в 50-х — 60-х годах уже широко исследовалось разрушительное действие разрядов в генераторах, электрических двигателях и трансформаторах высокого напряжения.

В настоящее время проблема частичных разрядов достаточно актуальна. Частичные разряды относятся к основным причинам повреждения оборудования высокого напряжения, включая трансформаторы, автотрансформаторы, шунтирующие реакторы, выключатели, разъединители, силовые электрические конденсаторы, а также двигатели, генераторы и кабели [6, 8]. Объясняется это тем, что появление частичных разрядов является начальной стадией развития большинства дефектов в высоковольтной изоляции, в том числе различных неоднородностей, посторонних примесей и загрязнений, газовых полостей, мест растрескивания, расслоения изоляции, зон увлажнения. Такие дефекты образуются в неоднородной структуре изоляции, как правило, в результате нарушения процесса ее изготовления и при эксплуатации оборудования (под влиянием механических воздействий, деформации, вибрации, т. п.).

Под действием ЧР начинается разрушение

изоляции, размер дефектной области и интенсивность разрядов увеличивается. По мере развития дефекта растет и энерговыделение в его зоне. Деградация изоляции ускоряется за счет термических процессов. Расширение дефектной области приводит к возрастанию напряженности поля в изоляционном промежутке и, когда зона с дефектом достигает больших размеров, становится возможным пробой изоляции. Развитие таких процессов проиллюстрировано на Рис. 1 на примере полиэтиленовой изоляции кабеля, в которой из полости образуется древовидная структура — водный триинг. Отметим, что процесс развития дефектов от зародышевой стадии до полного пробоя может длиться годами. К примеру, длительность и предпосылки образования и распространения водных триингов в полиэтиленовой изоляции отображены на Рис. 2 [10, 20].

Водные триинги растут относительно быстро, их рост сопровождается локальным выделением и рассеянием энергии за счет того, что в ветвях триингов развиваются частичные разряды. Под действием электрического поля и ЧР триинги увеличиваются в размерах и количестве, тем самым увеличивая степень деградации полимерного материала.

Согласно [1, 7] частичными разрядами являются локализованные электрические разряды, частично шунтирующие изоляцию между проводниками и, которые могут возникать как в прилегающих, так и в неприлегающих к проводнику объемах изоляции. Частичные разряды являются в основном следствием локальной концентрации перенапряжений в изоляции или на ее поверхности. Разряды возникают в местах с повышенной напряженностью электрического поля и, соответственно, пониженной электрической прочностью. Развиваются они под действием приложенного напряжения и распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Обычно, продолжительность таких разрядов составляет всего единицы—десятки наносекунд.

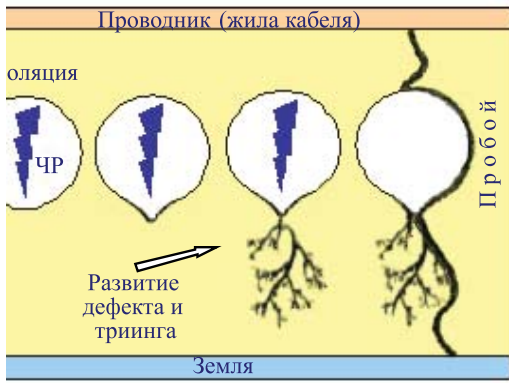


Рис. 1. Эволюция распространения дефекта с последующим пробоем полиэтиленовой изоляции



Рис. 2. Механизмы, приводящие к разрушению и пробоев изоляции, с отображением шкалы времени развития процессов [10] и фотографии водных трингов на вставках [20]

Частичные разряды возникают в неоднородном диэлектрике при определенных условиях [4, 5], а именно при переменном внешнем поле в случае достижения некоторой критической величины напряженности электрического поля (или напряжения). При напряжении меньше такой критической величины разряды отсутствуют, и длительное воздействие напряжения не приводит к сокращению срока службы изоляции. В таком случае, чем выше критическое напряже-

ние, тем выше допустимое для изоляции длительное действующее рабочее напряжение.

