Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Высокочастотные импульсные электрические разряды на изоляционных барьерах (частичные разряды) в силовой электротехнике

В. А. Алмазов, Э. Ф. Бурцев, В. Р. Васильев, Н. В. Крупенин
ГУП "Всероссийский электротехнический институт имени В. И. Ленина", Москва, Россия

Экспериментально показано, что частичные разряды (ЧР) в устройствах электротехники имеют место при импульсных режимах работы и высоких скоростях нарастания (спада) напряжения (dU/dt), когда электрические поля оттесняются к барьерам — участкам изоляции с минимальными значениями коэффициентов диэлектрической проницаемости ε. Продолжительность ЧР по времени определяется процессами перезаряда внутренних емкостей устройств. ЧР приводят к ускоренному старению изоляционных материалов и могут явиться причиной выхода устройств из строя вследствие необратимого электрического пробоя. Приведены рекомендации по исключению ЧР, переводу их на уровень более высоких напряжений, уменьшению влияния разрядов на работу устройств силовой электротехники.

Анализ проблемы, определение направлений исследований

Проблема ЧР возникла с разработкой первых электротехнических устройств. Сложность проблемы заключается в том, что она охватывает практически все области электротехники: конструирование аппаратов [1—4], электрические разряды [5—7], материаловедение [8, 9], режимы работы устройств [10] и др. За последние 50 лет интерес к изучению ЧР существенно вырос [3, 4, 7, 11—14], поскольку с интенсивностью разрядов связывают дальнейшую безаварийную работу электрооборудования [15].

Принято считать, что ЧР определяются дефектами в электроизоляционных материалах [3, 4, 11, 12, 14]. Это разные микро- и макронеоднородности, воздушные и газовые включения, несплошности материала и другие дефекты. Поэтому при разработке аппаратов на высокие напряжения, особенно в случае создания устройств с уменьшенными массогабаритными показателями, для изоляционных материалов принимаются многократно завышенные допустимые значения рабочих напряженностей электрических полей. Необходимо отметить, что в литературе полностью отсутствует информация об электрических полях в изоляционных материалах электроустройств при импульсных режимах работы и высоких значениях *dU/dt*.

В настоящей работе изложены основные представления о современном состоянии проблемы ЧР, экспериментально определены условия формирования электрических разрядов при применении изоляционных материалов без дефектов, приведены рекомендации по уменьшению влияния ЧР. С этой точки зрения работа направлена на решение актуальных проблем силовой электротехники.

Частичные разряды имеют место в трансформаторах [2, 7, 14, 15], электрических конденсаторах [3, 4, 10, 12], силовых кабелях и других устройствах электротехники. Неоднородность электрических полей в активном диэлектрике объясняется многочисленными дефектами в структуре изоляционного материала. В местах концентрации электрического поля создаются благоприятные условия для возникновения ЧР — неполных пробоев в изоляции, представляющих коронные и скользящие разряды по поверхности или внутри изоляции [3, 4]. Разряды имеются на восходящем и падающем участках импульса напряжения, частота разрядов зависит от скорости изменения напряжения *dU/dt*.

В местах возникновения ЧР происходит разложение жидкого и разрушение твердого диэлектрика под действием ионных и электронных лавин с образованием твердых, жидких и газообразных продуктов. Среди последних образуются сильные окислители — озон, окись азота и др., приводящие к электрохимическому разрушению диэлектрика [4, 10, 16].

Интенсивность ЧР в электрических аппаратах контролируют пьезоэлектрическими и магнитными датчиками [15], а также путем измерения импульсов напряжения или тока, высокочастотные сигналы которых пропорциональны кажущемуся заряду ЧР [17].

К настоящему времени не исследован ряд вопросов, в частности, не отмечены участки, где в аппаратах имеют место электрические разряды, кроме участков с дефектами, отсутствует физическое представление процесса ЧР, роль в разрядах барьеров — мест контактных соединений металл—диэлектрик (М—Д), диэлектрик—диэлектрик (Д—Д), продолжительность процесса ЧР по времени и др.

© Алмазов В. А., Бурцев Э. Ф., Васильев В. Р., Крупенин Н. В., 2004

В электротехнических устройствах токоведущие электроды изолируются одно- или многослойной изоляцией. На рис. 1 схематически (в разрезе) показаны наиболее типичные варианты изоляции двух потенциальных электродов высоковольтных конденсаторов, кабелей и трансформаторов. Геометрические размеры барьеров h_1, h_2, h_3 могут находиться в пределах от междуатомных расстояний 10^{-8} см [18] до нескольких мм и более.

