

Сравнение электрической прочности трансформаторного масла при напряжении постоянного тока и повторяющихся импульсах с длительностью до нескольких миллисекунд

Ключевые слова: трансформаторное масло, импульсы с длительностью до нескольких миллисекунд, высоковольтный источник питания

Введение

Электрическая прочность электроизоляционных жидкостей в общем и трансформаторного масла в частности представляет большой практический интерес и широко изучается в течение более чем ста лет [1]–[6]. Работа [7] посвящена импульсному пробую жидкостей в широком диапазоне параметров и имеет особенно близкое отношение к работе, представленной в настоящей статье.

Хорошо известно, что электрическая прочность свежего, полностью очищенного масла в несколько раз выше, чем таковая старого загрязненного масла, за исключением для импульсов с длительностью порядка нано- или пикосекунд. Некоторые из причин этого различия следующие: (1) под влиянием электрического поля твердые частицы примеси или вода могут образовывать цепь и инициировать пробой [1]; (2) твердые примеси могут появляться в масле в результате случайных или предусмотренных дуговых разрядов или окисления металлов; (3) вода может абсорбироваться из атмосферы в негерметических устройствах.

Различные механизмы пробоя широко обсуждаются [1]–[7]. В высокоочищенных жидкостях пробой обычно вызывается микродефектами, например полости газа размером порядка нано- и микрометров, улавливаемые поверхностями электродов в массе жидкости. Даже при отсутствии микропузырьков переход жидкости в газообразное состояние может возникнуть в результате нагревания электронами, излучаемыми катодом под действием поля. Так как электрическая прочность газа намного ниже, чем у соответствующей жидкости, разряд инициируется в газе и может развиваться вплоть до полного пробоя через массу жидкости. Более подробные сведения смотрите в гл. 2 работы [7]. В загрязненных окислившимся жидкостях механизмы пробоя не столь изощренные, например механизм, при котором инородные частицы выстраиваются вдоль силовых линий электрического поля, образуя мост, вызывающий разряд. Однако этот механизм обычно действует в масштабе миллисекунд вследствие медленно ассоциированного движения частиц [4]–[7].

Масло значительно ухудшается в оборудовании, находившемся в работе в течение продолжительного периода. В оборудовании с герметичными баками, например в рентгеновских моноблоках [8], масло может и не изменяться в течение срока службы оборудования. В таких обстоятельствах механизмы пробоя и электрическая прочность очищенного свежего масла несущественны, за возможным исключением для начального выбора масла. Рабочая напряженность поля выбирается на основании ожидаемого напряжения пробоя в конце срока службы. Существует обширная база данных для электрической прочности свежих и старых масел при постоянном, переменном токе и импульсном напряжении, см. например [1]–[7] и их ссылки.

**А. Покрываило (A. Pokryvailo)
и С. Карп (C. Carp)**

*Spellman High Voltage Electronics Corporation
475 Wireless Boulevard
Hauppauge, NY 11788*

Проведено сравнение электрической прочности свежего и загрязненного трансформаторного масла при повторяющихся импульсах длительностью несколько миллисекунд с таковой при напряжении постоянного тока. Обнаружено, что импульсное пробивное напряжение выше своего аналога при постоянном токе на 10–20 %.

Как у всех диэлектриков, под воздействием коротких импульсов пробивное напряжение жидкостей имеет тенденцию к возрастанию, хотя и не единообразному [5], [9]. В раннем исследовании [9] сообщено, что для трансформаторного масла под воздействием импульсов длительностью до нескольких миллисекунд и очень низких значений частоты повторения импульсов (PRR) пробивные напряжения были выше, чем при переменном токе (60 Гц), с коэффициентом приблизительно от 1,5 до 2, с большим возрастанием для более коротких импульсов.

В некоторых видах оборудования масло подвергается воздействию повторяющегося импульсного напряжения. Несмотря на огромное количество данных о пробивном напряжении, мы не смогли найти явное сравнение электрической прочности масла при напряжениях переменного или постоянного тока с таковой при воздействии повторяющихся импульсов длительностью в несколько миллисекунд. Так как толщина изоляции в оборудовании, используемом для различных специальных применений (например, для рентгеновских установок) намного меньше обычно применяемой в энергетическом оборудовании (например в трансформаторах

| Таблица 1. Основные технические характеристики высоковольтного источника питания | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Входное напряжение | От 90 до 264 В пер., 50/60 Гц (или от 0 до 420 В пост. при обходе входного выпрямителя и корректора коэффициента мощности) |
| Выходное напряжение | От 0 до 160 кВ (от 0 до ± 80 кВ биполярное симметричное относительно земли) |
| Выходной ток | От 0 до 12 мА |
| Частота повторения импульсов | Постоянный ток или одиночные до 150 Гц (ограничение по времени спада) |
| Время нарастания до номинального напряжения | <1 мс без экранированных высоковольтных кабелей |
| Выходная емкость | Приблизительно 30 пФ (не учитывая экранированные высоковольтные кабели) |
| Время спада | Зависит от нагрузки и высоковольтного кабеля |
| Пульсация, размах: | <2 % |
| Частота преобразования | 150 кГц |
| Размер | 15,7 x 34,3 x 45,7 см |
| Изоляция | Трансформаторное масло |

и коммутационной аппаратуре), сведения об электрической прочности при воздействии повторяющихся импульсов длительностью в несколько миллисекунд являются важными. Два этих фактора мотивировали рассматриваемое ниже исследование.

Установка и методы

А. Высоковольтный источник питания

Основные параметры заказного импульсного высоковольтного источника питания сведены в Таблицу 1. Он вырабатывает импульсы биполярного напряжения, симметричного относительно земли (от нуля до ± 80 кВ) с PRR до 150 Гц. Предусмотрено обнаружение дугового разряда и последующее выключение. Хотя питание высоковольтного источника питания можно осуществлять непосредственно от магистральной линии, мы предпочли питать его преобразователь постоянного тока от регулируемого источника питания постоянного тока (из серии SL компании Spellman [10]). Этим обеспечивалась большая гибкость управления высоковольтной частью. Выходное напряжение подавалось по двум экранированным кабелям, приблизительно 3 м длиной каждый, или по двум неэкранированным кабелям, приблизительно 2 м длиной каждый. Важность точного задания выхода заключается в том, что емкость высоковольтного кабеля сильно влияет на время спада импульса, ограничивая PRR.

Высоковольтный источник питания с присоединенными неэкранированными кабелями с полиэтиленовой изоляцией показан на рисунке 1 вместе с двумя генераторами функций, задающими PRR и частоту пилообразного напряжения (см. ниже Методику испытаний). Это стандартный комплект Spellman, состоящий из низковольтной и высоковольтной частей. В состав низковольтной части входят линейный выпрямитель, корректор коэффициента мощности, инвертор и плата управления. Высоковольтная часть состоит из высоковольтных трансформаторов, умножителей, делителей обратной связи и т. д., в ней используется масляная изоляция.