Отметим, что, например, для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена максимальные значения рабочей напряженности электрического поля зависят от уровня напряжения кабеля. Так, согласно [19] такие значения напряженности поля для кабелей среднего напряжения достигают до 4 кВ/мм, для кабелей высокого на-

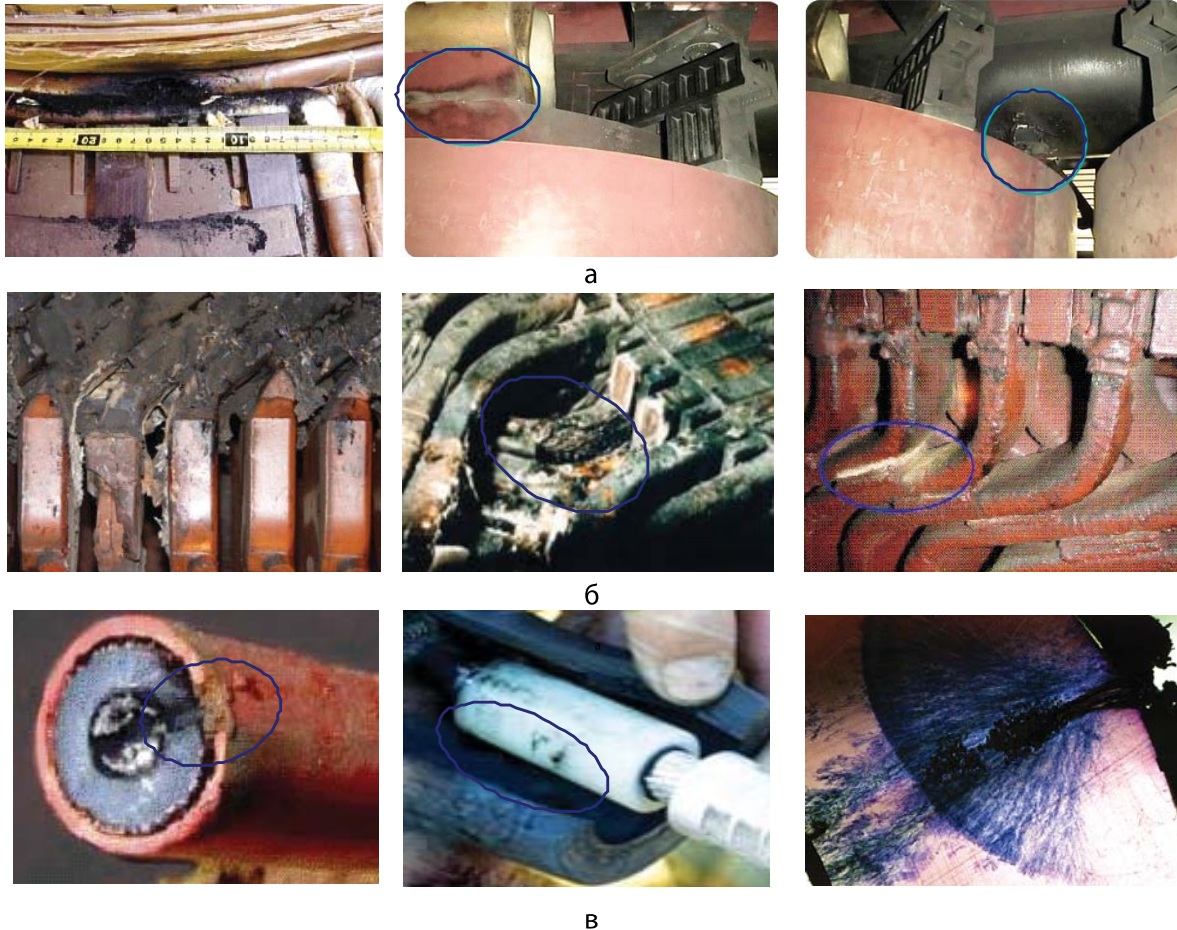
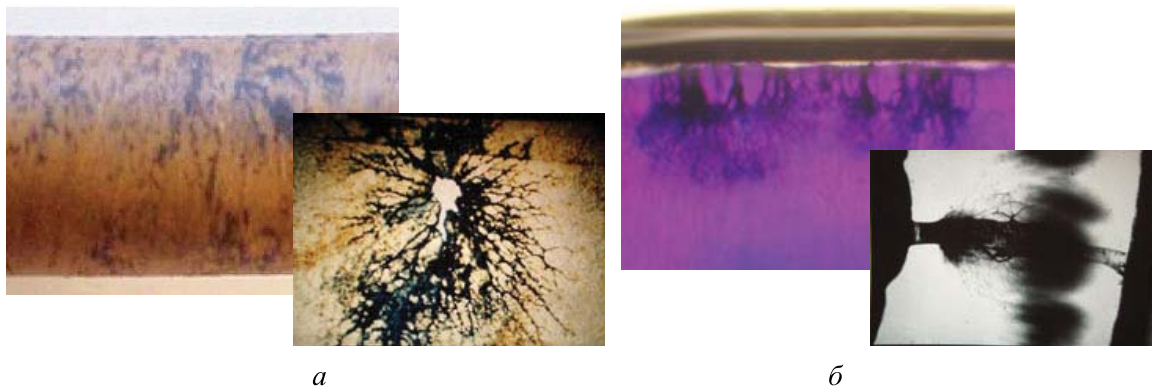


