

Сравнительные испытания простых концов высоковольтных кабелей

Ключевые слова: высоковольтный кабель, постоянный ток, полиэтиленовая изоляция, усачные трубки, ленты для защиты от коронного разряда, коронный разряд, пространственный заряд

Введение

В высоковольтных системах концы кабелей являются одним из самых слабых звеньев. Большинство отказов происходит на стороне заземленного экрана. Эта сторона в особенности подвержена воздействию электрического поля в местах соединений в свободном пространстве. Контроль поля и строгое соответствие технологических процессов являются ключевыми для надежного функционирования. Первое реализовывалось в течение столетия с помощью выравнивающих конусов в соединениях с заполнением твердым диэлектриком. Позже с большим успехом для коронозащиты использовались нелинейные материалы в виде краски, лент и труб (см., например, [1]–[3] и их библиографию). В приложениях для постоянного тока, которые представляют основной интерес в этой статье, спадающая характеристика удельное сопротивление — напряженность обеспечивает эффективное отталкивание электрического поля от конца экрана, где оно сильнее всего.

Опубликовано множество расчетов поля для концов кабелей, выполненных аналитическими и численными методами с использованием линейного и нелинейного подходов [1]–[6]. Понятно, что они не рассматривают образование пространственного заряда, возникающего в результате ионизации вокруг острых краев. Фактически большинство конструкций избегают сильных полей, способных вызвать ионизацию. Похоже, что работ, рассматривающих протекающий в конце кабеля ток утечки (LC), немного или совсем нет. В слабых точных прецизионных высоковольтных приложениях эти токи могут быть сопоставимы с током нагрузки и, будучи по природе нестабильными, могут компрометировать стабильность. Одновременно с этим недорогая конструкция ограничивает использование высококачественных материалов и (или) тщательную проработку метода управления полем. Эти ограничения особенно важны в местах соединений в свободном пространстве, характеризующихся очень неблагоприятной концентрацией напряженности в заделке экрана.

В свете изложенного выше были выполнены испытания нескольких видов концов высоковольтных кабелей с полиэтиленовой изоляцией для проверки на диэлектрическую прочность и LC вплоть до уровня пикоампер. В цель этой работы не входит исследование явления частичных разрядов (PD) в основной части кабеля или в его концах, хотя мы полностью осведомлены о возможной корреляции между PD и LC.

Экспериментальная установка

В этом разделе описаны компоновка испытательной установки, конструкция испытанных кабелей и порядок выполнения эксперимента.

**Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo),
Костел Карп (Costel Carp)
и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)**
Spellman High Voltage Electronics Corporation
475 Wireless Boulevard
Hauppauge, NY 11788

В концах высоковольтных кабелей токи утечки часто берут начало в заземленном экране. Конструктивные факторы значительно влияют на их абсолютную величину и поведение во времени.

Испытательная установка

Испытательный стенд (рисунок 1) состоит из блока испытательного источника питания (PSU) V1 с его высоковольтным кабелем T1, испытываемого кабеля (CUT) T2, а также средств измерений и оборудования сбора данных. Два PSU (серии Spellman SL130kV и XRF180kV) обеспечивают плавное регулирование напряжения и высокую стабильность в диапазоне 0–130 кВ и 0–180 кВ для положительной и отрицательной полярностей соответственно. Высоковольтные клеммы CUT и кабеля PSU соединены вместе, тогда как экран CUT заземлен через средство измерений тока (пикоамперметр Keithley 6487). Типовая физическая реализация показана на рисунке 2.

Высоковольтные клеммы всех кабелей были физически соединены с высоковольтным электродом делителя напряжения (Spellman, модель HVD-100) [7], способным подавлять коронный разряд вплоть до 130 кВ, как подсказал электрический анализ поля. Таким образом LC, создаваемые механизмом ионизации (коронный разряд) только на стороне экрана CUT, собирались и направлялись через пикоамперметр. Чтобы исключить возникновение тока в конце CUT с клеммами, мы защитили его экран посредством заземленного медного электрода.

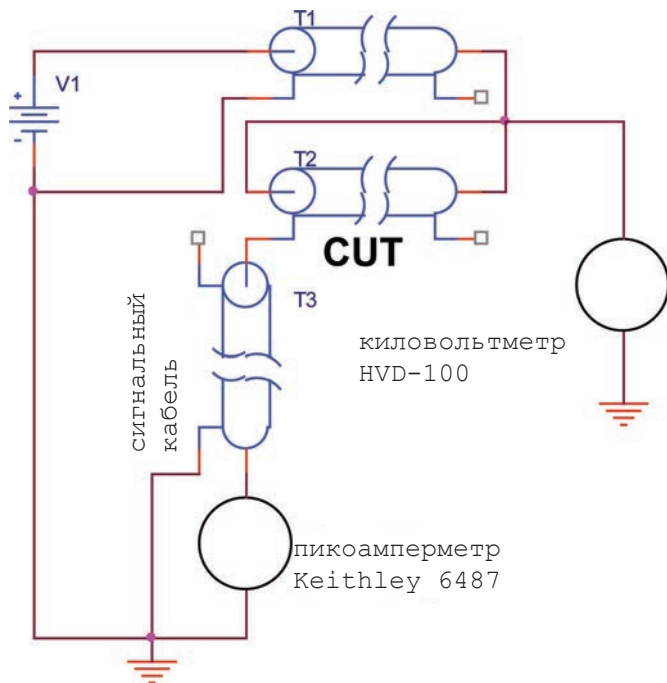


Рисунок 1. Компоновочная схема испытательной установки.

