

УДК 621.383

Емкостные токи в приборах, аппаратах и устройствах силовой электроники

Э. Ф. Бурцев

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

Экспериментально показано, что емкостные токи в электрических аппаратах и устройствах при высоких значениях скорости нарастания (спада) напряжения (dU/dt) способствуют появлению барьерных разрядов. Последние приводят к ускоренному старению изоляционных материалов и могут явиться причиной выхода аппаратов из строя вследствие электрического пробоя. Проведен анализ работы электрических конденсаторов в импульсных режимах.

С ростом напряжения в электрических аппаратах и устройствах переменного тока имеют место высокие скорости нарастания (спада) напряжения (dU/dt). В рабочих режимах при частоте 50 Гц значения dU/dt могут достигать нескольких тысяч вольт в микросекунду при продолжительности около 2 мс на этапах нарастания и спада напряжения, соответственно. Высокие значения dU/dt наблюдаются во время коммутационных процессов в электрических системах, а также в преобразовательных устройствах с повышенными рабочими частотами [1].

В эквивалентных схемах замещения электротехнических устройств имеются электрические конденсаторы. Так, например, в силовых трансформаторах есть продольные и поперечные емкости [2], в высоковольтных воздушных линиях электропередачи переменного тока — зарядные емкости [3] и т. д. Последние могут быть сосредоточенные, распределенные, конструктивные и др. Они имеют значения от единиц до нескольких сотен нанофард.

Во всех случаях при воздействии dU/dt между электродами в аппаратах, устройствах и приборах сильноточной электроники протекает емкостная составляющая тока $I_c = CdU/dt$. Например, в силовой полупроводниковой технике при приложении к тиристорам высоких значений dU/dt вследствие протекания емкостного тока происходит инжекция электронно-дырочной плазмы в область обратносмещенного $p-n$ -перехода [4]. Это может привести к самопроизвольному локальному переключению структуры тиристора вне зоны электрода управления. В случае протекания больших значений анодного тока (сотни — тысячи ампер) возможен необратимый пробой прибора.

Быстро нарастающие импульсы напряжения (более 10^{12} В/с) используются для пикосекундной коммутации больших мощностей с помощью кремниевого диода [5]. При быстром подъеме напряжения через обратносмещенный *p-n*-переход в течение 3 нс до момента переключения диода протекает большой ток смещения (~ 5 А).

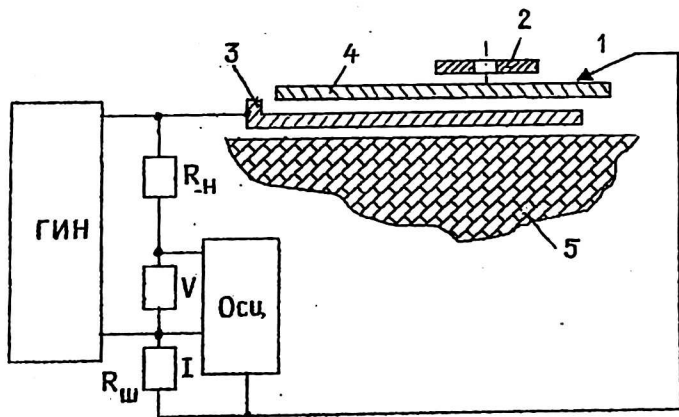
Работа электрических конденсаторов при переменном напряжении и в импульсных режимах рассмотрена в работах [1, 6, 7 и др.].

Задача настоящей работы заключается в исследовании процессов, которые имеют место в электрических аппаратах и устройствах при высоких скоростях нарастания напряжения.

В этих условиях емкостные токи являются особым способом инжекции носителей заряда в межэлектродное пространство и могут влиять на процессы локальных разрядов при высоких напряженностях электрических полей.

Проведены исследования процесса заряда электрического конденсатора импульсами напряжения большой амплитуды с высокими значениями dU/dt и малой длительности — барьерные разряды [8]. Определены искровые промежутки между электродами на воздухе и по поверхности изоляционного материала.

Разработана методика исследований и изготовлена экспериментальная установка (рисунок). В качестве физической модели конденсатора открытой конструкции использован конденсатор с фиксированными геометрическими размерами электродов и возможностью замены пластин изоляционного материала, при этом емкость изменялась от единиц до нескольких десятков нанофард.



Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 — подвижный электрический зонд (три луженых медных проволочки $\varnothing 0,15$ мм);
 2 — верхний электрод конденсатора (медный диск $\varnothing 28$ мм с отверстием по центру $\varnothing 8$ мм, $h = 1,5$ мм); 3 — нижний электрод конденсатора (пластина из меди размерами $120 \times 20 \times 0,3$ мм);
 4 — материал изолятора; 5 — подставка из изоляционного материала с малым значением коэффициента диэлектрической проницаемости; ГИН — генератор импульсов напряжения;
 R_n — высоковольтный делитель напряжения с емкостной коррекцией;
 $R_{ш}$ — быстродействующий шунт тока; Осц — измерительный осциллограф

Высоковольтный генератор импульсов напряжения (ГИН) был изготовлен по принципу разряда электрического конденсатора в колебательном RLC-контуре с резонансной частотой 40—400 кГц. Частота работы ГИН — 50 Гц, выходное напряжение — 22 кВ, форма импульса — трапецеидальная, передний фронт импульса напряжения от начала его приложения до $U_{\text{макс}} - t_{\text{фр}} \approx 0,75$ мкс ($dU/dt \approx 30$ кВ/мкс), длительность импульса по вершине $\approx 4,5$ мкс.

Исследования барьерного разряда проведены при подключении ГИН к электродам 1 и 3 (электрод 2 не использовался). Три проволочки электрода 1 размещались на поверхности тонкого стекла ($h = 1,3$ мм) перпендикулярно длине нижней металлической пластины 3. Расстояние между проволочными электродами составляло около 10 мм. При приложении импульсов напряжения ко всем электродам электрической цепи проходил ток $I_{ампл} = 0,64$ А. По форме импульс тока соответствовал импульсу напряжения, т. е. имел трапецидальную форму. Длительность тока определялась временем заряда конденсатора и составляла $t_{и} \approx 1,8$ мкс. С момента, когда напряжение на электродах достигало ~ 5 кВ, на импульсах тока и напряжения регистрировались высокочастотные колебания. Максимальное значение тока высокочастотных колебаний составило $\approx 0,32$ А, т. е. колебания тока были в пределах 0,48—0,8 А. Анализ колебаний тока не выявил определенных закономерностей. Время нарастания и спада отдельных частотных составляющих импульсов было в пределах 10—25 нс.

В процессе испытаний по обе стороны проволочных электродов при комнатном освещении невооруженным глазом хорошо видны электрические разряды по поверхности стекла. Максимальная длина разрядов — 35 мм. Удаленные участки имели высокую степень разветвления (стример). По мере приближения к проволочным электродам токи разряда стягивались в единый токопроводящий шнур (лидер). Это искровой, коронный и скользящий разряды по поверхности [9], которые в данном случае являются составляющими барьерного разряда [8]. Таким образом, происходит сбор носителей заряда с поверхности стекла и обеспечивается протекание тока барьерного разряда между двумя металлическими электродами. Процессы ионизации сопровождаются джоулевым нагревом, механическими разрушениями, резкими звуковыми сигналами, образованием озона и окислов азота [1, 7—9]. Все это способствует ускоренному старению изоляционного материала.

Исследования энергетических затрат при импульсном режиме заряда электрического конденсатора проведены на модели конденсатора C_{2-3} при замкнутых электродах 1 и 2. В качестве изоляционного материала использовалось тонкое стекло ($h = 1,3$ мм). Расчетное значение $C_{2-3} \approx 30$ пФ. Для заряда C_{2-3} до напряжения 22 кВ необходимо затратить энергию $W = CU^2/2 = 6 \cdot 10^{-3}$ Дж. В режиме импульсного заряда $W = IU_t \approx 30,5 \cdot 10^{-3}$ Дж. Таким образом, около 80 % энергии при импульсном заряде конденсатора затрачивается на ионизационные процессы. Если в газовых лазерах при разряде основная энергия затрачивается на ионизацию молекул газа и накапливается в межэлектродном промежутке, то в электрическом конденсаторе большая доля энергии идет на потери, в том числе и на разрушение материала диэлектрика. Так, например, при испытаниях с тонким стеклом наблюдались случаи “прилипания” токов барьерного разряда к участкам с дефектами. Последнее приводило к локальному проплавлению и растрескиванию пластины стекла.