Рис. 3. Изменения и разрушения от частичных разрядов а – в трансформаторах [14, 17]; б – в генераторах [11, 12]; в – в силовых кабелях с полиэтиленовой изоляцией [2, 13].





**Рис. 4.** Разрушение изоляции кабелей вследствие частичных разрядов: *а* — в бумажно-пропитанной изоляции [2, 15]; *б* — в полиэтиленовой изоляции [15, 16]

пряжения — до 6 кВ/мм, для кабелей сверхвысокого напряжения (выше 110 кВ) — до 12 кВ/мм.

Наибольшую опасность представляют ЧР в газовых включениях, так как в этом случае они возникают при меньших напряжениях, чем в жидких компонентах и твердых инородных включениях в изоляции. Это связано с меньшей диэлектрической проницаемостью газового промежутка и, соответственно, с большей напряженностью электрического поля в нем, а также с малой электрической прочностью газа по сравнению с твердыми и жидкими составляющими изоляции.

Частичные разряды опасны кумулятивным эффектом, выраженным в накоплении микроразрушений изоляции при каждом разряде, распространении дефектов и, как результат, в возможном электрическом пробое всей изоляционной конструкции. К тому же, возникшие ЧР со време-

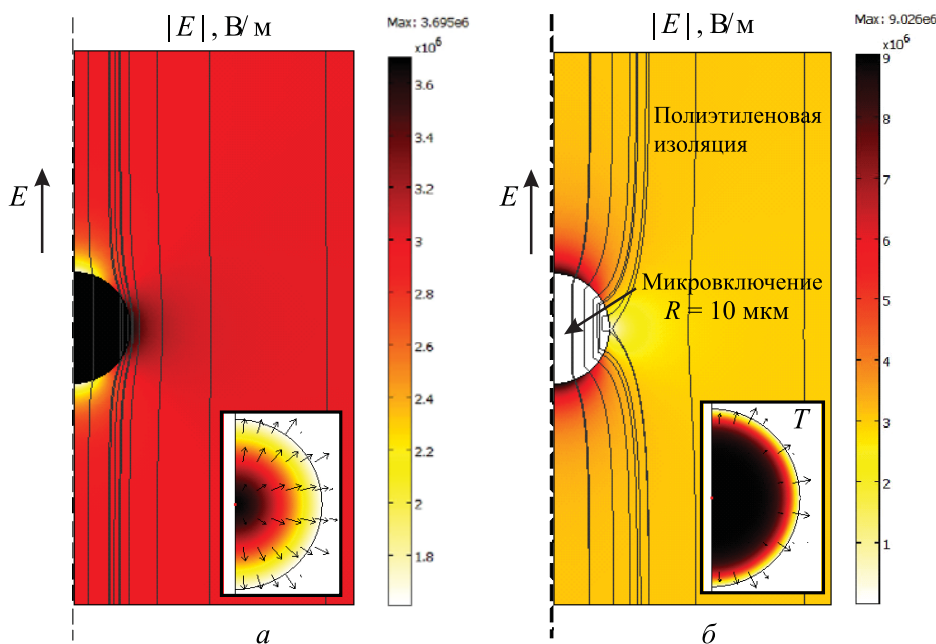
нем могут перерасти в искровые и дуговые разряды, приводить не только к пробое изоляции, но к аварийным ситуациям и отключениям оборудования.