Типовой выход отрицательной полярности относительно земли при полном напряжении (75 кВ, или 150 кВ между полюсами), измеренный с делителем обратной связи, показан на рисунке 2. Положительность нижней части импульса по результатам наблюдений во время калибровочных испытаний с высоковольтным щупом Tektronix P6015A (Tektronix Inc., Beaverton, OR) до 40 кВ, лучше

показанной на рисунке 2. Ограничивающим повышению PRR фактором является время разрядки кабелей. (Емкостью умножителя приблизительно 30 пФ можно пренебречь.)

В. ИСПЫТЫВАЕМОЕ УСТРОЙСТВО

Для имитации рабочих условий рентгеновских трубок и других высоковольтных частей в масле для искрового промежутка выбрана конфигурация плоскость — сфера. Коэффициент неоднородности поля f , определяется в виде

$$f = E_m / E_{av} \quad (1)$$

где E_m и E_{av} — соответственно максимальная и средняя напряженность поля в промежутке; в модулируемых системах обычно должна быть в диапазоне от 1,5 до 6. Низкие значения относятся к большим электродам с низкой кривизной, а большие значения относятся к паяным соединениям шариковых контактов таких компонентов как диоды, резисторы и конденсаторы.

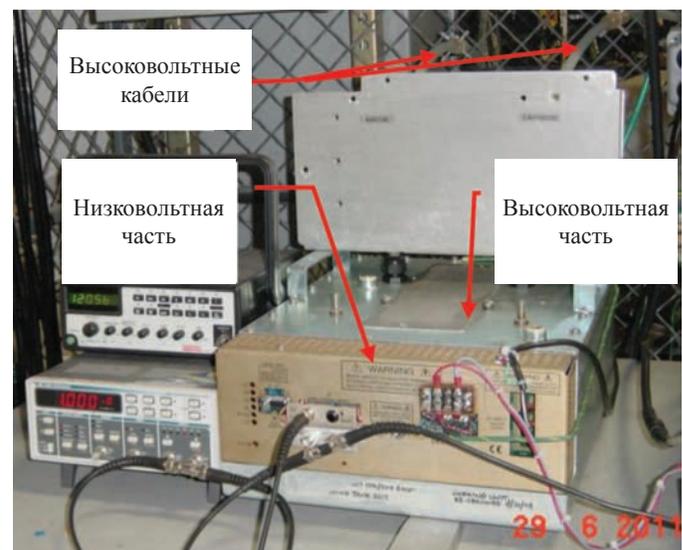


Рисунок 1. Высоковольтный источник питания с неэкранированными кабелями с полиэтиленовой изоляцией

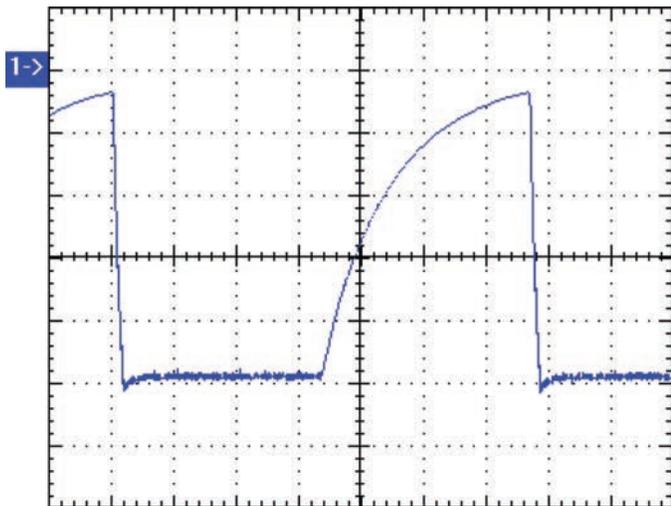


Рисунок 2. Типовой выход отрицательной полярности (-75 кВ), с экранированными кабелями. Сопротивление нагрузки = 83,5 МОм. Частота повторения импульсов = 15 Гц. Вертикальный масштаб 15 кВ/дел., с нулем, указанным 1→; горизонтальный масштаб 10 мс/дел.

Испытательный искровой промежуток показан на рисунке 3. Диаметр полированной латунной сферы равен 12,5 мм, плоскость образована закругленным по краям алюминиевым диском толщиной 20 мм и диаметром 63,4 мм. Изготовленные из поликарбоната прочные стойки с элементами жесткости удерживают электроды; промежуток можно изменять от 0 до 40 мм с помощью резьбового стержня. Однако практические испытательные промежутки были ограничены до 15 мм возможностями высоковольтного источника питания. Анализ поля (см. приложение) показал, что в практических испытательных промежутках коэффициент неоднородности поля f варьирует от единицы до чуть более 3. Отметим здесь, что электрическое поле в промежутке плоскость — сфера для симметричного соединения (приложение двухполюсного напряжения) очень похоже на таковое для заземленной плоскости.

Для испытаний было выбрано широко используемое в промышленности масло Shell Diala A/AX (Shell Oil Company, Houston, TX). Электрическая прочность при 60 Гц определялась согласно ASTM D 1816-84a [11] для свежего масла (перед испытаниями) и для загрязненного масла (после испытаний). Результаты представлены



Рисунок 3. Искровой промежуток плоскость — сфера.

| Год | Среднее пробивное напряжение (кВ) | Среднее квадратическое отклонение (кВ) | Состояние масла |
|------|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| 2010 | 34,0 | 6,1 | Чистое |
| 2010 | 14,8 | 2,3 | Загрязненное |
| 2011 | 40,3 | 4,0 | Чистое |

в Таблице 2. Две партии масла объемом приблизительно 20 л каждая использованы для трех испытаний, перечисленных в таблице. Одна партия была использована в 2010 г. и другая в 2011 г.

С. Компоновка высоковольтной части

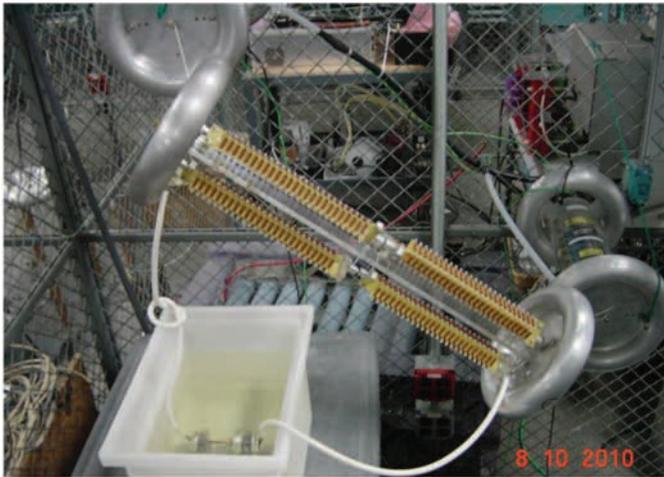
Искровой промежуток погружали в объем приблизительно 20 л масла в пластмассовом баке (рисунок 4). Разгрузочный резистор соединялся с высоковольтным источником питания для поддержания разряда, а соединенные с манжетами высоковольтного источника питания высоковольтные проводники в кремнийорганическом каучуке без покрытия — с искровым промежутком. Сначала ограничивающие резисторы не использовались, но после испытаний со свежим маслом (см. раздел «Свежее масло») для ограничения тока разряда на каждом полюсе был установлен узел из пяти последовательно соединенных резисторов по 22 кОм. Эти узлы использовались только с высоковольтными экранированными кабелями. В случае неэкранированных высоковольтных кабелей, принимая во внимание небольшую сумму запасенной энергии, ограничивающие резисторы не требовались. С экранированными кабелями нагрузка составляла 83,5 МОм. С неэкранированными кабелями испытания в импульсном режиме проводились с использованием нагрузки 20 МОм, что позволяло выполнять испытания с PRR вплоть до 120 Гц.