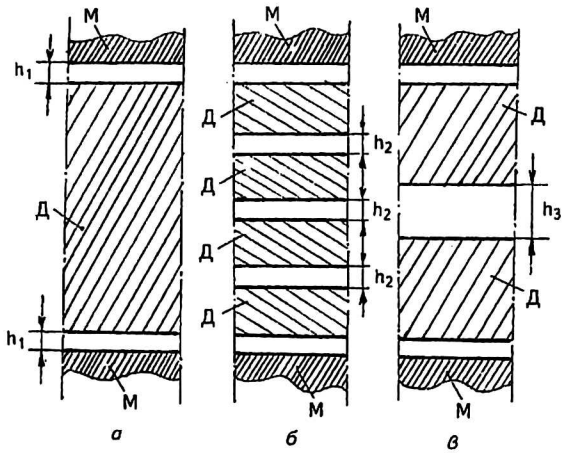

Рис. 1. Варианты схематических конструкций изоляционных промежутков между потенциальными электродами электротехнических устройств:
а — с однослойным диэлектриком; *б* — с многослойным диэлектриком; *в* — с многослойным диэлектриком и разными значениями барьерных промежутков.
М — металлический электрод; Д — диэлектрик; h_1, h_2, h_3 — барьерные промежутки

В случае заряда конденсатора с двухслойным диэлектриком [19] напряженности электрического поля (Е) обратно пропорциональны коэффициентам диэлектрической проницаемости изоляционных материалов (ε): $E_1 / E_2 = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$. В импульсных режимах заряда при высоких dU/dt первоначально все напряжение будет прикладываться к участку диэлектрика с низким ε — к барьерам (см рис. 1). При достижении напряженности электрического поля на участке барьера 10^5 — 10^6 В/см начинается процесс автоэлектронной эмиссии, который переходит в термоэлектронную эмиссию, и наступает развитие электрического разряда [5, 6]. В зависимости от внутреннего сопротивления источника питания, геометрических размеров барьеров (h), внешнего давления и других факторов электрический разряд может принимать разнообразные формы: несамостоятельный (например в случае проникающей радиации), самостоятельный, тлеющий и искровой. Естественно, разряды между разнополярными эквипотенциальными поверхностями М—Д, Д—Д будут иметь импульсный характер.

Электрический пробой на участке изоляции с низким значением коэффициента ε (воздух, масло и др.) называется барьерным разрядом [20]. Последние широко используются в практике для получения озона ($h_3 \approx 0{,}5$ мм), в установках пыле- и газоочистки ($h_1 \approx 10$—55 мм) и для других технологических целей. В дальнейшем в работе будем придерживаться термина "частичные разряды" (ЧР), который отражает все возможные виды рассматриваемых разрядов (в том числе и последовательные) в устройствах силовой электротехники.

На основании проведенного анализа проблемы ЧР определены направления исследований и условия их проведения:

исследования ЧР проводить с применением изоляционных материалов без дефектов (стекло, плексиглас, винипласт, стеклотекстолит и др.);

в качестве объекта исследований ЧР использовать модели электрических конденсаторов как одного из конструктивных элементов устройств электротехники;

заряд конденсаторов проводить путем приложения к электродам импульсов напряжения с высокими значениями dU/dt;

фиксировать начальные моменты амплитудных значений импульсов напряжения, когда на осциллограммах тока начинают регистрироваться ЧР;

контролировать длительность процесса заряда и энергию, затраченную на заряд конденсатора до заданного напряжения.

Техника эксперимента

В качестве рабочих образцов использованы физические модели электрического конденсатора открытой конструкции с разными изоляционными материалами, отличающимися значениями ε [21—23]. Внешние электроды изготовлены из медной фольги толщиной 300 мкм (пара 1 — ∅ 17 мм, пара 2 — ∅ 28 мм, верхний электрод — Е1, нижний электрод — Е2). Фольга прижималась с обеих сторон к испытуемому материалу металлическими прокладками, которые фиксировались токоподводящими винтами с помощью изоляционной струбцины. Это позволяло вести наружное наблюдение за всеми элементами конструкции конденсатора. Площадь испытуемого материала выбиралась из условия исключения внешнего электрического пробоя между обкладками конденсатора (по поверхности и торцу диэлектрика).