Испытываемые кабели

Были изготовлены несколько испытываемых образцов из кабеля 2124 Dielectric Sciences Polyethylene с изоляцией из полиэтилена (PE). Все они были приблизительно 2,5 м длиной. Их основные параметры сведены в таблице 1, а фотографии некоторых из них показаны на рисунке 3. Аббревиатурами FC и SHT обозначены ровная обрезка и усадочная трубка соответственно (использовались SHT из радиационно облученного полиолефина компании Alpha Wire Company). Полупроводниковая лента для коронозащиты VonRoll 217.21 изготовлена на основе SiC и обнаруживает нелинейное поведение. Ее проводимость возрастает в сильных полях, эффективно подавляя корону. Лента NiK 6501 компании Dielectric Sciences определена как проводящая. Однако ее удельное сопротивление оказалось слишком велико для измерений при низком напряжении с помощью цифровых вольтметров. Ее данные отсутствуют.

Методика испытаний

Для LC каждый кабель проверен с приращениями в 10 кВ вплоть до 90 кВ и с приращениями 5 кВ выше 90 кВ. CUT#6 не был проверен при отрицательной полярности. Важно отметить, что напряжение изменялось монотонно, всегда с возрастанием. Испытательное

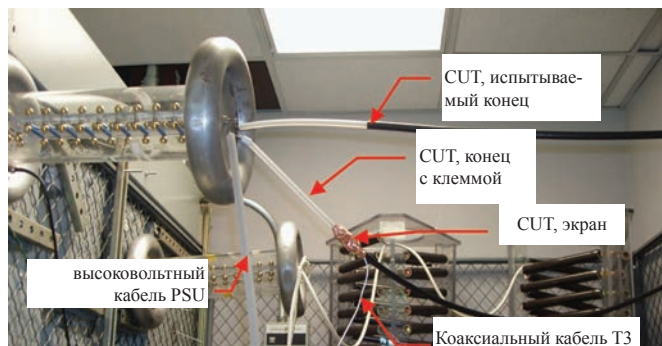


Рисунок 2. Экспериментальная установка.

Таблица 1. Описание испытываемых кабелей		
Обозначение испытываемых кабелей	Метод обработки конца	Длина конца l (рисунок 3d, f), см
(CUT#1)	FC, без SHT	20
(CUT#2)	FC, SHT	20
(CUT#3)	FC, SHT	14,7
(CUT#4)	Диаметр уплотнительного кольца с круглым сечением 2 мм, SHT	14,7
CUT#5	Экран отвернут на защитную оболочку, лента 217.21	14,7 см, 3 см от экрана с покрытием 217.21
CUT#6	Экран отвернут, NiK 6501	14,7 см, 3 см от экрана с покрытием лентой NiK 6501

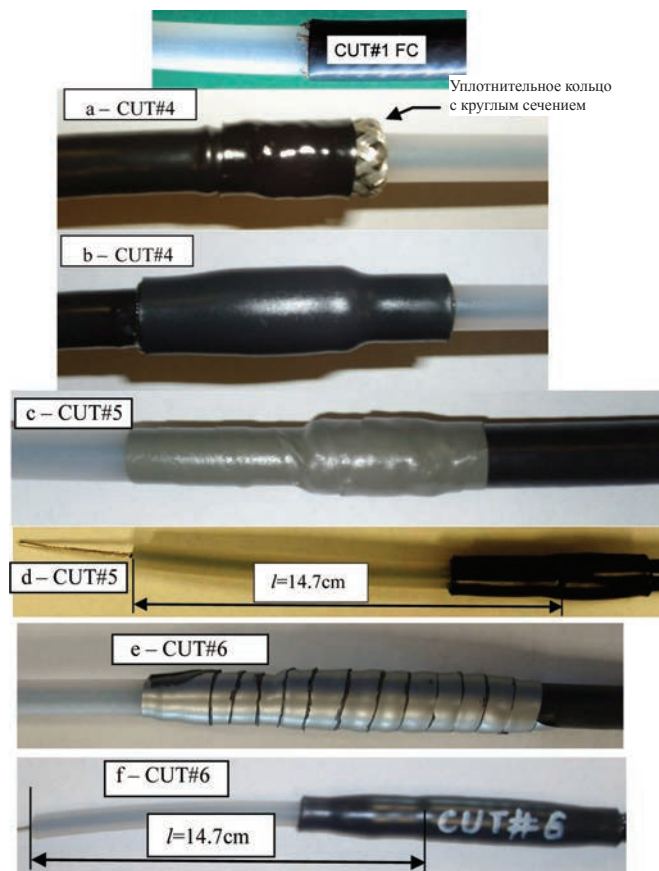


Рисунок 3. На CUT#1 видны свободно выступающие металлические нити оплетки. а) CUT#4, экран отвернут на защитную оболочку и удерживается усадочной трубкой (SHT); б) CUT#4, дополнительное покрытие SHT; в) CUT#5, экран отвернут на защитную оболочку и удерживается полупроводниковой лентой Von Roll 217.21 выходящей ~3 см на открытый полиэтилен (PE); д) CUT#5 готовый для испытания, покрытие SHT поверх полупроводниковой ленты; е) CUT#6, экран отвернут и удерживается NiK 6501 выходящей ~3 см на открытый PE; ф) CUT#6 готовый для испытания, покрытие SHT поверх ленты NiK.

напряжение прикладывалось в течение минуты перед сбором данных LC, передаваемых из пикоамперметра Keithley в ПК с помощью программного обеспечения Keithley Ex- ceLINX. При каждом измерении собирались и сохранялись тридцать пять значений; длительность измерения в среднем составляла 46 с. Вольт-амперные характеристики построены для средних значений.

Температура окружающего воздуха и влажность были обычно 25 °С и 60 % соответственно. Их не контролировали, но маловероятно, что они значительно отличались в течение сбора данных.

Кабели CUT#3, 4, 5, и 6 были подвергнуты испытаниям пробивного напряжения. Напряжение поднимали со скоростью приблизительно 2 кВ/с до пробоя, а затем снижали до уровня, по меньшей мере, на 20 кВ ниже зарегистрированного пробивного напряжения. Испытание повторялось от 2 до 4 раз. Принимая во внимание повреждающее воздействие на термоусадочную изоляцию и полупроводниковую ленту, их заменяли перед испытанием с противоположной полярностью. Вследствие небольшого числа проб при разрушающем испытании усреднение или иная статистическая обработка данных не применялась. Для документирования характера поверхностного перекрытия снимали на видео.