Таким образом, частичные разряды опасны тем, что приводят к постепенному разрушению изоляции, возникновению электрического пробоя. С другой стороны, явление ЧР используется как средство диагностики состояния изоляции и контроля развития локальных дефектов в ее объеме. С целью диагностики высоковольтной изоляции проводится измерение уровня ЧР, определяются их параметры (такие, как кажущийся заряд, частота следования импульсов, частота повторения импульсов, фазный угол и время распространения импульса ЧР, средний ток и мощность ЧР, напряжение возникновения частичных разрядов и др.)

Диагностические методы с использованием ЧР основаны на следующих фактах:

- 1) появление ЧР свидетельствует о наличии дефекта в изоляции;
- 2) разряды достигают обнаруживаемого уровня на самой ранней стадии развития дефекта.

Как правило, измерение ЧР проводится в процессе нормальной работы оборудования без вывода его из эксплуатации, без кратковременного отключения и не оказывает разрушающего воздействия на изоляцию. Отметим также, что измерение ЧР при стендовых испытаниях высоковольтного оборудования



**Рис. 5.** Распределение электрического поля в области с 1/2 включения (в силу симметрии) — показано в оттенках цвета и расположение силовых линий электрического поля: *а* — до протекания частичного разряда; *б* — в случае прохождения частичного разряда. На вставках справа внизу показано распределение температуры во включении (в цвете) и векторы теплового потока (стрелками)



является основным методом диагностики изоляции и проводится во всех высоковольтных лабораториях мира.

Основной задачей диагностики электротехнического оборудования по ЧР является продление срока службы оборудования вплоть до полной выработки его реального ресурса. Важно, что методы измерения ЧР позволяют выявлять дефекты изоляции на первых стадиях их возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность дальнейшей безопасной и эффективной эксплуатации.

Целями измерения ЧР в изоляции высоковольтного оборудования являются:

- уточнение состояния оборудования с признаками понижения электрической прочности изоляции (увлажнение, загрязнение и др.);

- нахождение участков с возможными повреждениями, мест с ухудшенным состоянием изоляции для их замены;

- точное определение мест развития ЧР (разряды могут возникать в изоляции активной части, вводов и переключающих устройств);

- определение опасности ЧР и необходимости ремонта оборудования после длительной эксплуатации;

- оценка качества и технического состояния изоляции после ремонта или модернизации;

- в целом диагностика технического состояния изоляции и прогнозирование ее остаточного ресурса.

Важно то, что методы диагностики и контроля состояния высоковольтной изоляции оборудования по характеристикам ЧР относятся к неразрушающим методам контроля. Они позволяют определять не только уровень ЧР (степень старения изоляции), но и места повреждения изоляции.

**ЧР в трансформаторах.** Причинами возникновения частичных разрядов в трансформаторах, способных привести к значительным разрушениям (Рис. 3, а), являются:

- перенапряжения при работе;
- электрические воздействия (например, внезапные короткие замыкания);

- недопустимые тепловые воздействия (перегрев);

- увлажнение, загрязнения изоляции обмоток, недостаточная толщина витковой изоляции (отметим, что большая часть отказов трансформаторов связана именно с нарушениями изоляции обмоток);

- некачественный обмоточный провод (в том числе неровная поверхность проводника);

- деформация обмоток при воздействии токов короткого замыкания (при деформации появляется сдвиг элементов конструкции обмоток и изоляции, увеличиваются локальные напряженности электрического поля);

- наличие примесей в масле;

- присутствие газовых включений, ослабляющих электрическую прочность изоляции (газовыделение вследствие локальных перегревов масла или твердой изоляции);

- недостаточная газостойкость масла;

- увеличение уровня вибраций трансформатора;

- старение изоляции под воздействием всех перечисленных факторов.