Экспериментальная установка позволила измерять разность потенциалов между электродом Е1 и подвижным металлическим зондом [24], который устанавливается на поверхность диэлектрика на расстоянии от периферии Е1, равном $l_1 = 0{,}2$ мм — зонд Z1 и $l_2 = 5$ мм — зонд Z2 ($U_{E1\text{-}Z1}$ и $U_{E1\text{-}Z2}$). Генератор импульсов напряжения (ГИН) установки позволил прикладывать к обкладкам испытуемого конденсатора импульсы напряжения трапецеидальной формы с амплитудным значением в диапазоне (1—24) кВ ($t_{fr} \approx 1$ мкс; t_i по вершине ≈ 6 мкс). Ток заряда I_z, потенциалы на обкладках конденсатора $U_{E1\text{-}E2}$

и потенциалы на зондах $U_{E1\text{-}Z1}$, $U_{T1\text{-}Z2}$ регистрировались с быстродействием 25 МГц (рис. 2). Блок синхронизации обеспечивал запуск осциллографа в любой заданный момент времени заряда конденсатора при f_w = 50 Гц. Давление на металлические прокладки и медные электроды к испытуемому диэлектрику ограни-чивалось уровнем, когда значение I_z переставало расти. Погрешность измерения тока и напряжения не превышала 10 %.

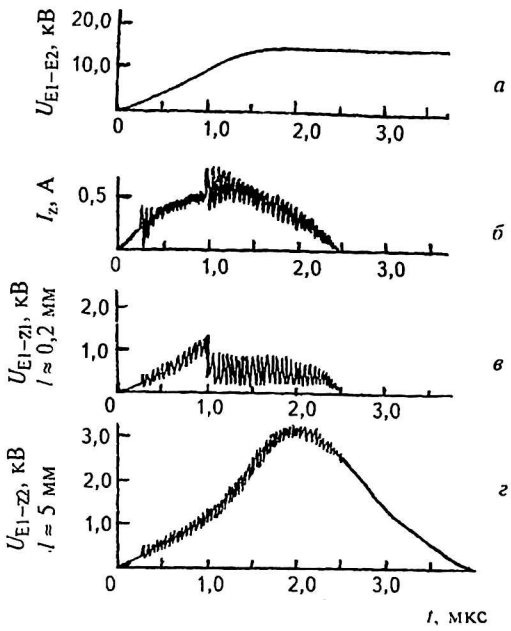

Рис. 2. Типичные осциллограммы импульса напряжения на обкладках конденсатора $U_{E1\text{-}E2}$ (а) (U_a = 15,5 кВ; материал стеклотекстолит толщиной h = 0,6 мм; диаметр электродов D = 17 мм); ток заряда конденсатора I_z (б) и потенциалов $U_{E1\text{-}Z1}$ (в) и $U_{E1\text{-}Z2}$ (г)

При приложении к электродам конденсатора трапецеидальных импульсов напряжения U_a между обкладками протекает ток смещения, равный по форме и амплитудному значению току проводимости внешней цепи [25]. Ток смещения определяется безынерционным ($\leq 10^{-12}$ с) и инерционным ($\geq 10^{-10}$ с) токами поляризации [9], которые образуются движением связанных зарядов. Длительность импульсов тока заряда I_z при амплитудном значении $I_z \approx$ (0,01—1,0) А составляла $t_i \approx$ (2 — 2,5) мкс.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования проведены на разных изоляционных материалах без внешних и внутренних дефектов в одинаковых режимах испытания [21—23]. Во всех опытах с ростом амплитудного значения импульсов напряжения U_a отмечено появление ЧР на барьерах М—Д, Д—Д (см рис. 1). Результаты испытаний отличались в зависимости от коэффициентов ε материала и толщины исследуемых пластин диэлектрика (диаметр внешних электродов 17 мм).

При начальных значениях U_a импульсы тока заряда I_z имели форму полусинусоиды. С ростом U_a для каждого варианта конденсатора при конкретном амплитудном значении напряжения $U_{a\ beg}$ в момент времени, близкий к окончанию процесса заряда (2,0 ≤ 2,5 мкс), на форме осциллограмм I_z начинают регистрироваться высокочастотные (ВЧ) колебания ЧР. Например, для конденсатора с пластиной из стеклотекстолита или гетинакса ($h \approx$ 0,65 мм) колебания наступали при $U_{a\ beg} \approx$ 2,3 кВ; при одном слое фторопластовой пленки ($h \approx$ 250 мкм) ≈ 3 кВ, стекла ($h \approx$ 1,6 мм) ≈ 5 кВ, 20 слоях фторопластовой пленки ($h \approx$ 40 мкм) ≈ 6 кВ; кабеля с фторопластовой пленкой ($h \approx$ 200 мкм при толщине намотки вокруг токоведущей жилы ≈ 2,5 мм) ≈ 12 кВ.