Переключение полярности осуществлялось перестановкой проводников. Таким образом, все испытания проводились с применением биполярного напряжения (симметричное соединение).

Д. Методика испытаний

Все испытания выполнялись при комнатной температуре. Напряжение увеличивалось линейно со скоростью 4 кВ/с до возникновения пробоя, или вплоть до максимального 150 кВ, или путем программирования мощности источника питания Spellman SL (для измерений с экранированными кабелями) или программирования высоковольтного источника питания (для измерений с неэкранированными кабелями). В первом случае высоковольтный источник питания работал с открытой петлей обратной связи, а во втором случае — с закрытой петлей обратной связи, которая приводила к более жесткому регулированию амплитуды выходного напряжения и более ровной вершине импульса. Если перед достижением максимального напряжения пробой не происходил, напряжение затем линейно уменьшалось со скоростью 4 кВ/с. Испытания для каждого интервала промежутка выполнялись для следующих форм колебаний напряжения:

- 1) положительная полярность, обозначенная как DC+ (сфера положительная);
- 2) отрицательная полярность, обозначенная как DC- (сфера отрицательная);
- 3) импульсы положительной полярности, обозначенные как Pulsed+ (сфера положительная);
- 4) импульсы отрицательной полярности, обозначенные как Pulsed- (сфера отрицательная).



(a)



(b)

Рисунок 4. Компонка высоковольтной части. (a) Экранированные кабели (видны частично). Нагрузка поддерживается двумя высоковольтными делителями HV D100 [12], позволяющими измерять напряжения между полюсами и землей. (b) Неэкранированные кабели с полиэтиленовой изоляцией. Резистивная нагрузка сокращает время спада напряжения импульса.

Для форм колебаний 3 и 4 импульсный выход модулировался пилообразным напряжением. При PRR равном 10 Гц коэффициент заполнения D был 50 %, и 20 % при PRR равном 30, 50, и 120 Гц.

Между следующими друг за другом испытаниями выдерживался интервал по меньшей мере 1 мин согласно процедурам испытаний масла [11], [13]. Для каждого из четырех типов испытаний выполнялись семь испытаний на пробой и вычислялись средние значения и среднее квадратическое отклонение. Если приложение напряжения не приводило к пробую, для соответствующего испытания назначалось пробивное напряжение 150 кВ. После каждого изменения размера промежутка выполнялась очистка электродов.

Пробивное напряжение в испытаниях с постоянным током определяли с помощью ампервольтметра Fluke 179 (изготовитель Fluke Corporation, Everett, WA), с использованием его функции MaxMin (сбор данных максимального значения). При испытаниях в импульсном режиме значения пробивного напряжения регистрировали с помощью осциллографа TDS3034C (Tektronix Inc.). Его горизонтальную развертку была установлена таким образом, чтобы захватывать несколько последних импульсов перед пробоем. Значение

пробивного напряжения задавалось по пику сигнала делителя обратной связи, если пробой происходил при нарастающем фронте или на вершине, и по «амплитуде» плоского участка (пренебрегая пере-регулированием, если имеется), если пробой происходил на вершине вверх или на заднем фронте. Также регистрировалось пиковое значение огибающей такого же сигнала в масштабе времени 10 с/дел. В режиме с разомкнутой петлей обратной связи вершина импульса значительно спадала вследствие ограниченной мощности источника питания постоянного тока; при работе с замкнутой петлей обратной связи вершина импульса была главным образом плоской.

Результаты испытаний

Свежее масло (экранированные кабели)

Первые серии испытаний проводились со свежим маслом без ограничивающих резисторов на выходе кабелей. При PRR равной 10 Гц пробои происходили, главным образом, на плоской вершине или во время спада импульса. Результаты приведены на рисунке 5. Как ожидалось, пробивное напряжение при отрицательной полярности было выше, чем при положительной полярности. Это имело место в случаях с газом, жидкостью и твердой изоляцией, и для многих форм электродов, размеров промежутков и форм колебаний напряжения. Сжатое изложение влияния полярности можно найти в [5]. Заметное различие между пробоем в импульсном режиме и при постоянном токе отсутствует. Среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения было значительно больше при положительной полярности, чем при отрицательной полярности.

Загрязненное масло (экранированные кабели)

(1) Загрязненность, относящаяся к дуговому разряду

После испытаний со свежим маслом, на электродах были установлены описанные в разделе ИС ограничивающие резисторы, как показано на рисунке 6 (пять резисторов по 22 кОм на каждом

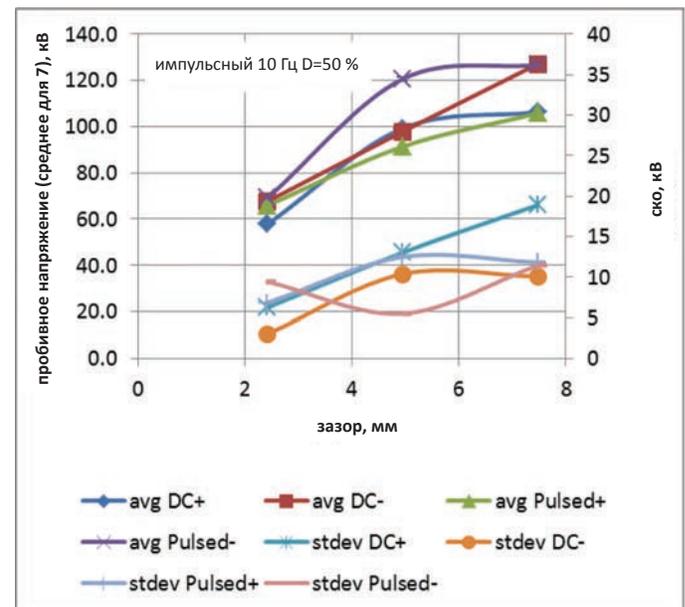


Рисунок 5. Пробивные напряжения для свежего масла, без ограничивающих резисторов на выходе кабелей. Частота повторения импульсов (PRR) = 10 Гц, D = коэффициент заполнения = 50 %.

