

04;05.2;12

©1994

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕНДРИТОВ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

О. Л. Резинкин, М. М. Резинкина, А. В. Долбин

При приложении к полиэтиленовой изоляции переменного во времени высокого напряжения в ее толще происходит развитие образований, носящих ярко выраженный фрактальный характер — дендритов [1]. Дендриты начинают расти из областей локального усиления напряженности электрического поля (с микровыступов на электродах, с проводящих включений и т.п.) и могут перекрывать значительную часть изоляционных промежутков, снижая тем самым электрическую прочность и ресурс изоляции. Топология и динамика развития дендритов зависят от электрических и ресурсных характеристик диэлектрика, от конфигурации электродной системы, а также от формы и амплитуды приложенного напряжения.

Использование аппарата статистической физики позволяет математически описать топологию и динамику роста дендритов. К числу наиболее значимых характеристик данных объектов относятся фрактальная размерность, а также длина доминирующей ветви. Однако в литературных источниках эти характеристики рассматриваются, как правило, вне привязки к реальному масштабу времени [2]. Исследование динамики изменения во времени фрактальных характеристик дендритов, образующихся в процессе электрического старения полиэтиленовой изоляции, позволяют глубже понять физическую сущность данных явлений.

Образцы полиэтилена для исследования были приготовлены из отрезков кабеля РК-100-7-13. Оплетка кабеля удалялась, а полиэтиленовая изоляция разогревалась до пластичного состояния инфракрасным излучением и деформировалась двумя полированными пластинами до толщины 2–3 мм. Затем в разогретый полиэтилен при помощи микровинта вводился игольчатый электрод, заточенный под углом 30°. Радиус закругления острия иглы составлял 2 мкм. Контроль отсутствия механических напряжений проводился визуально в поляризованном свете. Приготовленный таким образом образец помещался в оптически прозрачную кювету, заполненную трансформаторным маслом. Поскольку коэффициенты преломления полиэтилена

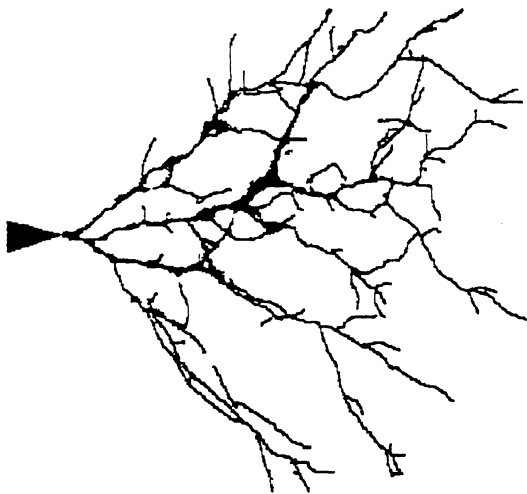


Рис. 1. Машинное представление дендрита в полиэтилене $U = 14$ кВ, $t = 90$ с, $D_f = 1.59$.

и трансформаторного масла весьма близки, заметных искажений изображения неровностями на поверхности полиэтилена не наблюдалось. На иглу подавалось переменное напряжение промышленной частоты амплитудой U 10 и 14 кВ. В качестве заземленного электрода использовалась жила кабеля. Фоторегистрация проводилась при помощи доработанной лупы МБС-9. Доработка состояла в дополнении лупы видеоприставкой, позволяющей получить оптическое изображение дендрита при субмикронном пространственном разрешении. Данная геометрическая форма изоляции и электродов позволила наблюдать динамику процесса роста дендрита вблизи острия иглы в радиусу 2–3 мм.

В рассматриваемой системе электродов исследована динамика роста триингов, образующихся в полиэтиленовой изоляции. Для определения фрактальных характеристик дендритов их изображения через видеопорт вводились в IBM PC и обрабатывались специально разработанной программой. На рис. 1 приведено машинное представление типичного дендрита, вырастающего в полиэтилене при подаче на иглу переменного напряжения амплитудой 14 кВ и частотой 50 Гц. На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости длины доминирующей ветви L и фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича D_f дендритов от времени t . Расстояние от острия иглы до жилы кабеля составляло 5 мм. Фрактальная размерность определялась в соответ-