Экспериментальные результаты

Измерение тока утечки

Первые измерения для получения исходных данных выполнялись на оголенном кабеле CUT#1 (FC). LC был стабилен во времени, особенно при напряжениях положительной полярности (заземленный отрицательный экран) выше 20 кВ, как показано на рисунке 4а. LC достигал 40 мкА при +90 кВ и 98 мкА при -90 кВ (рисунок 4б). С целью проверки действительного прохождения тока в кабельном экране проводился дополнительный эксперимент, в котором FC защищался электродом с относительно меньшей кривизной поверхности. При этом ток уменьшился до 3 мкА при +90 кВ. Очевидно, что ток создавался коронным разрядом.

Покрытие конца экрана материалом SHT подавило утечку на порядок (рисунок 5), особенно при положительной полярности, что также подтверждает происхождение тока утечки в месте среза экрана на испытываемом конце кабеля. Сокращение длины оголенного РЕ до $l = 14,7$ см у CUT#3 привело к несколько большей утечке. Высота планок погрешностей на этих и подобных графиках представляет среднее квадратическое отклонение, вычисленное для всех 35 измерений. Применение кольцевой заделки конца (CUT#4) с SHT, с такой же длиной как у оголенного РЕ, обусловило падение LC на порядок по сравнению с FC CUT#3 (рисунок 6) при обеих полярностях (сравните с рисунком 5).

CUT#5 с полупроводниковой лентой и CUT#6 с лентой NiK (рисунок 7) имели самые низкие LC порядка 1 нА при 100 кВ при положительной полярности. Также токи довольно плавно возрастали с увеличением напряжения, т. е. было очень мало перегрузок пикоамперметра в диапазоне 200 нА, тогда как другие кабели можно было испытать только в диапазоне 20 мкА при 100 кВ. CUT#5 был также испытан при отрицательной полярности. LC был большим (рисунок 8), даже выше, чем у CUT#4 (рисунок 6).

Токи LC при отрицательной полярности всегда превышали токи положительной полярности. Причины этого обсуждаются в разделе «Анализ и обсуждение».

Испытания пробивного напряжения

Испытания проводились согласно изложенному в разделе «Методика испытаний».

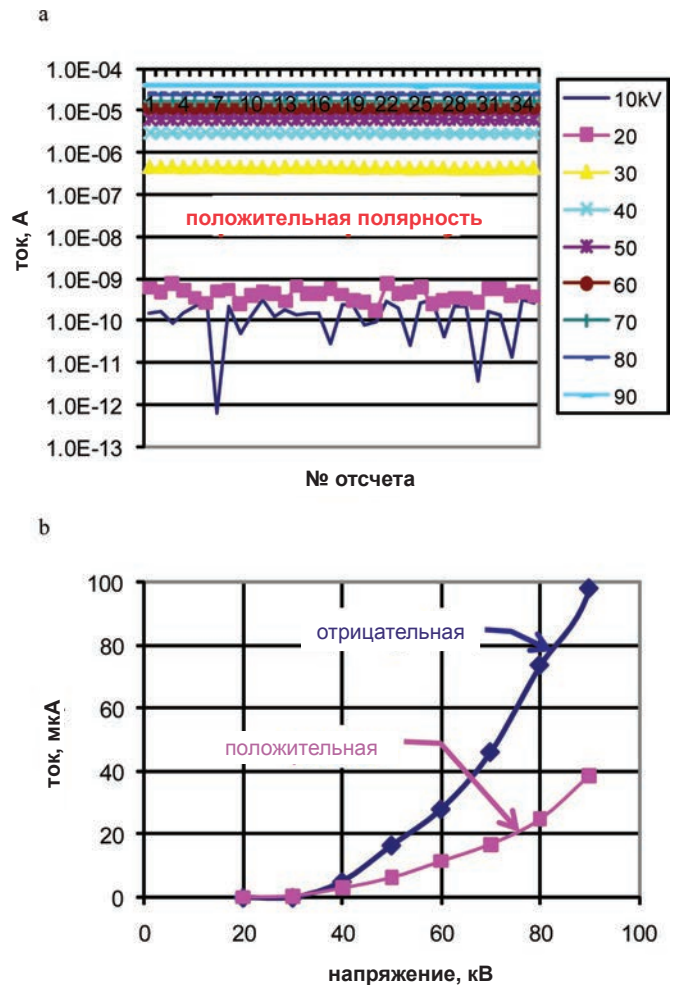


Рисунок 4. Ток утечки (LC) для CUT#1 (ровная обрезка, без усадочной трубки). а) LC в зависимости от времени (номера отсчета) при положительной полярности; б) LC в функции приложенного напряжения при положительной и отрицательной полярности.

При положительной полярности для CUT#3 первое поверхностное перекрытие происходило при 104 кВ по поверхности испытываемого конца. Последующие пробои (при 124 кВ) происходили по поверхности намного более длинного конца с клеммой. Изменение пути можно объяснить обработкой экрана, т. е. удалением свободных металлических нитей дугой.

Характер поверхностного перекрытия CUT#4 отличается: искровой канал соединяет экран и электрод высоковольтного делителя напряжения HVD-100 через воздух (рисунок 9). Первый пробой происходил при 124,5 кВ, последующие при 112, 113 и 117 кВ. Поведение CUT#5 и CUT#6 очень похоже, но сильно отличается от других образцов. Пробой происходил при 130 кВ после воздействия в течение ~10 с. Первое поверхностное перекрытие достигает завернутого конца экрана, что отмечено стрелкой на рисунке 10. Последовательные пробои происходили при таком же напряжении, но светящийся канал закончился у конца усадочного рукава.