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость значений напряжения между электродами E1 и E2, при которых наступают начальные электрические разряды, от толщины диэлектрика $U_{beg\ ED} = f(h_D)$ [23]. Измерения проведены на пластинах стеклотекстолита. Сначала на осциллограммах тока заряда I_z определялся момент времени, когда появлялись ВЧ-колебания (см. на рис. 2, *б* $t_{beg\ HF} \approx$ 0,25 мкс). Затем по импульсу $U_{E1\text{-}E2}$ (см. рис. 2, а) находили напряжение $U_{beg\ HF}$, соответствующее моменту времени $t_{beg\ HF}$. Измерения проводили при разных амплитудных значениях напряжения на обкладках конденсатора при dU/dt = (2 ≈ 10) кВ/мкс. На рис. 3 приведены среднеарифметические значения $U_{beg\ ED}$, полученные для каждой пластины диэлектрика в результате нескольких измерений. Анализ результатов показал, что при одинаковых конструкциях конденсатора с увеличением толщины пластины изолятора ЧР наступают при меньших плотностях связанных зарядов на поверхности диэлектрика.

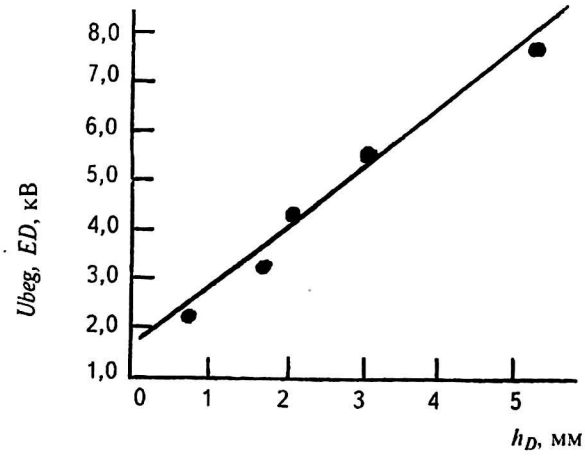

Рис. 3. Экспериментальная зависимость значений напряжения на обкладках конденсатора $U_{E1\text{-}E2}$, при которых наступают ЧР, от толщины пластины стеклотекстолита $U_{beg\ ED} = f(h_D)$ (диаметр электродов D_{E1} = 30 мм и D_{E2} = 33 мм)

Осциллограммы I_z и U_a заряда емкости кабеля с фторопластовой пленкой до напряжения $U_a \approx$ 12 кВ (приведены на рис. 4, *а*) и $U_a \approx$ 24 кВ

см рис. 4, *б*. Вследствие деления потенциалов на барьерах (см. рис. 1, *б*) амплитудное значение токов ЧР в диапазоне $U_a \geq$ (12—24) кВ было в несколько раз меньше аналогичных показаний, измеренных для конденсаторов с другими изоляционными материалами (см. рис. 2). Во всех случаях по окончании процесса заряда конденсатора ($t_i = t_z$) прекращался ток заряда ($I_z = 0$) и заканчивались ВЧ-колебания ЧР. Длительность импульса U_a определялась режимом работы ГИН и была всегда больше t_z.

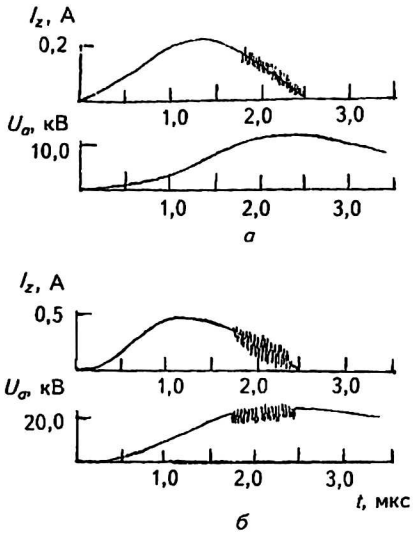

Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока I_z и напряжения U_a заряда емкости кабеля с многослойной фторопластовой пленкой в качестве изоляции (толщина пленки h ≈ 200 мкм; толщина намотки пленки вокруг токоведущей жилы ≈ 2,5 мм; длина кабеля ≈ 26 см) до напряжения:
а — $U_a \approx$ 12 кВ; *б* — $U_a \approx$ 24 кВ

После того как на осциллограммах I_z начинали регистрироваться ЧР, при работе установки с частотой f = 50 Гц вблизи исследуемого конденсатора появлялся запах озона, что свидетельствует об электрических разрядах на барьерах в воздушном зазоре между материалом изолятора и обкладками емкости [20]. Длительное воздействие разрядов даже на начальной стадии их появления оказывает отрицательное влияние на элементы конструкции конденсатора. Так, после работы установки в режиме U_a = 4 кВ, t_{fr} = 1 мкс, f = 50 Гц в течение 110 ч с использованием в качестве изоляции стеклотекстолита (толщиной 0,65 мм) отмечена деградация материала пропитки. На поверхности изоляции равномерно проявились следы электродов по всей площади, по краям электродов в радиальном направлении наблюдались прожоги изоляционного материала, сами электроды покрывались слоем окислов меди.