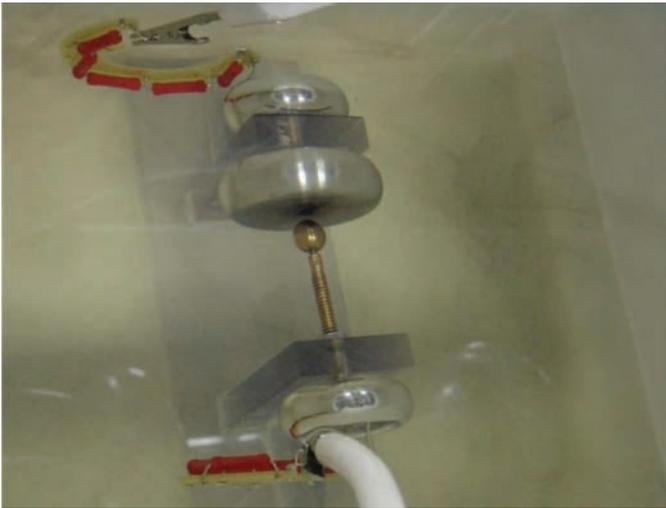


Рисунок 6. Присоединенные к электродам ограничивающие резисторы (красного цвета). Заметна плавающая в масле сажа.

полюсе). При наименьшем промежутке аварийное отключение вследствие дугового разряда не срабатывало после первого пробоя, поэтому перед отключением устройство образовывало дугу несколько раз, иногда в течение 1-2 с. Так как во время разряда весь накапливаемый в емкости кабеля заряд проходил через дуговой канал, масло потемнело от сажи, несмотря на низкий пиковый ток (рисунок 6) и, по результатам испытаний стандартным методом, его пробивное напряжение заметно уменьшилось (Таблица 2).

Выполнены две серии испытаний с маслом, загрязненным сажей. В первом параметры напряжения были такими же, как и раньше, т. е. PRR = 10 Гц и D = 50 %. Для исследования влияния длительности импульса во второй серии выбраны PRR = 30 Гц и D = 20 %. Типичный для второй серии набор форм колебаний при пробое показан на рисунке 7. Осциллограф срабатывал по заднему фронту (спаду) последнего импульса (импульс, на котором происходил пробой); все пробой происходили или при нарастающем (переднем) крае, или непосредственно после пика, а для более

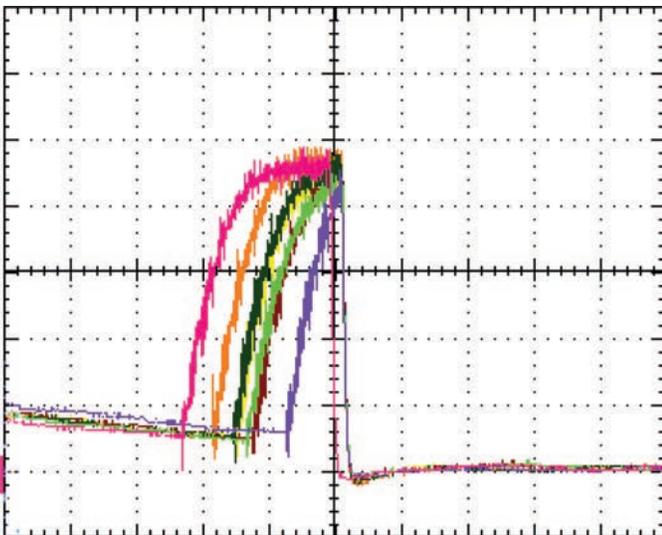


Рисунок 7. Последний импульс при пробое для 10-мм промежутка, отрицательная полярность, масло, загрязненное в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц, D = 20 %. Горизонтальный масштаб 2 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел.

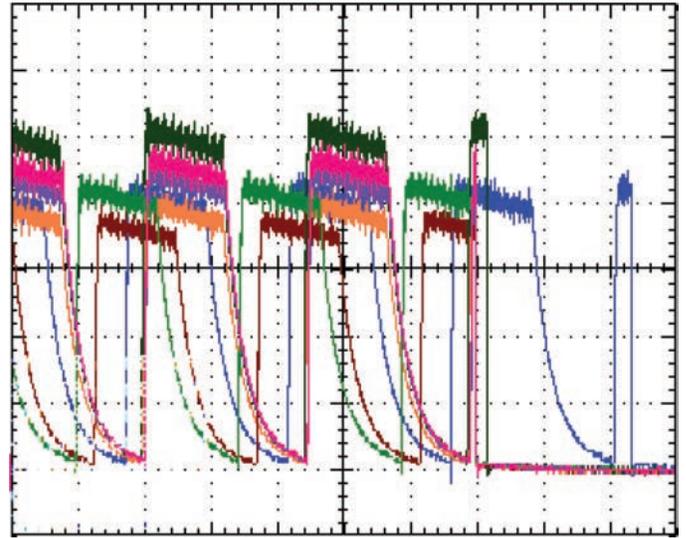


Рисунок 8. Последние импульсы перед пробоем для 7,47-мм промежутка, отрицательная полярность, масло, загрязненное в результате дугового разряда. PRR = 10 Гц, D = 50 %. Горизонтальный масштаб 40 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел.

продолжительных импульсов первой серии они происходили главным образом на «плоской» вершине (рисунок 8).

Результаты представлены в графическом виде на рисунках 9 и 10. Пробивное напряжение так же было выше при отрицательной полярности, чем при положительной полярности (в 15,2-мм промежутке дуговой разряд не возникал в большинстве испытаний вплоть до 160 кВ), и среднеквадратическое отклонение было меньше. Однако наблюдалось заметное различие между пробоем в импульсном режиме и при постоянном токе при обеих полярностях; среднее значение пробивного напряжения в импульсном режиме было выше, чем его аналог при постоянном токе на 14,9 % при положительной и на 10,3 % при отрицательной полярности. Мы объясняем эту разницу механизмом пробоя моста в загрязненных жидкостях [1]–[2], [4]–[7]. Необходимо некоторое время для образования загрязняющими частицами моста вдоль направления поля и возникновения пробоя. Однако четкое различие между случаями продолжительных и коротких импульсов отсутствует (рисунок 10).

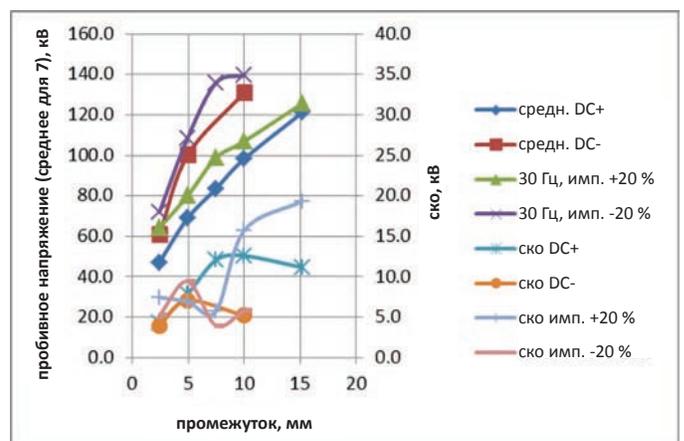


Рисунок 9. Пробивное напряжение для масла, загрязненного в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц, D = 20 %.