При отрицательной полярности пробой CUT#4 возникает на поверхности РЕ, с искровым разрядом, привязанным к уплотнительному кольцу. Первый пробой происходил при 126 кВ, последующие при 109 и 104 кВ, почти идентично случаю с положительной полярностью. Пробой CUT#5 происходил при 136 кВ после воздействия в течение ~5 с. Первое поверхностное перекрытие

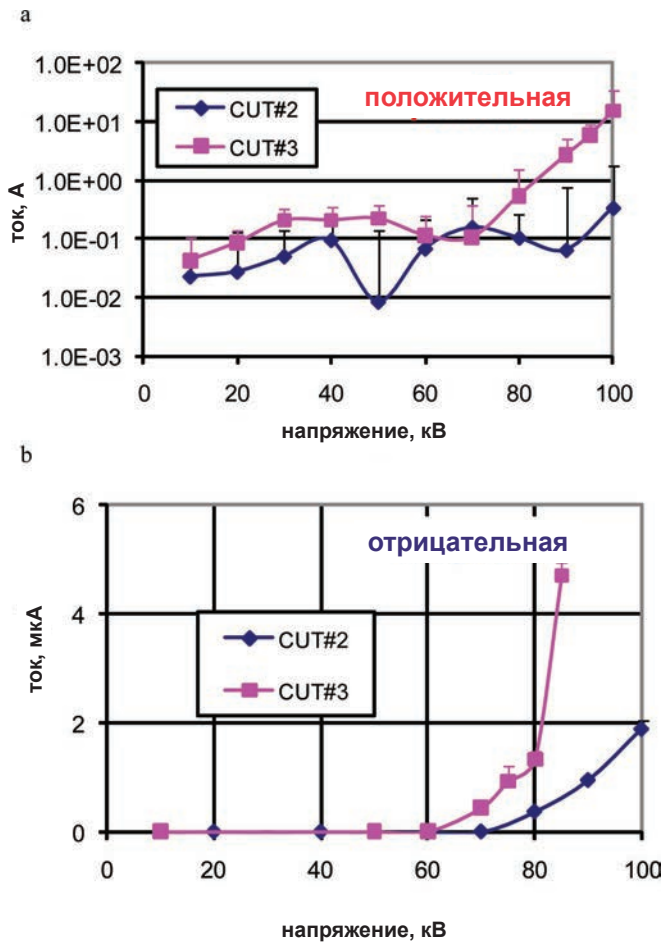


Рисунок 5. Ток утечки в функции приложенного напряжения для CUT#2 [ровная обрезка (FC), усадочная трубка (SHT), $l = 20$ см оголенного полиэтилена] и CUT#3 (FC, SHT, $l = 14,7$ см) при (a) положительной и (b) отрицательной полярности.

достигает завернутого конца экрана, что отмечено стрелкой на рисунке 11. Второй пробой происходил при том же напряжении, но формирование интенсивного коронного разряда начиналось при 80 кВ. Другие кабели при отрицательной полярности не были испытаны.

Анализ и обсуждение

Система изоляции кабеля, состоящая из PE, SHT и воздуха, трудно поддается анализу по причине ее неточно определенной геометрии и нелинейных электрических характеристик некоторых материалов. Поэтому точные электрические вычисления поля трудны, если не невозможны. Однако можно наблюдать несколько общих свойств.

В системах постоянного тока токи проводимости задают распределение поля, но во время быстрых переходных процессов и в условиях переменного тока (50 Гц и выше) более важны токи смещения. Другими словами, проводимость материала доминирует при постоянном токе, а диэлектрическая проницаемость материала доминирует при переменном токе. Сейчас это хорошо известно [8]–[11].

Отличия в распространении поля можно видеть на рисунках 12, 13, и 14, созданных с помощью Ansoft Maxwell 2D Student Version