При дальнейшем увеличении U_a возрастало амплитудное значение I_z и импульсов тока ВЧ-колебаний ЧР, начало которых смещалось по осциллограмме тока к моменту времени, когда U_a достигало значения $U_{a\ beg}$. ВЧ-колебания в течение $t_z \leq$ 0,4 мкс с момента их появления имели гармонический характер, частота которых ($f_{HF} \approx$ 20—30 мГц) определялась материалом испытуемого изолятора и элементами схемы. Далее ($t_z \geq$ 0,4 мкс) до момента окончания I_z ВЧ-колебания тока не имели определенной системы (t_{fr} и $t_{sp} \approx$10—25 нс).

При значениях $U_a \geq$ 10 кВ вблизи периферии металлических электродов невооруженным глазом хорошо регистрировались коронные и скользящие разряды по поверхности изоляционного материала ватного тампона [4]. После его помещения в область электрических разрядов он загорался через 2—3 с. В отдельных опытах наблюдались сквозные локальные прожоги изоляции на первой минуте работы установки. Например, это имело место при исследовании пластины фторопласта толщиной 250 мкм. При $U_a \geq$ 13 кВ необратимый электрический пробой наступал после 20—30 с работы. Опыт повторялся несколько раз. Все точки прожога наблюдались под обкладками конденсатора (более 2 мм от края к центру электрода).

На рис. 5 приведены экспериментальная ($W_E = \int_0^{t_z} i \cdot u \cdot dt$) и расчетная ($W_{cal} = CU^2 / 2$) зависимости величины энергии, затраченной на заряд испытуемого конденсатора с пластиной стекла в качестве диэлектрика (h = 1,6 мм, D электродов равен 17 мм) в широком диапазоне U_a в импульсном режиме работы $W = f(U_a)$. Для данной конструкции конденсатора ЧР наступают при $U_{a\ beg} \geq$ 5 кВ. Небольшое превышение экспериментального значения W_E над расчетным W_{cal} начинает наблюдаться после $U_a \approx$ 10 кВ, достигая при 22 кВ 5—6-кратного превышения. Необходимо отметить, что во всем диапазоне амплитудного значения импульсов напряжения, начиная с $U_{a\ beg}$, с нарастающей интенсивностью идет процесс разрушения изоляционного материала.

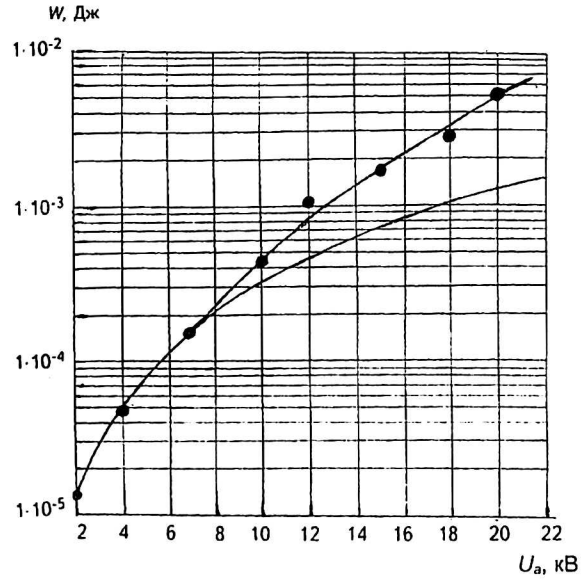

Рис. 5. Экспериментальная и расчетная зависимости энергии заряда конденсатора с пластиной стекла в качестве изолятора в широком диапазоне напряжений $W = f(U_a)$ в импульсном режиме работы:
—— — расчет; • — данные эксперимента

Был проведен эксперимент и выполнен расчет зависимости $W = f(U_a)$ для кабеля с фторопластовой изоляцией. Значения эксперимента и расчетные данные совпали. Однако без предварительного анализа нельзя гарантировать надежную работу кабеля в диапазоне напряжений U_a = 12—24 кВ при наличии ЧР.

При электрических разрядах между электродами и диэлектриком конденсатора образуются положительные и отрицательные ионы. На этом участке электрической цепи начинает иметь место ток переноса. Заряды ионов частично нейтрализуют накопленные свободные заряды на обкладках конденсатора, увеличивают ток смещения и время заряда емкости. Коронные и скользящие разряды по поверхности изолятора с ростом U_a увеличивают эффективную площадь конденсатора, в результате чего также возрастает ток смещения. Так можно объяснить отклонение экспериментальной энергетической характеристики заряда конденсатора при высоких U_a от расчетной зависимости.