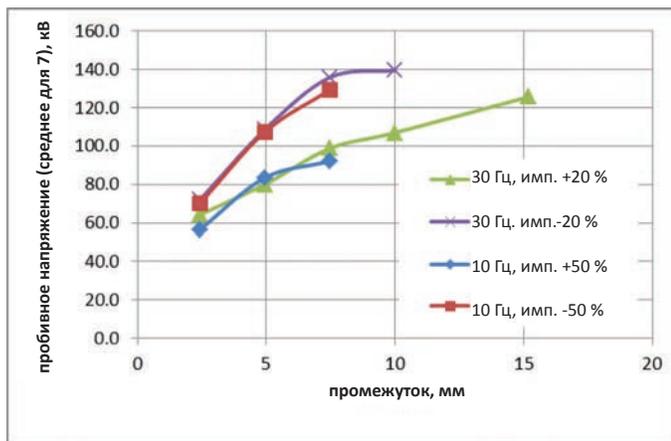


Рисунок 10. Пробивное напряжение для масла, загрязненного в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц с $D = 20\%$, и PRR = 10 Гц с $D = 50\%$.

(2) Загрязненность сажей и другими добавками

Для сильно загрязненного (окисленного) масла можно ожидать даже большего уменьшения электрической прочности по сравнению со свежим маслом и маслом, загрязненным сажей. Так как загрязнение масла вследствие промышленного использования требует времени, мы решили добавить другие загрязнители в четкой определенных пропорциях. Были приготовлены два набора образцов:

- 4 мл (приблизительно 0,24 г) измельченного кремнезема (Degussa R812, гидрофобный, размер частиц 8 нм, также известен как Aerosil R 812, Evonik Degussa GmbH, Essen, Germany) тщательно перемешаны с 20 л загрязненного сажей масла, использованного в измерениях, описанных выше.
- В добавление к мелким кварцевым частицам затем добавлены 4 мл пасты на основе силикона, содержащей наноразмерный технический углерод (изготовитель Dispersion Technology Inc., Bedford Hills, NY; цвет K-73169, средний размер частиц 42 нм) и размешаны до равномерного растворения, окрасившего масло и сделавшего его почти непрозрачным.

Измерения пробивного напряжения выполнены только на 15,2-мм искровом промежутке при положительной полярности, так как резкого изменения электрической прочности, сравнимого с измеренным на образцах, загрязненных только сажей, не наблюдалось.

Хотя кварц до некоторой степени уменьшил пробивное напряжение, технический углерод его увеличил (Таблица 3). Возможные объяснения этого увеличения приведены ниже.

- Содержащее проводящие или полупроводящие нанозаполнители масло имеет большую пробивную прочность, чем масло без нанозаполнителей [14]–[16].
- Неоднородность поля уменьшается с увеличением проводимости.

Загрязненное масло (неэкранированные кабели, 2011 г.)

Измерения выполнены на новой партии масла, которое было загрязнено сажей, образовавшейся в течение продолжительного дугового разряда во время предварительных испытаний. Ставилось целью исследовать, окажется ли сильнее влияние

на электрическую прочность при PRR выше 30 Гц по сравнению с наблюдаемым при значениях до 30 Гц. Соответственно временные интервалы между следующими друг за другом испытаниями выдерживались насколько возможно более короткими, т. е. испытание с положительной полярностью при постоянном токе следовало непосредственно за испытанием импульсами постоянного тока и наоборот. Ширина промежутка и расположение проводников не изменялись, поэтому масло не перемешивалось и его состояние между испытаниями оставалось в значительной степени неизменным. Поэтому возможно значимое сравнение между испытаниями при постоянном токе и в импульсном режиме; сравнение результатов, получаемых в разные дни, было бы сомнительно.

Неэкранированные высоковольтные кабели, большие нагрузки и работа в режиме замкнутой петли обратной связи позволили выполнить испытания при более высоких PRR с более чистыми формами колебаний. На рисунке 11 (а) показан, для PRR = 50 Гц, типичный последний импульс перед пробоем и следующий импульс, на ровной вершине которого произошел пробой. (На развертках 1 и 3 на рисунке 11 (b) показаны импульсы, во время которых происходил пробой при PRR = 120 Гц. Времена нарастания этих импульсов меньше 1 мс, тогда как развертка 2 показывает, что задний фронт импульса, во время которого пробой не происходит, по продолжительности составил приблизительно 7 мс. Пробои наблюдались только по переднему фронту или на плоской вершине, никогда по заднему фронту.

Результаты испытаний приведены на рисунке 12. Рисунок 12 (с) построен на основании пробивных напряжений, показанных на рисунках 12 (а) и 12 (b), в целях наглядности среднеквадратические отклонения опущены. На рисунке 12 (с), (50) или (120) показано, что пробивные напряжения при постоянном токе измерялись в следующих друг за другом испытаниях с их импульсными аналогами при 50 или 120 Гц соответственно. Таким образом средн. DC+(120) означает, что положительные пробивные напряжения постоянного тока были измерены непосредственно перед или после испытаний в импульсном режиме при положительной полярности и при 120 Гц (средн. DC+120Гц) для каждой ширины промежутка. Поэтому между этими испытаниями масло не перемешивалось (что происходило бы при изменении промежутка или перекидывании проводников).

Заметно, то пробивные напряжения для импульсных форм колебаний при 50 и 120 Гц значительно превосходят свои аналоги при постоянном токе. На рисунке 12 (с) показано, что пробойная напряженность поля E_{br} резко уменьшается с ростом коэффициента неоднородности поля f . Последний вычисляется для геометрии, показанной на рисунке 14 приложения.

| Вид испытаний | Среднее пробивное напряжение (кВ) для масла, загрязненного сажей и другими добавками | Среднее пробивное напряжение (кВ) для масла, загрязненного только сажей |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| DC+ | 116 (сажа + кварц) | 121 |
| DC+ | 127 (сажа + кварц + технический углерод) | 121 |
| Импульсный+, 30 Гц, $D = 20\%$ | 132 (сажа + кварц) | 125,7 |
| Импульсный+, 30 Гц, $D = 20\%$ | 130 (сажа + кварц + технический углерод) | 125,7 |