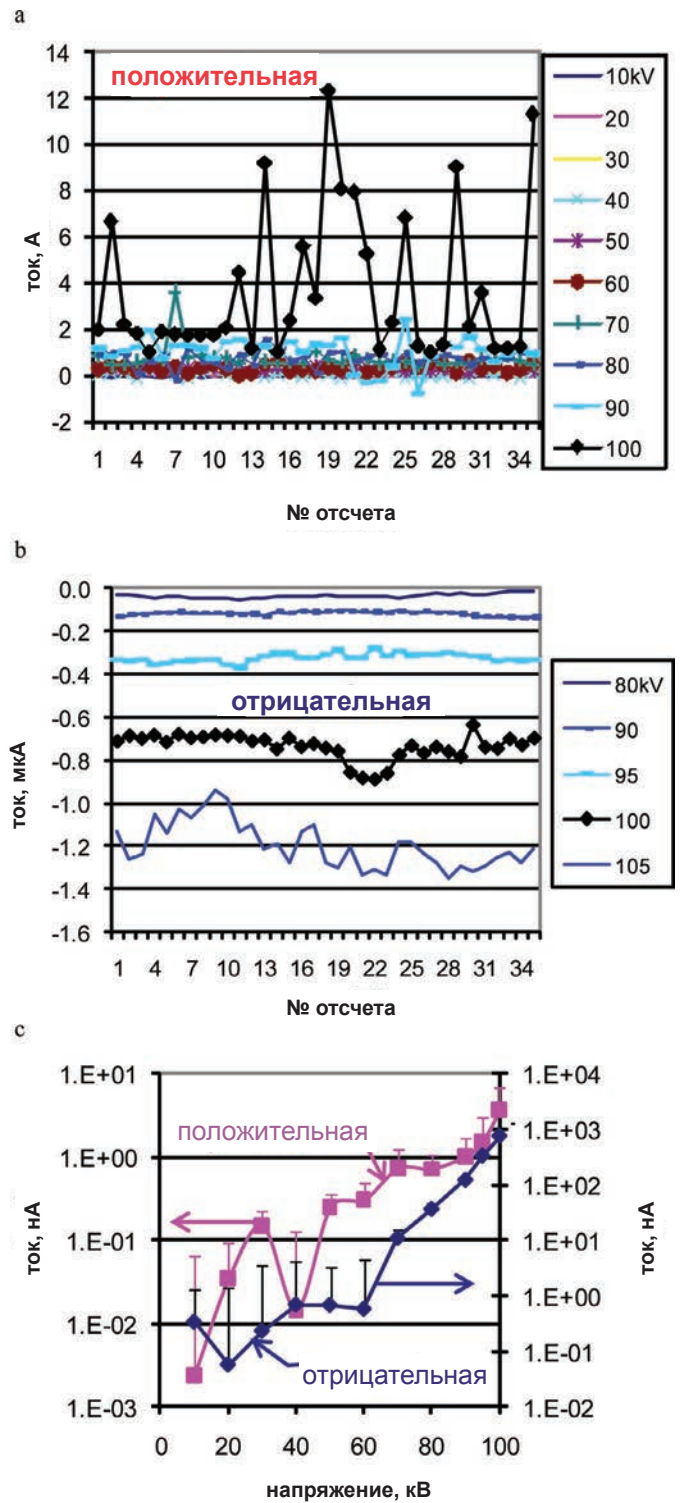


Рисунок 6. Ток утечки (LC) для CUT#4 (уплотнительное кольцо круглого сечения, усадочная трубка). а) LC в зависимости от времени (номера отсчета) при положительной полярности; б) то же при отрицательной полярности, в) LC в функции приложенного напряжения при положительной и отрицательной полярности.

[12]. Предполагаемая геометрия аппроксимирует таковую испытательной компоновки (смотрите рисунок 2). Во всех вычислениях разность потенциалов высоковольтных электродов и земли составляла 1 В. Поскольку задача линейная, результаты можно приводить



Рисунок 7. CUT#5, CUT#6. Ток утечки при положительной полярности.

к прикладываемому напряжению. Графики а и б показаны для случаев постоянного и переменного тока соответственно. Выше отношение удельного сопротивления РЕ и воздуха принято равным 100, и в последующем относительная удельная проводимость РЕ принята равной 2,25. Поле при переменном токе имеет гораздо меньшую однородность. На распределение постоянного тока в очень значительной степени влияет температурная зависимость проводимостей составляющих. Независимо от формы колебаний прикладываемого напряжения поле может быть дополнительно видоизменено процессами ионизации и уменьшено или усилено пространственными и поверхностными зарядами. При отрицательной полярности на остром электроде пространственный заряд стремится сократить максимальное поле. Полупроводниковые ленты обладают одним тем же действием при обеих полярностях, подавляя ионизацию и улучшая стабильность LC.

Очевидно, что прогнозируемые анализом поля высокие поля для FC без SHT ($E > 100$ кВ/см для обоих случаев при напряжении больше 60 кВ), приводили бы к ионизации воздуха. Это проявлено CUT#1 с незащищенным экраном и короткими (~1 мм) беспорядочно выступающими наружу свободными металлическими нитками, которые приводят к дальнейшему усилению поля. Ясно, что истекающие от экрана большие токи (рисунок 4), порождаются подобным короне механизмом, который можно также описать как ползущий разряд. Токи становились измеримыми при напряжениях выше 30 кВ для обеих полярностей. Масштабирование рисунка 13а до 30 кВ предлагает при этом напряжении поле 50 кВ/см, что неожиданно согласуется со значениями для полей при возникновении коронного разряда, в подобных воздушных промежутках; значения приведены на странице 153 в [13]. Согласно с опубликованными данными [13], [14], при таком же прикладываемом напряжении ток коронного разряда больше для положительной полярности заостренного электрода (экрана) или, в терминологии этой статьи, при отрицательной полярности. Следует также подчеркнуть, что хотя положительный коронный разряд вызывает ток больший, чем его отрицательный аналог, разница в режимах униполярного коронного разряда небольшая, интервале 20–30 %. Причина в том, что подвижность положительных и отрицательных ионов в электроотрицательных газах весьма схожа. Развитие положительного стримерного коронного разряда при более высоких напряжениях в больших промежутках имеет тенденцию вызывать намного больший ток, но переходит в искровой при напряжении меньшем, чем напряжение отрицательного коронного разряда [15].

Этот эффект связан со стримерным механизмом разряда, описанным в [14] и [16].

Если удельное сопротивление SHT ниже удельного сопротивления РЕ, поле на краю экрана значительно ослабляется (рисунок 14), ниже уровня возникновения коронного разряда. Этим можно частично объяснить резкое улучшение, которое дает покрытие SHT. Здесь мы приняли значения 10^{14} Ом·м [17], 10^{12} Ом·м [18] и 10^{13} Ом·м для удельных сопротивлений РЕ, SHT и воздуха соответственно. Веуег и др. [19] приводят значение удельного сопротивления $4 \cdot 10^{14}$ Ом·м для воздуха при стандартных условиях, но мы использовали 10^{13} Ом·м, учитывая тот факт, что проводимость газа выше при отсутствии ионизации. Отметим, что термин удельное сопротивление следует применять осторожно, потому что проводимость тока ограничивается насыщением в широком диапазоне напряженности поля, расположенном ниже области возникновения ударной ионизации [14], [20], [21]. Усаживаемая трубка ослабляет поле благодаря значениям ее диэлектрической проницаемости и проводимости, но создает только незначительную ионизацию в остаточных воздушных карманах. Создаваемые таким образом заряды улавливают и нейтрализуют внешнее поле, предотвращая тем самым ионизацию и значительно снижая LC (рисунки 5 и 6). Иногда неустойчивое поведение кривых LC является, вероятно, следствием накопления и распада этих зарядов, эти процессы часто характеризуются большими постоянными времени вследствие высокого удельного сопротивления диэлектриков.

