

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Н. К. Капшников, Г. В. Липов

Срок службы и надежность высоковольтных импульсных устройств, работающих в режиме с повышенной частотой включения, в значительной степени определяются способностью изоляции восстанавливать диэлектрические свойства после случайных пробоев, которые возможны в условиях многоимпульсного воздействия даже при значительном запасе электрической прочности. В настоящее время закономерности восстановления электрической прочности (ВЭП) достаточно подробно изучены лишь для газовых диэлектриков и вакуума. Процессы на стадии ВЭП в жидких диэлектриках до сих пор практически не исследованы, несмотря на широкое использование жидкостей в качестве изоляции и рабочей среды высоковольтных источников питания с импульсно-периодическим режимом работы. Ниже проанализированы процессы, происходящие в разрядном промежутке с жидким диэлектриком на стадии восстановления электрической прочности.

Способность жидких диэлектриков восстанавливать изолирующие свойства после пробоя в основном определяется характером разложения жидкости в электрических разрядах. Практически все жидкие диэлектрики по характеру разложения при пробое можно разделить на две группы: жидкости, электрический разряд в которых сопровождается образованием только газообразных продуктов разложения (вода и сжиженные газы), и жидкие диэлектрики, пробой которых характеризуется образованием газа и твердых примесных частиц (практически все органические жидкости).

Проведенные нами исследования электрической прочности жидких диэлектриков в области малых вероятностей пробоя при повышенной частоте следования испытательных импульсов [1] показали, что после разряда в трансформаторном масле последующие приложения напряжения приводят к пробоям при пониженном уровне напряжения, причем траектория разрядных каналов пространственно локализована в области формирования первого разрядного канала. Проведенными измерениями установлено, что в условиях отсутствия принудительной циркуляции трансформаторного масла время восстановления его электрической прочности до первоначального уровня даже при небольшой величине энергии W , выделяющейся в разрядном канале (≤ 15 Дж), составляет несколько десятков секунд и увеличивается до 5—15 мин при $W=200$ —300 Дж.

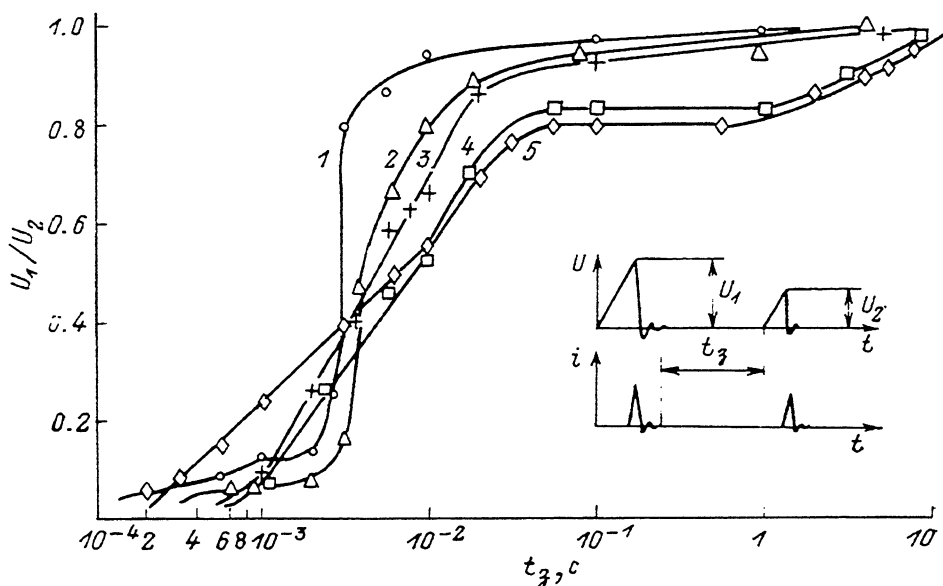
Несколько иные закономерности наблюдаются в случае пробоя очищенной воды. При малых вероятностях пробоя, т. е. при воздействии на разрядный промежуток импульсов напряжения, амплитуда которых заметно меньше пробивного напряжения, случайные пробои практически не увеличивают вероятности пробоя при последующих приложениях напряжения даже при частоте десятки импульсов в секунду, т. е. в интервалах между импульсами изолирующие свойства очищенной воды в основном успевают восстановиться. Подобный результат был получен и в работах [2, 3], в которых показано, что при пробое деионизованной воды парогазовые пузырьки, оставшиеся в разрядном промежутке после пробоя, очень слабо влияют на разрядные процессы при последующем приложении напряжения, несмотря на большое различие диэлектрических проницаемостей газа и воды. Объясняется это ионизацией газа в пузырьках при достаточно низких начальных напряжениях, что ведет к выравниванию электрического поля в разрядном промежутке [2].

Таким образом, в высоковольтных импульсных устройствах с повышенной частотой включения наиболее предпочтительно применение жидких диэлектриков, пробой которых сопровождается образованием только газообразных продуктов разложения. В одном из таких диэлектриков (в очищенной воде) и проведены исследования восстановления электрической прочности.

Измерения выполнены с использованием методики двухимпульсного воздействия напряжения [4]. Испытываемый разрядный промежуток, образован-

ный электродами острие—плоскость, является коммутатором формирующей линии с водяной изоляцией [5]. Оптическая регистрация процессов в исследуемом промежутке на стадии восстановления электрической прочности осуществлялась теневым методом с использованием высокоскоростной камеры ВФУ-1, работающей в режиме покадровой съемки.