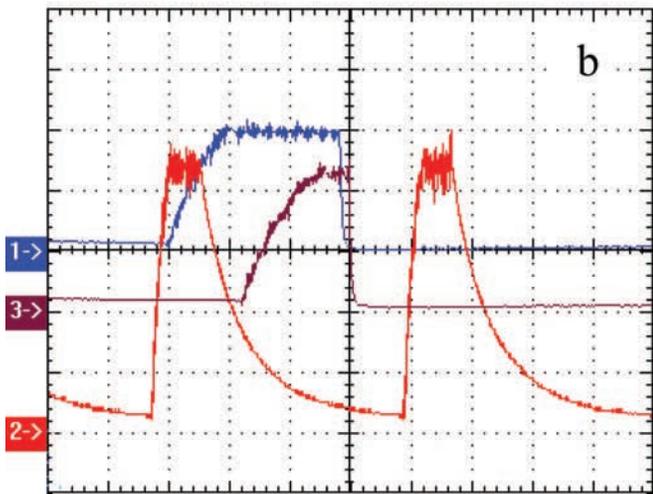
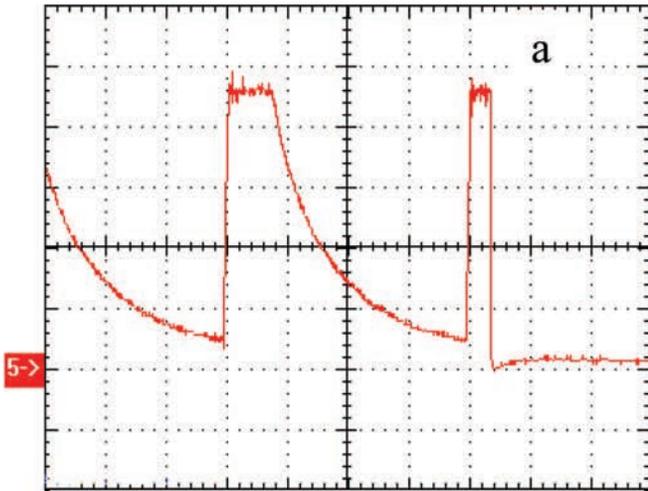
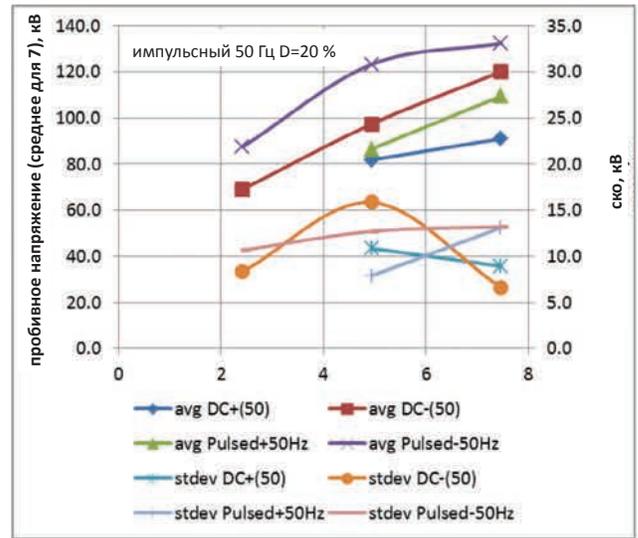


Рисунок 11. Типичные формы импульсных колебаний. (а) Последний импульс перед пробоем, за которым следует импульс, во время которого произошел пробой. Промежуток = 7,47 мм, нагрузка = 82 МОм, отрицательная полярность, PRR = 50 Гц, горизонтальный масштаб = 5 мс/дел., вертикальный масштаб = 30 кВ/дел. 5→ указывает на нуль на вертикальной оси. (б) Развертки 1 и 3 показывают импульс, на котором произошел пробой; горизонтальный масштаб 0,5 мс/дел., вертикальный масштаб 60 кВ/дел. На развертке 2 показан продолжительный задний фронт импульса, когда пробой не происходит; горизонтальный масштаб 2 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел. 1→, 2→, и 3→ указывают на вертикальной оси нули для соответствующих разверток. Промежуток = 4,94 мм, нагрузка = 20 МОм, отрицательная полярность, PRR=120 Гц.

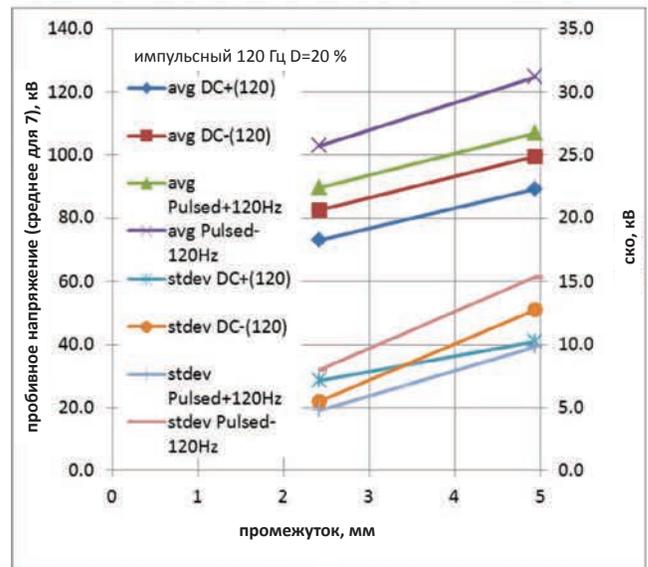
Из таблицы 4, в которую сведены результаты всех испытаний, видно, что пробивное напряжение последовательно выше в условиях импульсного режима, чем при постоянном токе.

Заключение

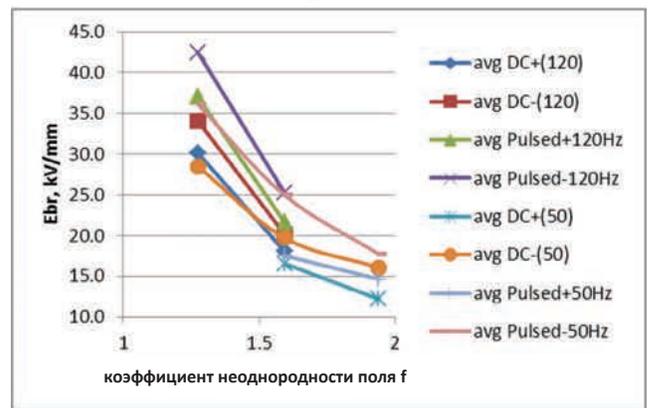
Представленные выше результаты наводят на мысль о том, что при разработке масляной изоляции для условий импульсного режима на частотах вплоть до 100 Гц возможно уменьшение толщины изоляции от 10 до 20 % относительно значений, требуемых



(а)



(б)



(с)

Рисунок 12. Результаты испытаний (2011 г.). (а) Испытания при постоянном токе и в импульсном режиме при PRR = 50 Гц, D = 20 %. (б) Испытания при постоянном токе и в импульсном режиме при PRR = 120 Гц, D = 20 %. (с) Зависимость пробойной напряженности поля Ebr от коэффициента неоднородности поля f. Зависимость с построена с использованием данных а и б (отметим единообразие легенд серий данных для а, б и с).