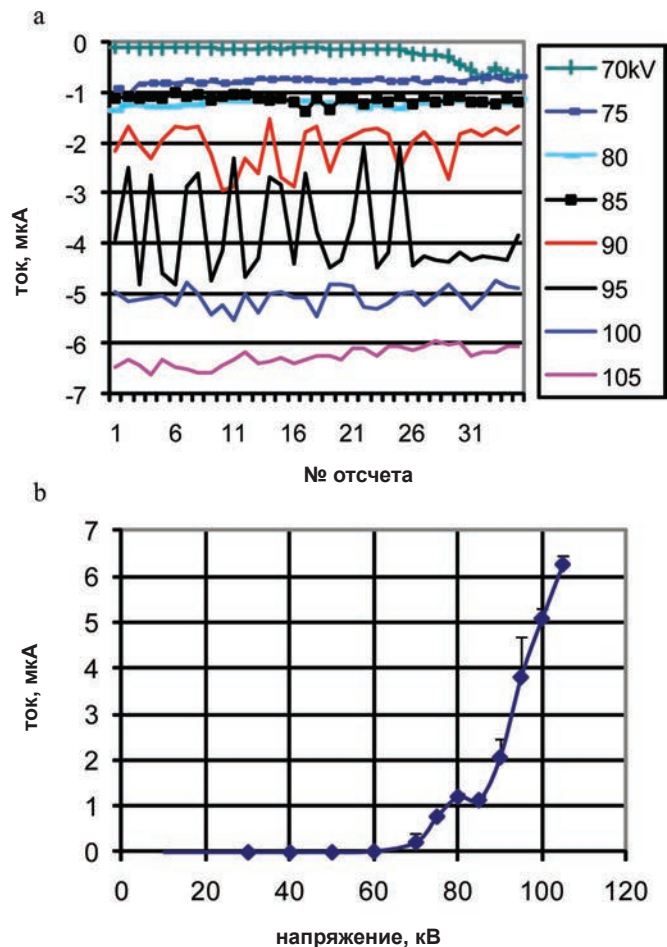


Рисунок 8. CUT#5. Ток утечки (LC) при отрицательной полярности. а) LC в зависимости от времени (номер отсчета); б) LC в функции приложенного напряжения.

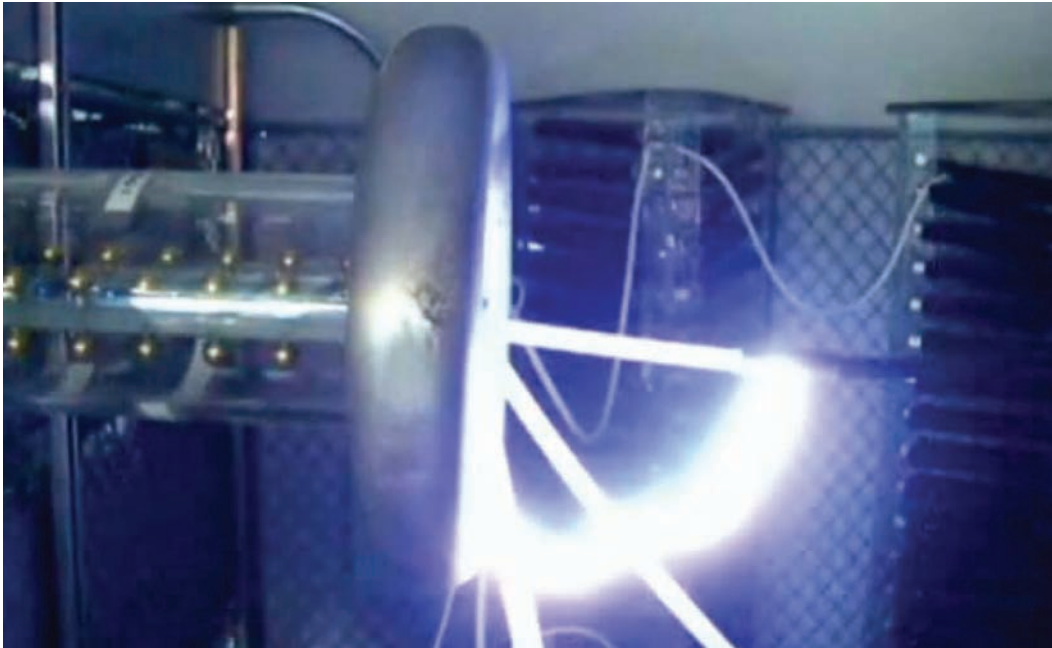


Рисунок 9. CUT#4. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность.



Рисунок 10. CUT#5. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность.

Кольцевая заделка конца уменьшает внешнее поле и превосходит FC тем, что свободные медные нитки отсутствуют. Кольцевая заделка конца была эффективно при обеих полярностях.

При отрицательной полярности кольцевая заделка конца имеет токи LC меньше, чем у остальных образцов. Однако пробивное напряжение у CUT#5 было несколько выше, чем при заделке с использованием уплотнительного кольца. Так как были испытаны только два образца, количественное сравнение не имеет смысла. Однако характер поверхностного перекрытия для этих конструкций информативен. Для обеих полярностей поверхностное перекрытие следовало коротким путем к экрану с FC и кольцевыми заделками концов, но избирало длинный путь в случае полупроводниковой ленты и ленты NiK. Таким образом, поле в конце экрана ослабляется с помощью ленты, и поэтому пробивное напряжение выше.

Ленты коронозащиты обладают эффектом отталкивания поля от экрана. При положительной полярности, CUT#5 и CUT#6 имеют очень устойчивые и низкие токи LC. Их пробивные напряжения были значительно выше, чем у других конструкций.

По нашему мнению, ленты коронозащиты не являются необходимыми для большинства применений с постоянным током,

но предлагают основное преимущество для применений с импульсным и переменным током.

Для кабелей, снабженных SHT, токи LC при положительной полярности были на три порядка ниже, чем при отрицательной полярности. У нас нет убедительного объяснения для этого эффекта. В многочисленных публикациях рассматривается влияние диэлектрических барьеров на пробивное напряжение газовых



Рисунок 11. CUT#6. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность.