Проведены исследования ЧР с разными изоляционными материалами при приложении к обкладкам конденсатора (диаметр пластин медной фольги составлял 28 мм) одинаковых по форме и амплитудному значению импульсов напряжения $U_a \approx 22$ кВ. Измерены амплитудное значение тока ЧР — I_{ampl}, длительность тока по основанию импульса — t_i (время заряда испытуемого конденсатора $t_i = t_z$), максимальное значение тока при высоких dU/dt — I_{max} и результаты экспериментальной оценки частоты колебаний в случае воздействия больших dU/dt — f. Результаты измерений приведены в таблице.

При исследованиях ЧР при высоких dU/dt был использован принцип формирования импульсов напряжения путем устойчивого искрового разряда. В данном случае — это разряд по воздуху или поверхности изоляционного материала между острийным электродом и обкладкой конденсатора [21]. После пробоя промежутка электрод ГИН — обкладка конденсатора потенциал $U_a \approx 22$ кВ прикладывается к испытуемому конденсатору с фронтом $t_{fc} \approx 15$ нс ($dU/dt \approx 1{,}3 \cdot 10^6$ В/мкс). На осциллограммах импульсов тока и напряжения регистрировался затухающий колебательный процесс, который через ≈ 0,4 мкс переходил в режим заряда и ЧР. Максимальное амплитудное значение импульса тока составляло $I_{max} \approx 9{,}2$ А (изолятор — тонкое стекло) и ограничивалось внутренним сопротивлением ГИН (расчетное значение $I_{max} = C \cdot dU/dt \approx 40$ А). Необходимо отметить, что способ создания генератора мощных высоковольтных импульсов радиодиапазона путем воздействия на электрическую емкость импульсами напряжения с высокими значениями dU/dt представляет интерес для техники радиолокации и средств беспроводной передачи электрической энергии на большие расстояния.

Экспериментальные значения зависели от величины емкости модели конденсатора (толщины пластины, величины коэффициента ε) и влияния факторов ЧР на заряд конденсатора при высоких значениях U_a. Во всех случаях вблизи электродов конденсатора наблюдались искры ЧР. Минимальная интенсивность искрения отмечена для конденсатора с диэлектриком из фторопласта, емкость которого практически в 10 раз меньше емкости с тонким стеклом.

Двойной размах амплитудного значения ВЧ-колебаний ЧР при $U_a \approx 22$ кВ достигал ≈ 50 % среднего значения тока заряда конденсатора I_{ampl}.

Рассмотрим процесс заряда конденсатора в импульсном режиме (см. рис. 2; материал — стеклотекстолит; h = 0,6 мм). В момент времени t_i = 0,25 мкс ($U_{E1\text{-}E2}$ = 2,2 кВ; $U_{E1\text{-}Z1} \approx 250$ В) на осциллограммах тока I_z (см. рис. 2, б) начинают регистрироваться затухающие гармонические колебания с $f \approx 20$ МГц, которые через 0,4 мкс переходят в ВЧ-колебания ЧР ($t_{fr} \approx t_{sp} \approx$ 10—25 нс). ЧР наступают под обкладками конденсатора на барьерах контактных соединений М—Д при достижении напряжения на конденсаторе $U_{E1\text{-}E2} = U_{beg\ HF}$. Толщина барьера (см. рис. 1, h_1), рассчитанная из условий формирования электрических разрядов в газе по экспериментальным значениям потенциалов $U_{E1\text{-}Z1}$, составляет единицы мкм. С момента начала заряда конденсатора до t_i = 1 мкс значения разности потенциалов $U_{E1\text{-}Z1}$ и $U_{E1\text{-}Z2}$ (см. рис. 2, *в* и 4) практически совпадали. При $t_i \geq 1$ мкс ВЧ-колебания I_z и $U_{E1\text{-}Z1}$ (см. рис. 2, б и 3) существенно увеличились и были в пределах ≈ (0,4—0,85) А и ≈ (200—900) В, соответственно.