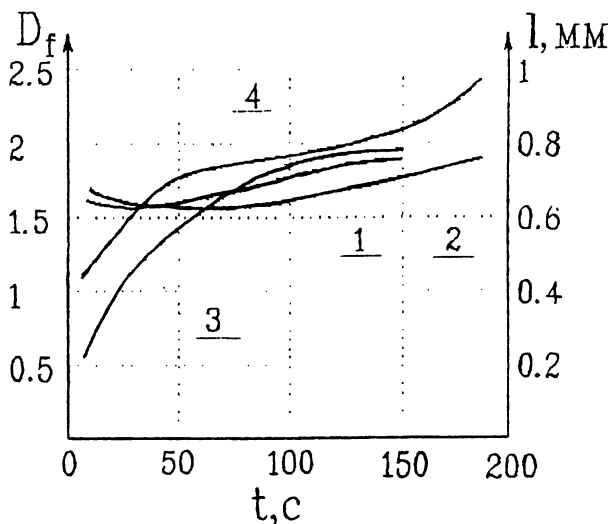


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности D_f (кривые 1, 2) и длины доминирующей ветви L (кривые 3, 4) от времени. Кривые 1, 3 — $U = 10$ кВ, кривые 2, 4 — $U = 14$ кВ.

ствии с методикой [2]:

$$D_f \sim \ln N(R) / \ln R,$$

где $N(R)$ — число поврежденных разрядом ячеек на расстоянии R от иглы.

Из графиков видно, что скорость продвижения доминирующей ветви дендрита к противоположному электроду меняется во времени. При этом происходит рост фрактальной размерности дендрита. Это свидетельствует о преимущественном развитии побегов, не принадлежащих доминирующей ветви. В зависимости от условий проведения эксперимента рост дендрита может замедлиться и даже остановиться, а может усилиться. Это следует из сравнения кривых 1 и 2, а также 3 и 4 (см. рис. 2). При большем напряжении скорость роста доминирующей ветви L на некотором этапе замедляется, а затем вновь начинает расти (кривая 4 рис. 2), в то время как при меньшем напряжении после начального этапа с большими значениями dL/dt в дальнейшем роста L практически не происходит (кривая 3 рис. 2). Причем фрактальная размерность при меньшем напряжении выше, чем при большем (см. рис. 2, кривые 1 и 2). Таким образом, при анализе фрактальных свойств образующихся в процессе электрического старения полиэтилена дендритов наряду с оценкой динамики изменения во времени их фрактальной

размерности необходимо учитывать характер роста длины доминирующей ветви.

В случае резко неоднородного поля образующийся дендрит может вызвать как экранирование иглы и почти полное прекращение продвижения деструкции изоляции (см. рис. 2, кривые 1, 3), так и усиление на некотором этапе продвижения лишь одной доминирующей ветви (см. рис. 2, кривые 2, 4). Таким образом, подбирая режим эксплуатации полиэтиленовой изоляции, можно добиться того, что возникающие в ее толще древовидные образования приведут к снижению напряженности электрического поля вокруг иглы и прекращению процесса деструкции диэлектрика.

Исследованные дендриты обладают фрактальными свойствами не только в пространстве, но и во времени. По аналогии с [2] была рассчитана величина коэффициента b , связывающая $\ln N$ и $\ln t$ следующим образом:

$$b \sim \ln N / \ln t.$$

При $U = 10$ кВ величина b составила 1.16, а при $U = 14$ кВ — 0.993.

Для оценки динамики изменения во времени длины доминирующей ветви L был также рассчитан коэффициент q , определяемый как

$$q \sim \ln L / \ln t.$$

Расчет показал, что величина q для $U = 10$ кВ равняется 0.46, а для $U = 14$ кВ — 0.27.

Выводы

1. Как показали исследования процесса роста дендрита в полиэтиленовой изоляции, в зависимости от уровня приложенного напряжения скорость продвижения его доминирующей ветви к противоположному электроду может как уменьшиться, так и возрасти. Причем рост фрактальной размерности дендрита происходит как в том, так и в другом случае.

2. Дендриты, образуемые в полиэтиленовой изоляции в процессе ее электрического старения, обладают фрактальными свойствами как во времени, так и в пространстве.

Список литературы

- [1] *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л., 1979. 233 с.
- [2] *Фракталы в физике* / Под ред. Пьетронеро, Тозатти Э. М., 1988. 670 с.

Поступило в Редакцию
8 мая 1994 г.