**ЧР в двигателях и генераторах.** Электрические машины в ходе эксплуатации испытывают разрушающее действие частичных разрядов (Рис. 3, б), возникающих по причине технологических дефектов в процессе изготовления и влияния многих факторов. К таким факторам относятся загрязнение, нагрев, проблемы, связанные с периодическим изменением нагрузки.

В электрических машинах ЧР могут возникать в самом объеме изоляции, в местах контакта изоляции и паза сердечника, в местах контакта изоляции и проводника, однако наиболее подвержена ЧР и повреждениям изоляция обмоток статора и ротора машин.

Разрушения вследствие частичных разрядов и названных выше факторов проявляются в разрыхлении обмоток, их термическом старении, отказе работы двигателей.

**ЧР в кабелях.** На сегодняшний день широко распространенными остаются кабели с бумажно-пропитанной изоляцией, характеризующиеся сильной изношенностью и частой повреждаемостью. На их смену во всем мире приходят кабели с полиэтиленовой изоляцией современной технологии производства. Однако как бумажная, так и полимерная изоляции восприимчивы к образованию частичных разрядов и разрушаются под их воздействием (Рис. 3 в, Рис. 4).

В бумажно-пропитанной изоляции предпосылками к образованию полостей и зарождению в них разрядов являются перемещения пропиточной массы из-за термических нагрузок, перепада уровня прокладки и некачественного монтажа кабелей.

Полиэтиленовая изоляция подвержена электрическому старению и развитию ЧР вследствие наличия технологических дефектов, возникновения и распространения в них электрических и



водных триингов [5, 10]. Кроме того, дефекты в изоляции образуются при транспортировке, прокладке, монтаже кабелей из-за периодических деформаций (растяжений, изгибов) изоляционного материала. Наличие газа и воды в микропустотах в структуре полиэтилена объясняется проникновением водяного пара и летучих продуктов в материал изоляции в производственных процессах их изготовления.

Частичные разряды имеют место в изоляционной структуре кабелей вследствие локальной неоднородности электрического поля в местах расположения дефектов и усиления напряженности электрического поля вблизи них. Напряженность поля внутри газовых включений или вблизи инородных частиц в несколько раз выше, чем в материале изоляции, и может превышать электрическую прочность материала. Именно это обуславливает возникновение ЧР.

Для получения представления о электроразрядных процессах при ЧР возможно выделить отдельное газовое включение в структуре изоляции и рассматривать разряды как переходный процесс, протекающий при определенных начальных условиях — задаться величиной напряжения возникновения ЧР, при которой напряженность электрического поля достигает величины  $E_{\text{чр}} = 4 \text{ кВ/мм}$ . При пробое воздушного промежутка в объеме включения протекает импульсный ток, что можно моделировать путем задания кратковременного значительного увеличения электропроводности среды в области включения. С использованием такого подхода в [3] получены распределения электрического поля и температуры в области с воздушным включением при возникновении единичного ЧР (показаны на Рис. 5).

Данные Рис. 5 показывают, что до появления частичного разряда электрическое поле концентрируется во включении, а вблизи его наблюдается повышение плотности силовых линий электрического поля (Рис. 5, а). Во время частичного разряда поле во включении резко уменьшается, а на вершинах включения, ориентированных по полю, напряженность поля имеет высокое значение (Рис. 5, б). В этих зонах проходят ускоренные процессы старения изоляции, образуются микротрещины, увеличивающие дефект материала в объеме.

Как показано в [3], температура в самом включении при каждом частичном разряде кратковременно может возрастать на  $\sim 2\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ , а после разряда снижается до первоначального значения. Такое повышение температуры не столь велико, чтобы оказать существенное влияние на изменение свойств материала и радикально ослабить его

изоляционные свойства. Вместе с тем, можно говорить о тепловом старении локальной области изоляции (особенно при учете серии разрядов), при котором могут ускоряться химические реакции, изменяться структура материала на микроуровне. К тому же, температура может изменить интенсивность и напряжение частичных разрядов путем видоизменения конфигурации включения, а также изменения давления газа в нем и проводимости.