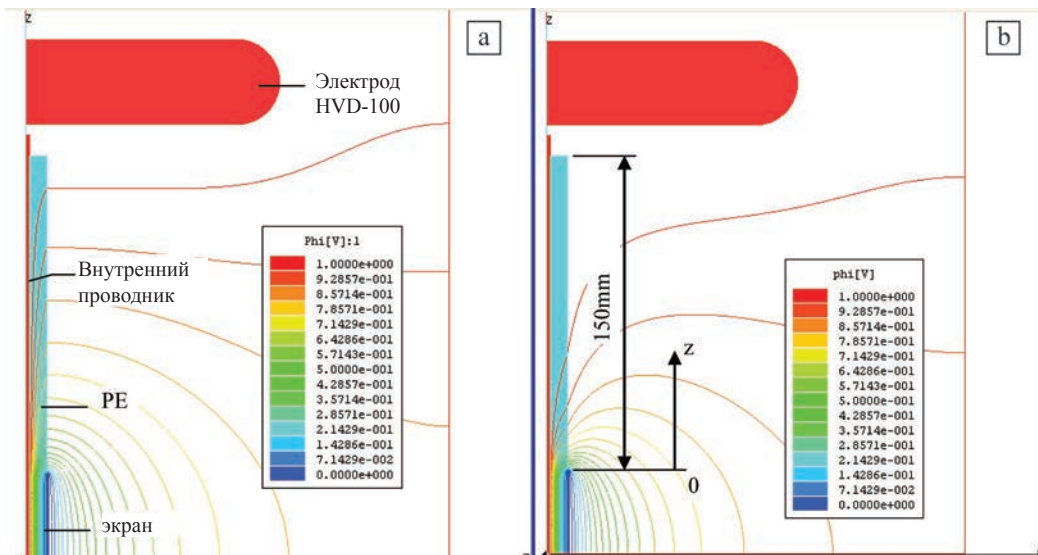


Рисунок 12. Графики поля (эквипотенциальные линии). а) поле постоянного тока; б) поле переменного тока. Разность потенциалов равна 1 В.

промежутков, особенно относительно полярности, расположения барьеров, идентичности газа, его температуры и давления [13], [14], [16], [19]–[23]. Однако в них не обсуждаются токи LC.

Рассмотрим влияние пространственного заряда на механизм разряда в газовых промежутках в сильно неоднородных электрических полях. При отрицательной полярности (положительный экран) притягиваемый к экрану отрицательный пространственный заряд усиливает поле, тем самым способствуя току LC. С другой стороны, при положительной полярности такой же пространственный заряд отталкивается и рассеивается вокруг экрана, эффективно ослабляя поле и подавляя токи LC.

Как правило, в повторяющихся испытаниях пробой воздушных промежутков происходит приблизительно при таком же напряжении, при условии, что электроды не восстанавливают, пространственный заряд, поверхностный заряд или метастабильные не накапливаются, и температура окружающей среды постоянна. Такие эффекты наблюдались при происходящих с высокой частотой повторения импульсных разрядах [24], [25]; импеданс промежутка возрастал и пробивное напряжение уменьшалось при более высоких частотах повторения. В наших измерениях пробивные напряжения при последовательных испытаниях заметно

уменьшались, заставляя предположить отличающийся механизм пробоя. В SHT после нескольких поверхностных перекрытий появлялись отверстия, и поэтому токи LC не подавлялись. Возможно, что при отрицательной полярности и значениях напряжения, при которых токи LC достигают нескольких микроампер, ленты SHT получают тепловые повреждения, за которыми следуют несколько поверхностных перекрытий в результате локализованных потерь мощности, оцениваемых на субваттном уровне.

В контексте концевых заделок высоковольтных кабелей сокращение и стабилизация токов LC существенна для достижения больших пробивных напряжений и большей надежности. Существуют другие важные соображения. Потребляемый от PSU ток обычно стабилен и представляет сумму тока нагрузки и различных токов LC, в том числе и этого кабеля. Представленные в этой работе данные о временном поведении токов LC позволяют оценить уровень стабильности тока нагрузки, достижимой в указанных окружающих условиях. Поэтому, если LC имеет порядок 1 пА и ток нагрузки составляет 100 пА, невозможно ожидать стабильности лучше 1 %, даже если указана стабильность PSU, равная 0,01 %. Подобные эффекты могут вызываться темновыми токами в вакуумных промежутках [26].

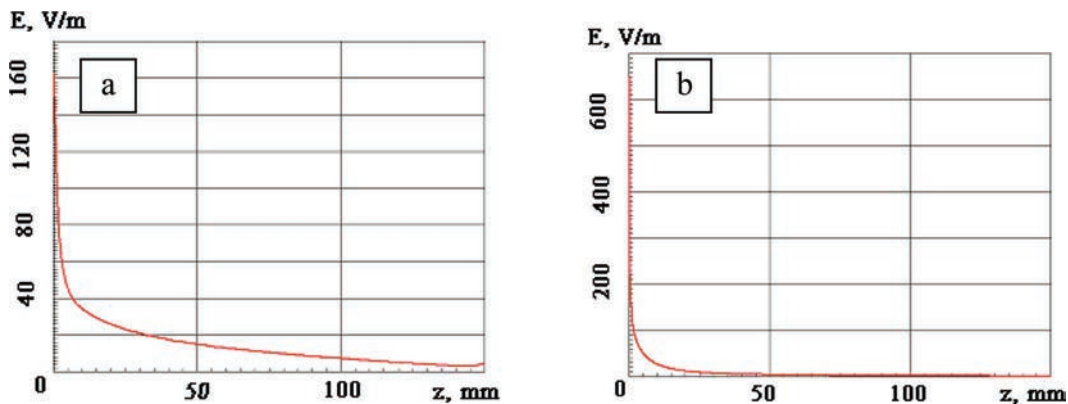


Рисунок 13. Распределение электрического поля вдоль оголенного полиэтилена, начиная от экрана кабеля. Графики а и б на рисунке 12 приведены для случаев постоянного и переменного тока соответственно.