Результаты измерения уровня восстановления пробивного напряжения U_2/U_1 в зависимости от времени t_2 при различных значениях величины энергии W , выделившейся в искровом канале при пробое на первом импульсе напряжения, приведены на рисунке. Здесь же показана методика определения значений U_1 , U_2 и t_2 .



Зависимости уровня восстановления пробивного напряжения от времени при различных значениях энергии W .

W , Дж: 1 — 20, 2 — 63, 3 — 100, 4 — 300, 5 — 380; $U_1 = 63$ кВ, длина межэлектродного промежутка 3 мм.

Совместный анализ результатов измерений уровня восстановления и данных оптической регистрации разрядного промежутка показывает, что динамика восстановления электрической прочности тесно связана с процессами пульсации и распада парогазовой полости (ПГП), в которую преобразуется разрядный канал в жидкости после окончания стадии энерговыделения [6].

Сразу после окончания импульса разрядного тока в течение нескольких десятков мкс (на рисунке этот участок не показан) температура вещества в парогазовой полости, перемыкающей межэлектродный зазор, достигает нескольких тысяч градусов (об этом свидетельствует достаточно интенсивное свечение ПГП в этот интервал времени), а давление заметно превышает гидростатическое, что ведет к быстрому расширению ПГП со скоростью сотни м/с. В этих условиях вещество парогазовой полости находится в частично ионизованном состоянии, поэтому электрическая прочность разрядного промежутка очень низка (не превышает единиц кВ/см). В дальнейшем энергообмен с окружающей средой приводит к быстрому охлаждению вещества ПГП и спустя сотни микросекунд после окончания импульса разрядного тока электрическая прочность исследуемого промежутка при воздействии зондирующего (второго) импульса напряжения определяется составом и плотностью вещества в пульсирующей парогазовой полости. Уровень восстановления на этом участке зависимостей $U_2/U_1 = f(t_2)$ не превышает 0.2 и характеризуется существенным разбросом, достигающим 15%. Разброс пробивного напряжения U_2 возрастает до 30% на следующем участке зависимостей $U_2/U_1 = f(t_2)$, характеризующемся высокой скоростью восстановления электрической прочности, обусловленной распадом парогазовой полости на отдельные пузырьки и заполнением межэлектродного проме-

жутка жидкостью. Повышенный разброс уровня восстановления связан с большими флуктуациями формы и объема парогазовых образований, на которые распадается ПГП в этом временном интервале. На финишном участке зависимостей $U_2/U_1=f(t_2)$ скорость восстановления электрической прочности уменьшается и пробивное напряжение достигает первоначального уровня через несколько секунд. Разброс пробивного напряжения U_2 на этом участке не превышает разброса пробивного напряжения U_1 невозмущенной жидкости.

При повышенных значениях энергии W , выделяющейся в искровом канале при пробое на первом импульсе напряжения, характер зависимостей $U_2/U_1=f(t_2)$ имеет некоторые особенности, одной из которых является то, что начальный участок характеризуется более быстрым восстановлением электрической прочности, что, по-видимому, связано с повышением давления в парогазовой полости на всем протяжении стадии ее пульсации. Об этом, в частности, свидетельствует незначительное увеличение максимального размера ПГП при существенном (на порядок и более) повышении величины W , что объясняется наличием жестких стенок (исследования проводились в разрядной камере закрытого типа), препятствующих расширению ПГП. Другой особенностью восстановления электрической прочности при повышенных значениях W является то, что скорость восстановления на участке быстрого восстановления электрической прочности заметно уменьшается. Это обусловлено увеличением продолжительности стадии распада парогазовой полости. Кроме того, существенно не возрастает длительность финишного участка зависимости $U_2/U_1=f(t_2)$. Тем менее время восстановления электрической прочности до уровня $(0.7-0.8) U_1$ и в этих условиях не превышает нескольких десятков мс.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что динамика восстановления электрической прочности очищенной воды в основном определяется процессами на стадии пульсации и распада парогазовой полости, в которую преобразуется искровой канал после окончания энерговыделения в нем.

Список литературы

- [1] Капишников Н. К., Летатов В. И. // ПТЭ. 1985. № 5. С. 242.
- [2] Rohwein G. J. // Proc. of 5th IEEE Pulsed Power Conf. Arlington, 1985. P. 339—344.
- [3] Капишников Н. К. // ЭОМ. 1985. № 1. С. 78—80.
- [4] Бельков Е. П. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 9. С. 1946—1951.
- [5] Капишников Н. К., Липов Г. В., Муратов В. М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 11. С. 2126—2134.
- [6] Наугольный К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.

Научно-исследовательский институт
высоких напряжений при Томском
политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
26 июля 1989 г.

В окончательной редакции
28 апреля 1990 г.

09; 11

Журнал технической физики, т. 61, в. 9, 1991

© 1991 г.

САМОПРОИЗВОЛЬНЫЙ РОСТ ТОКА АВТОЭМИССИИ В СВЧ ПОЛЕ

Ю. В. Андриянов, В. Н. Баздырев, Д. А. Борисов, В. М. Жуков

Пионерские эксперименты по исследованию автоэлектронной эмиссии в поле СВЧ выполнены группой Дайка [1, 2], использовавшей методику автоэлектронной микроскопии. При этом показано, что СВЧ автоэмиссионное изображение ($\lambda=3$ см) полностью идентично изображению, получаемому в условиях стационарных полей. Усредненные за импульс значения тока составили $2 \cdot 10^{-5} - 8 \cdot 10^{-4}$ А. Максимальная достигнутая плотность тока в пичке $\sim 10^7$ А/см² [2].