В настоящее время широко проводятся экспериментальные и численные изучения поведения ЧР в полимерных материалах (например, [10, 18]). Это связано с практической важностью и приложением знаний об электрофизических разрядных процессах в диэлектриках для использования при изготовлении и эксплуатации полиэтиленовых изоляционных конструкций. Изучение процессов протекания ЧР в полимерах актуально в условиях повсеместного внедрения современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена высокого и сверхвысокого напряжения (до 500 кВ). Кабельные линии высокого напряжения имеют особое значение для энергетики и промышленности. Их надежность и безопасность должны быть предельно высокими, поскольку они передают большие потоки электроэнергии к ответственным объектам.

В дополнение отметим, что в настоящее время разработано электроэнергетическое оборудование на основе силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена [9], в том числе высоковольтные трансформаторы Dryformer, высоковольтные турбо- и гидрогенераторы Powerformer, ветроэлектрические генераторы для применения в ветроэнергетике Windformer. Их обмотки выполняются высоковольтным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена. Вопросы максимального снижения интенсивности ЧР для такого принципиально нового оборудования также актуальны.

Таким образом, частичные разряды, являются одной из основных причин повреждения высоковольтной изоляции. Характеристики ЧР зависят от параметров неизбежных микродефектов в структуре изоляционного материала (конфигурации, расположения дефектов), а также приложенного напряжения, электрических, тепловых и механических воздействий. Повреждения вследствие ЧР, зависящие от многих факторов (Рис. 1, 2), имеют тенденцию к увеличению в размерах и количестве. Актуальность решения проблемы эксплуатационной надежности и безопасности высоковольтного оборудования обуславливает необходимость изучения поведения частичных



разрядов и их воздействий на высоковольтную изоляцию с использованием как экспериментальных, так и численных методов исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М.: Гос. ком. по стандартам. — 25 с.
2. Коченков Д. Диагностика высоковольтных кабельных линий. Опыт внедрения. // Кабель-news. — 2012. — № 3. — [http://www.ruscable.ru/article/Diagnostika\\_vysokovoltnykh\\_kabelnykh\\_linij\\_Opyt/](http://www.ruscable.ru/article/Diagnostika_vysokovoltnykh_kabelnykh_linij_Opyt/)
3. Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование электротепловых процессов в полимерной изоляции с воздушным включением при возникновении единичного частичного разряда. // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 5. — С. 18–24.
4. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. — Л.: Энергия, 1978. — 176 с.
5. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия, 1979. — 224 с.
6. Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 320 с.
7. Международный стандарт МЭК 60270. Методы высоковольтных испытаний — Измерение частичных разрядов. — Издание третье, 2000–12. — 55 с.
8. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 239 с.
9. Федоренко Г.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Карпушенко В.П., Грубой О.П., Гримуд Г.И. Перспективы создания в Украине высоковольтного электроэнергетического оборудования на основе современной кабельной технологии.

// Гидроэнергетика Украины. — 2007. — № 3. — С. 10–18.

10. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. — London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. — P. 62.

11. <http://diiris.com/ekonomicheskoe-obosnovanie-testirovaniya-chastichnyih-razryadov-izolyatsii-obmotki-statora/>  
1  
2  
<http://electrical-engineering-portal.com/ionization-corona-disc-harge-tests>

13. [http://www.electricenergyonline.com/?page=show\\_article&article=186](http://www.electricenergyonline.com/?page=show_article&article=186)

1  
4  
<http://www.hoestarinsp.com.sg/services-partial-discharge.html>

15. <http://www.hvpcd.co.uk/technical/>

16. <http://www.imcorp.com/learn-more>

1  
7  
<http://www.tepcoco.jp/en/corpinfo/consultant/facilities/2-dis-sol-e.html>

18. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2011. — Vol. 44. — 15 p. — <http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/24/245202/>

19. Umeda S., Ishii N., Horiguchi N., Maeda M. et al. Underground power cable, distribution cable, overhead transmission line, industrial cable and their accessories. // Furukawa Review. — 2007. — No. 32. — pp. 2–20. — <http://www.furukawa.co.jp/-review/fr032.htm>

20. Werellius P., Tharning P., Eriksson R., Holmger B., Gafvert J. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — February 2001. — Vol. 8. — P. 34 (figure 10).