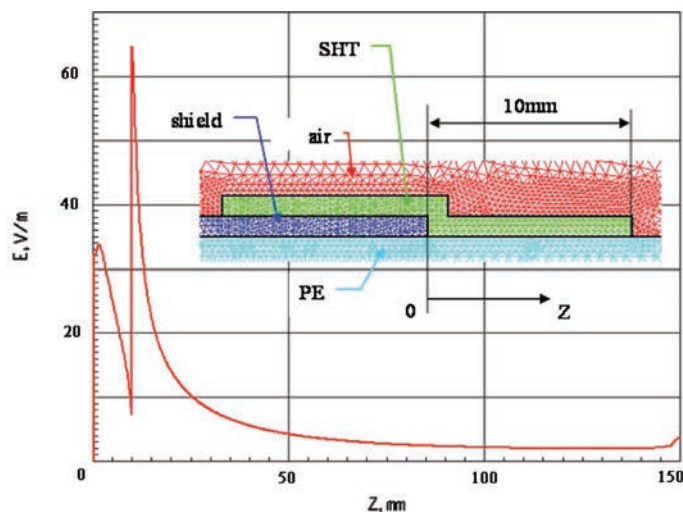


Рисунок 14. Распределение электрического поля вдоль полиэтилена (PE), начиная от экрана кабеля, случай постоянного тока. Полиэтилен, покрытый усадочной трубкой (SHT) миллиметровой толщины. На вставке показана часть геометрии сетки. Удельные сопротивления PE, SHT и воздуха находятся в соотношении 100:1:10.

Заключение

Выполнены испытания токов утечки и электрической прочности для шести различных видов заделки концов экрана кабеля 2124. Ниже приведено краткое изложение основных результатов.

(1) Рукав из усадочной трубки сильно влияет на явления ионизации, эффективно подавляя коронный разряд.

(2) Ровная обрезка экрана оставляет свободные короткие металлические нити, которые увеличивают вероятность повреждения основной изоляции.

(3) Отворачивание экрана назад поверх уплотнительного кольца круглого сечения уменьшает напряженность электрического поля, не оставляет свободных металлических нитей и уменьшает вероятность повреждения главной изоляции. Оно рекомендуется для применений с постоянным током.

(4) Ленты коронозащиты уменьшают (и значительно стабилизируют) токи утечки, на уровне приблизительно 1 нА при 100 кВ и комнатной температуре. Они также увеличивают пробивное напряжение приблизительно до 130 кВ для изоляции длиной 15 см. Они рекомендуются для работы в импульсном режиме и критических применений с постоянным током.

Библиографический список

- [1] P. N. Nelson and H. C. Hervig, "High dielectric constant materials for primary voltage cable terminations," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, no. 11, pp. 3211–321, Nov. 1984.
- [2] J. C. G. Wheeler, A. M. Gully, A. E. Baker, and F. A. Perrot, "Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 23, no. 2, pp. 5–11, 2007.
- [3] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*. IEEE Press, Wiley, 2004.
- [4] S. V. Nikolajevic, N. M. Pekaric-Nad, and R. M. Dimitrijevic, "Optimization of cable terminations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 2, pp. 527–532, April 1997.
- [5] G. Lupb, K. Tucci, N. Femia, and M. Vielli, "Electric field calculation in HV cable terminations employing heat-shrinkable composites with non linear characteristics," in *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Brisbane, Australia, pp. 278–281, 1994.

- [6] J. Mackevich and J. Hoffman, "Insulation enhancement with heat-shrinkable components. Part 111: Shielded power cable," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 31–40, 1991.
- [7] <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/HVD.ashx>.
- [8] P. Gallagher, *High Voltage: Measurement, Testing and Design*. Chichester, UK: Wiley, 1983, p. 197.
- [9] A. I. Dolginov, *High Voltage Engineering*. Moscow: Energia, 1968.
- [10] M. S. Khalil, "International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 13, no. 6, pp. 35–47, 1997.
- [11] A. Pokryvailo, "Analyzing electric field distribution in non-ideal insulation at direct current," in *Proc. Electrimacs 2008*, on CD-ROM, Quebec, Canada, June 2008.
- [12] Maxwell 2D Student Version, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, 2002.
- [13] J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1953.
- [14] L. B. Loeb, *Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms*. Berkeley: University of California Press, 1965.
- [15] K. Parker, *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*. London: IEE, 2003.
- [16] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer, 1991.
- [17] G. G. Raju, *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [18] Shrink Tubing. Available: <http://www.alphawire.com/pages/114.cfm>.
- [19] M. Beuer, W. Boeck, K. Möller, and W. Zaengl, *Hochspannungstechnik*. Springer-Verlag, 1986, 1992. Translation to Russian 1989 (Moscow: Energoatomizdat).
- [20] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [21] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Weak-Field Region*. Moscow: Goskhozizdat, 1949, pp. 218–219.
- [22] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Strong-Field Region*. Moscow: Fizmatlit, 1958.
- [23] V. Y. Ushakov, *Insulation of High-Voltage Equipment (Power Systems)*. Springer, 2004 (Translation from 1994 Russian ed.).
- [24] Y. Yankelevich, R. Baksht, M. Wolf, A. Pokryvailo, J. Vinogradov, B. Rivin, and E. Sher, "NOx diesel exhaust treatment using pulsed corona discharge: The pulse repetition rate effect," *Plasma Sources Sci. Tech.*, vol. 16, pp. 386–391, 2007.
- [25] A. Pokryvailo, M. Wolf, and Y. Yankelevich, "Investigation of operational regimes of a high-power pulsed corona source with an all-solid state pulser," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 4, pp. 846–857, Aug. 2007.
- [26] A. Pokryvailo and V. Okun, "An investigation of stray currents of x-ray tubes having tubular hollow anodes," *Instrum. Methods X-Ray Anal.*, vol. 32, pp. 120–126, 1984 (in Russian).



Алекс Покрывайло родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в Санкт-Петербурге (Россия) в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Soreq NRC, Явне, Израиль, сейчас является сотрудником Spellman High Voltage Electronics Corporation, Науппаге, NY.

Его текущие и недавние работы относятся к импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, 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), владеет более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.