Материал диэлектрика	Толщина пластины изолятора, мм	I_{ampl}, А	t_i, мкс	I_{max}, А	f, МГц
Стеклотекстолит	0,6	1,25	4,5	9,2	~20
Стекло тонкое	1,3	0,84	2,5	9,2	~22
Стекло оконное	4,0	0,54	1,75	9,2	~22
Винипласт	2,5	0,29	1,2	7,0	~25
Плексиглас	3,0	0,25	1,1	6,5	~25
Фторопласт	5,0	0,11	~0,7	3,65	~30

При каждом электрическом разряде регистрируется рост емкостной составляющей тока $I_c = C \cdot dU/dt \approx 0{,}5$ А (см. рис. 2: $C \approx 7 \cdot 10^{-12}$ Ф, $dU \approx 700$ В и $dt \approx 10 \cdot 10^{-9}$ с). Протекание тока I_c вместе с током смещения обеспечивает формирование электрического поля $U_{E\text{-}D} \approx 900$ В путем увеличения плотности связанных зарядов на поверхности диэлектрика. Далее следует очередной электрический разряд, который прерывается при $U_{E\text{-}D} \leq 200$ В. Импульсы ЧР повторяются до момента окончания процесса заряда конденсатора.

Электрические разряды в воздухе на барьере М—Д (см. рис. 1, h_1) можно отнести к импульсным тлеющим разрядам на восходящем участке напряжения ($U_{E1\text{-}Z1}$, см. рис. 2, в, $t_i \leq 1$ мкс) и к импульсным тлеющим разрядам на участке с отрицательным сопротивлением ($t_i \geq 1$ мкс) [5, 6]. При $t_i \geq 1$ мкс на поверхности диэлектрика появляется электрическое поле, направленное радиально от периферии электрода конденсатора ($E_{per} \approx 2 \div 4$ кВ/см). Это приводит к искровым коронным и скользящим разрядам по поверхности изоляционного материала. Разряды при низких значениях E_{per} можно объяснить высокой плотностью связанных зарядов на поверхности диэлектрика, которые способствуют увеличению разрядных промежутков. Также может работать механизм отклонения электрическим полем на поверхность диэлектрика электронов и ионов — продуктов ЧР на барьере М—Д периферийных участков электродов.

Заключение

Приведены результаты экспериментальных исследований в области теоретических основ электротехники — исследован процесс заряда электрического конденсатора высоковольтными импульсами напряжения $U_a = (1—24)$ кВ с высокой скоростью нарастания $dU/dt = (1—1300)$ кВ/мкс. Экспериментально обнаружены высокочастотные электрические разряды (ЧР) в промежутках электрод — диэлектрик, диэлектрик — диэлектрик. Ионизационные процессы частичных разрядов при высоких напряженностях электрических полей приводят к разрушению атомных и молекулярных связей изоляционного материала, его ускоренному старению и могут явиться причиной необратимого электрического пробоя. Для исключения частичных разрядов, перевода их в область более высоких напряжений, уменьшения их влияния на основании проведенных исследований можно рекомендовать для дальнейшего анализа следующие технические предложения:

- использование в электрических аппаратах и устройствах изоляционных материалов с малыми значениями коэффициентов диэлектрической проницаемости для уменьшения значений емкостных токов по амплитуде и длительности; использование диэлектриков и полупроводников с градиентными характеристиками [26]; предпочтительное применение многослойной изоляции, когда одни слои обеспечивают высокую и однородную по толщине электрическую прочность, другие — электрическую прочность и способность выдерживать механические нагрузки; пропитка воздушных промежутков электрических обмоток устройств специальными компаундами;
- уменьшение амплитудных значений всплесков импульсов перенапряжений в режимах коммутации ($U = L\, dI/dt$) путем применения демпфирующих RC-цепей, реакторов, дросселей [27], оксидно-цинковых ограничителей напряжения [28] и полупроводниковых кремниевых лавинных ограничителей напряжения [29] с высоким быстродействием ($\leq 0{,}5$ мкс).