Таблица 4. Возрастание пробивного напряжения (BV) в процентах для импульсных форм сигналов относительно их аналогов при постоянном напряжении [D = 50 % при частоте повторения импульсов PRR = 10 Гц, D = 20 % для других значений PRR].

| PRR, Гц | Полярность | |
|---------|---------------|---------------|
| | Положительная | Отрицательная |
| 10 | 15,6 | 10,4 |
| 30 | 14,9 | 10,3 |
| 50 | 12,0 | 16,6 |
| 120 | 19,3 | 22,2 |

для постоянного тока. Однако следует проявлять осторожность по причине немногочисленности испытаний, выполненных в весьма ограниченном диапазоне параметров. При испытаниях в масле присутствовали только твердые нерастворимые примеси, и состояние масла было в значительной степени неуправляемым. Следует также признать, что намного большие объемы масла, подвергающиеся воздействиям в реальных системах, приводили бы к низшим пробивным напряжениям, сравнимым с нашими результатами для испытательных промежутков (см. гл. 6 в [5]).

Так как в масле присутствовали только твердые примеси, следует рассматривать мостовой механизм пробоя. Для постоянного тока или импульсов с длительностью больше, скажем, 50 мс, частицы могут образовать мост, который способен инициировать пробой [1], [2], [4]–[7]. Это можно аргументировать тем, что результаты исследования в настоящей работе согласуются с этим аварийным механизмом. При более высоких частотах (от 30 до 120 Гц) пробой происходил главным образом на переднем фронте импульса или сразу же после него, тогда как при 10 Гц (и более продолжительных импульсах) он происходил главным образом на плоской вершине или заднем фронте импульса. Поэтому завершение пробоя занимает несколько десятков миллисекунд, что уверенно наводит на мысль о том, что действовали медленные процессы.

Приложение

В этом разделе мы численно определяем неоднородность поля в испытательном промежутке, и влияние земли в этом случае симметричного соединения. Известно, что даже отдаленная земля может вызывать резкие изменения в распределении поля, когда они менее всего ожидаются (см. в [17] пример подвешенной высоко над землей двухпроводной линии передачи с расстоянием между проводами на несколько порядков меньше расстояния от земли).

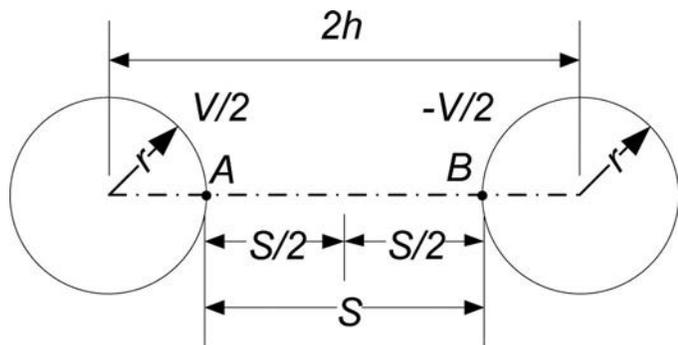


Рисунок 13. Геометрия промежутка сфера — сфера.

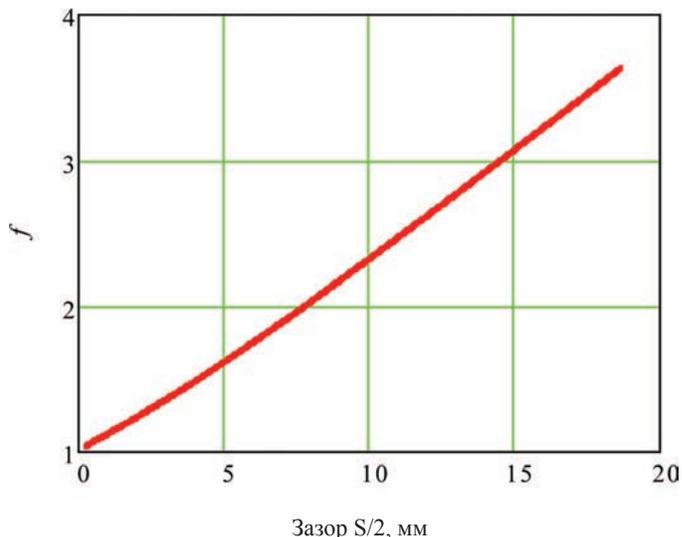


Рисунок 14. Коэффициент неоднородности поля f в функции промежутка $S/2$ плоскость — сфера, с $2r = 12,5$ мм (рисунок 13). $N =$ число членов последовательности (2) = 1 000.

Аналитическое решение для поля на оси промежутка сфера — сфера при симметричном соединении можно получить в виде последовательности, используя метод изображений [18]–[20]. Максимум поля E_m находится в точках А и В на соединяющей сферы оси (рисунок 13). Для симметричного соединения

$$E_m = \frac{V}{2r} \frac{(1+x)^2}{1-x} \cdot \sum_{n=0}^N x^n \cdot \frac{1-x^{2n+1}}{(1+x^{2n+1})^2}, \quad (2)$$

где $x = (h/r) - \sqrt{(h/r)^2 - 1}$ и V есть разность потенциалов между сферами (потенциал одной $V/2$ и другой $-V/2$ относительно земли). Коэффициент неоднородности поля $f = E_m/E_{av}$, где средняя напряженность поля в промежутке $E_{av} = V/S$, и промежуток $S = 2(h-r)$.

Зная, что перпендикулярная оси и равноудаленная от сфер плоскость имеет нулевой потенциал, можно найти максимальную напряженность поля в промежутке плоскость — сфера из (2), разделив пополам приложенное напряжение и разделив на два ширины промежутка (см. рисунок 13). Коэффициент неоднородности поля для разделенного надвое промежутка $S/2$ показан на рисунке 14 для диапазона ширины зазора.

Исследование влияния положения земли на распределение поля выполнено посредством анализа методом конечных элементов (Maxwell 2D Student Version [21]). Используя осесимметричную аппроксимацию (координаты R-Z), мы проанализировали симметричные и несимметричные соединения. Некоторые примеры моделирования показаны на рисунках 15–18. Здесь Z — ось вращения, и R — радиальная координата. Положительный электрод в виде установленной на стержне сферы показан красным цветом, а отрицательный электрод в виде диска показан синим (см. рисунок 3). Отметим, что случай симметричного соединения с открытой границей (рисунок 18, нулевое напряжение в бесконечности) наиболее близок к идеальному случаю (рисунок 13). Обнаружено, что присутствие земли влияет на распределение поля только незначительно, также как и высоковольтные проводники, при условии, что промежуток намного меньше диаметра диска. Таким образом, в наших испытаниях f можно надежно оценить из рисунка 14. Несоответствие между аналитическими решениями, полученными с помощью (1) и (2), и результатами анализа методом конечных элементов для промежутка сфера — сфера обычно меньше 3 % (график поля не показан).

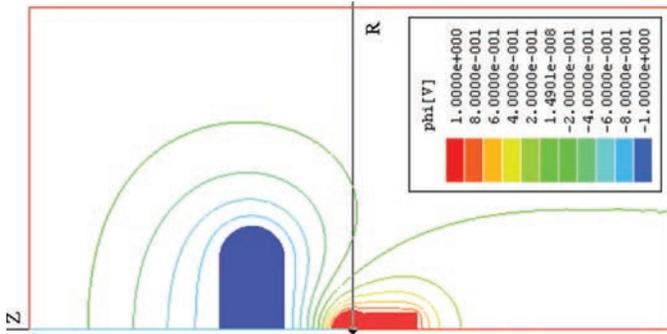


Рисунок 15. Распределение поля с симметричным соединением, заземленная граница показана красной линией. Положительный электрод (установленная на стержне сфера), показанный красным цветом, имеет потенциал $\phi = 1$ В. Отрицательный электрод (диск), показанный синим, имеет $\phi = -1$ В. Зазор = 15 мм, коэффициент неоднородности поля $f = 2,8$.

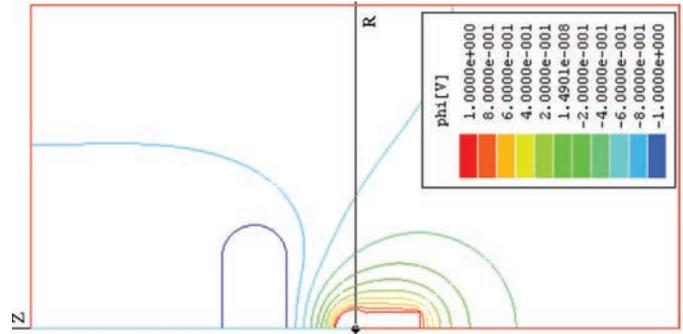


Рисунок 18. Распределение поля с симметричным соединением, открытая граница, $f=3,2$, напряжение $\phi = 1$ В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера), напряжение $\phi = -1$ В приложено к отрицательному электроду (диск).

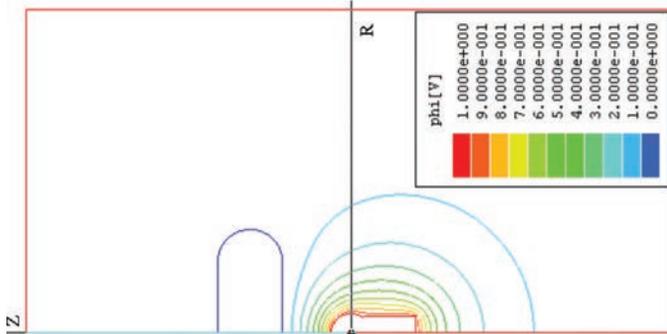


Рисунок 16. Распределение поля с отрицательным электродом (диск) и заземленной границей, $f = 3,3$, напряжение $\phi = 1$ В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера).

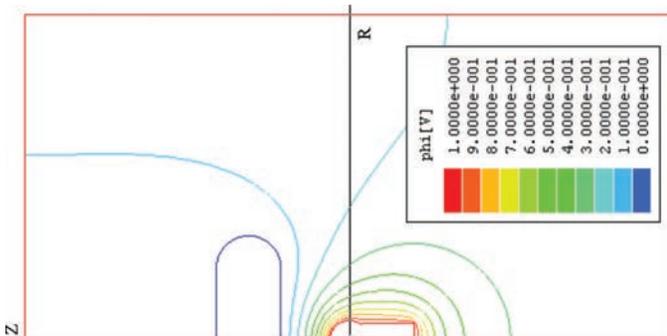


Рисунок 17. Распределение поля с заземленным отрицательным электродом (диск), открытая граница, $f = 3,15$, напряжение $\phi = 1$ В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера).

Благодарности

Авторы благодарят Spellman High Voltage Electronics Corp. за поддержку их работы.

Библиографический список

- [1] I. Adamczewski, *Ionization, Conductivity and Breakdown in Dielectric Liquids*, London, UK: Taylor & Francis, 1969.
- [2] T. J. Gallagher, *Simple Dielectric Liquids*, Oxford, UK: Clarendon Press, 1975.
- [3] T. J. Lewis, "Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Ins.*, vol. 1, no. 4, pp. 630–643, 1994.
- [4] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Strong-Field Region*, Moscow, Russia: Fizmatlit, 1958.
- [5] V. Y. Ushakov, *Insulation of High-Voltage Equipment (Power Systems)*, Berlin, Germany: Springer, 2004. (Translation from Russian edition, 1994).
- [6] R. A. Lipshtein, and M. I. Shakhnovish, *Transformer Oil*, 3rd ed., Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1983. (English translation of *Transformer Oil*, 2nd ed., Jerusalem, Israel: Israel Program for Scientific Translations, 1970).
- [7] V. Ya Ushakov, V. F. Klimkin, and S. M. Korobeynikov, *Impulse Breakdown of Liquids*, Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [8] Power supply & x-ray tube in an integrated subsystem [Online]. Available: http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Downloads/Monoblock_catalog.ashx
- [9] P. L. Bellaschi and W. L. Teague, "Dielectric Strength of Transformer Insulation," *Electr. Eng.*, vol. 56, no. 1, pp. 164–171, Jan. 1937.
- [10] SL Series of high voltage power supplies [Online]. Available: <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/SL.ashx>
- [11] *Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes*, ASTM D 1816-84a, 1990.
- [12] <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/HVD.ashx>
- [13] *Insulating Liquids—Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency*, 2nd ed., IEC 156, 1995.
- [14] Insulation Liquid, by O. Hjortstam, T. Auletta, A. Jaksts, R. Liu, L. A. A. Pettersson, and L. Walfridsson (2008, Jun. 19), WIPO Patent Application WO/2008/071704.
- [15] J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. O'Sullivan, L. A. A. Pettersson, O. Hjortstam, and R. Liu, "Electron scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers," presented at 2009 Joint Electrostatics Conference, Boston, MA, Jun. 2009.

- [16] J. G. Hwang, "Elucidating the Mechanisms Behind Pre-breakdown Phenomena in Transformer Oil Systems," PhD Thesis, MIT, Cambridge, MA, 2010.
- [17] Pokryvailo, A., Yankelevich, Y., Nissim, N., Baksht, R., and Ashkenazy, J., "Development of Short Pulsed Corona on Two-Wire Transmission Line," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 34, no. 1, pp. 104–114, Feb. 2006.
- [18] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Strong-Field Region*, Moscow, Russia: Fizmatlit, 1958.
- [19] K. A. Rezvykh, "Calculation of electrostatic fields," *Energia*, vol. 34, no. 1, pp. 73–75, 1967.
- [20] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering*, 2nd ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1984/2000.
- [21] Maxwell 2D Student Version, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, 2002.



Алекс Покрываило родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Центре ядерных исследований Soreq в Израиле, сейчас является руководителем научно-исследовательских работ в Spellman High

Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Его текущие и недавние работы относятся к разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, выполнил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т. д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), владелец более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.



Костел Карп (Член IEEE начиная с 2006) родился в Румынии. Он получил степень бакалавра технологий в Политехническом институте г. Яссы (Румыния) в 1986, и с 2002 г. является сотрудником Spellman High Voltage Electronics Corporation. Основной областью его специализации является силовая электроника, особое внимание уделяется высоковольтным источникам питания высокой мощности для применения в промышленности и медицине.