Литература

1. *Ренне В. Т.* Электрические конденсаторы. — М.: Энергия, 1969. — 592 с.
2. *Бальян Р. Х.* Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1971. — 720 с.
3. *Кучинский Г. С.* Высоковольтные импульсные конденсаторы. — Л.: Энергия, 1973. — 176 с.
4. *Кучинский Г. С., Назаров Н. И., Назарова Г. Т.* и др. Силовые электрические конденсаторы — М.: Энергия, 1975. — 248 с.
5. *Королев Ю. Д., Месяц Г. А.* Физика импульсного пробоя газов —. М.: Наука, 1991. —224 с.
6. *Еркин А. М.* Лампы с холодным катодом. — М.: Энергия, 1967. — 80 с.
7. *Кучинский Г. С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия, 1976. — 224 с.
8. *Сканави Г. И.* Физика диэлектриков (область сильных полей). — М.: ГИФМЛ, 1958. — 908 с.
9. *Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А.* и др. Теория диэлектриков. — М.: Энергия, 1965. — 344 с.
10. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.* Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.
11. *Волокобинский Ю. М.* Влияние воздушных включений на электрическую прочность и потери изоляционных материалов// ЖТФ. 1956. Т. XXVI. Вып. 3. С. 568—575.
12. *Переселенцев И. Ф.* Частичные разряды в диэлектрике силовых бумажных конденсаторов. — Силовое конденсаторостроение. — М.: Информстандартэлектро, 1968. Вып. 1. С. 52—72.
13. ГОСТ 20074—83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов С. 22.
14. *Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С.* Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов/ Под общ. ред. Г.С. Кучинского. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 368 с.
15. *Смекалов В. В., Смекалов С. В.* Современные методы регистрации частичных разрядов (ЧР) в трансформаторном оборудовании в условиях эксплуатации. Электротехника 2010: VI симпозиум// Сб. докл. т. 1, 4.11. — М.: ВЭИ-ТРАВЭК, 2001. С. 365—370.
16. *Койков С. Н., Цикин Л. Н.* Электрическое старение твердых диэлектриков. — М.: Энергия, 1968. — 186 с.
17. *Кучинский Г. С., Хван Е. Е.* Регистрация характеристик частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения. Электрическая изоляция — 2002: Тр. конф. — СПб.: Нестор, 2002. С. 350—351.

18. Элементарный учебник физики/ Под ред. Г. С. Ландсберга. Т 2. Изд. второе. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 448 с.

19. *Мансуров Н. Н., Попов В. С.* Теоретическая электротехника. — М: Энергия, 1968. Изд. 10. — 576 с.

20. *Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В.* Физическая химия барьерных разрядов. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — 176 с.

21. *Бурцев Э. Ф.* Емкостные токи в приборах, аппаратах и устройствах силовой электроники// Прикладная физика. 2001. № 5. С. 69—73.

22. *Бурцев Э. Ф., Рудицкий Р. Ш.* Вольт-зарядовая характеристика электрической емкости при высоких напряжениях в импульсном режиме работы. Электрическая изоляция — 2002: Тр. конф.. — СПб.: Нестор, 2002. С. 209—212.

23. *Бурцев Э. Ф.* Экспериментальные исследования физических процессов частичных электрических разрядов (ЧР) в силовой электротехнике. Электротехника 2010: VII симпозиум// Сб. докл. Т. 3, 4.08. — М.: ВЭИ-ТРАВЭК, 2003. С. 88—92.

24. *Агаларзаде П. С., Петрин А. И., Изидинов С. О.* Основы конструирования и технологии обработки поверхности *p—n*-перехода/ Под ред. В. Е. Челнокова. — М.: Сов. радио, 1978. — 224 с.

25. *Нейман Л. Р., Демирчян К. С.* Теоретические основы электротехники. В двух томах. — М. — Л.: Энергия, 1966. Т. 1. — 522 с; Т. 2. — 407 с.

26. *Волокобинский М. Ю., Волокобинский Ю. М., Сотенко А. С.* Теория и метод расчета электрического поля в градиентном диэлектрике. — СПб.: Нестор, 2002. С. 103—106.

27. *Глух Е. М., Зеленов В. Е.* Защита полупроводниковых преобразователей. — 2-е изд., перераб. и дополн. — М.: Энергоиздат, 1982. — 152 с.

28. *Алмазов В. А., Зеленов В. Е., Мирошниченко В. П., Перунов А. А., Филиппов В. Г.* Защита электрооборудования от перенапряжений// Прикладная физика. 2001. № 5. С. 54—57.

29. *Гейфман Е. М., Елисеев В. В., Максутова С. А., Мустафа Г. М., Скороходов Ю. Ю., Чибиркин В. В.* Мощные импульсные ограничители напряжения. — Электротехника 2010:. VI симпозиум// Сб. докл. Т. 3, 5.07. — М.: ВЭИ-ТРАВЭК, 2001. С. 28—30.

High frequency pulse electric discharges at the insulation barriers in power electrical equipments

V. A. Almasov, E. F. Burtsev, V. P. Vasiliev, N. V. Krupenin
SUE "All-Russian Electrotechnical Institute", Moscow, Russia

It is shown experimentally the partial discharges in the electronics equipments occur at pulse operation conditions and high voltage rise (fall), (dU/dt) when the electric fields are rejected to the barriers of the insulation having minimum values of the dielectric permeability ε. The duration of partial discharges is defined by the recharging processes in the self-capacitances of equipments. The partial discharges lead to an accelerated degradation of insulation materials and may cause failures of the equipment due to electrical breakdown. The paper gives some recommendations which allow the partial discharges to be excluded or their occurrence to be shifted to higher voltage levels and their effect on the operation of power electrical equipments to be reduced.