Для исследований барьерного разряда при высоких dU/dt использован принцип формирования импульсов напряжения путем устойчивого искрового разряда. В данном случае — это разряд по воздуху или поверхности изоляционного материала между электродами 1 и 2. При подаче импульса напряже-

ния от ГИН к электродам 1-3 первоначально практически все напряжение прикладывается к электродам 1-2, поскольку емкость C_{1-2} существенно меньше емкости C_{2-3} . После пробоя промежутка 1-2 потенциал прикладывается к электродам 2-3 с фронтом $t_{\text{фр}} \approx 15$ нс ($dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^6$ В/мкс). На осциллограммах импульсов тока и напряжения регистрировался затухающий колебательный процесс, который через 0,5 мкс переходил в режим барьерного разряда. Максимальное амплитудное значение импульса тока составляло $I_{\text{макс}} \approx 9,2$ А (изолятор — тонкое стекло) и ограничивалось внутренним сопротивлением ГИН (расчетное значение $I_{\text{макс}} \approx 40$ А). Частота колебаний по результатам экспериментальной оценки для разных изоляционных материалов находилась в пределах 20—30 МГц. Она определяется рядом факторов, в том числе концентрацией носителей заряда и их температурой.

Проведены исследования барьерного разряда с разными изоляционными материалами при приложении к электродам 2-3 (или 1-3) одинаковых по форме и амплитудному значению импульсов напряжения. В экспериментах использовались пластины из стеклотекстолита ($h = 0,6$ мм), оконного стекла ($h = 4,0$ мм), винипласта ($h = 2,5$ мм), оргстекла ($h = 3,0$ мм) и фторопласта ($h = 5,0$ мм). Измерены следующие параметры: амплитудное значение тока барьерного разряда $I_{\text{ампл}}$, длительность тока по основанию импульса (время заряда испытываемого конденсатора) $t_{\text{н}}$, максимальное значение тока при высоких dU/dt — $I_{\text{макс}}$ и результаты экспериментальной оценки частоты колебаний в случае воздействия больших dU/dt — f .

Экспериментальные значения зависели от величины емкости модели конденсатора, т. е. от толщины пластины и величины коэффициента диэлектрической проницаемости материала. Во всех случаях вблизи электродов конденсатора наблюдались искры барьерного разряда. Минимальная интенсивность искрения отмечена для конденсатора с диэлектриком из фторопласта, емкость которого практически в десять раз меньше емкости с тонким стеклом. Для конденсатора с фторопластом $I_{\text{ампл}} = 0,11$ А; $t_{\text{н}} \approx 0,7$ мкс; $I_{\text{макс}} = 3,65$ А; $f \approx 30$ МГц.

Искровой промежуток при устойчивом разряде на воздухе между двумя заостренными электродами, измеренный экспериментально в режиме работы ГИН ($U_{\text{макс}} \approx 22$ кВ; $t_{\text{фр}} \approx 0,75$ мкс; $f \approx 50$ Гц), составлял ≈ 11 мм. В случае разряда на поверхности стекла и фторопласта искровой промежуток был одинаковым и составлял ≈ 20 мм.

Рассмотренная в работе методика испытаний характеризуется простотой, оперативностью в переналадке и хорошей наглядностью. Демонстрационные свойства устройства существенно улучшались при использовании металлического шара ($\varnothing 32$ мм), установленного в отверстие медного диска электрода 2.

Заключение

Экспериментально на физических моделях электрического конденсатора открытой конструкции рассмотрены процессы протекания емкостного тока при высоких значениях dU/dt и импульсных режимах заряда. Ионизационные процессы в межэлектродном промежутке при высоких напряженностях

электрических полей приводят к разрушению атомных и молекулярных связей и изоляционного материала, его ускоренному старению и могут явиться причиной необратимого электрического пробоя. Настоящая информация может быть полезна разработчикам электрических аппаратов и устройств в выборе требований к материалу изоляции, анализе возможных конструкторских решений, определении допустимых режимов эксплуатации устройств по току и напряжению.

Л и т е р а т у р а

1. Ермуратский В. В., Ермуратский П. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.
2. Лоханин А. К. Снижение уровней изоляции силовых трансформаторов высших классов напряжения// Электротехника. 1991. № 12. С. 6—8.
3. Смирнов А. Д., Антипов К. М.: Справочная книжка энергетика, 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 440 с.
4. Кузьмин В. А. Теория эффекта dU/dt в тиристорах. — В кн.: Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. — Л.: Наука, 1969. С. 106—112.
5. Грехов И. В. Полупроводниковые приборы сильноточной электроники/Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика. 1992. № 1. С. 60—73.
6. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. — Л.: Энергия, 1973. — 176 с.
7. Конденсаторы: Справочник/ И. И. Четвертков, М. Н. Дьяконов, В. И. Присяжков, В. А. Черных, В. Ф. Смирнов, Б. П. Беленький/ Под ред. И. И. Четверткова, М. Н. Дьяконова. — М.: Радио и связь, 1993. — 392 с.
8. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — 176 с.
9. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество. Издание 3-е. — М.: Наука. Главная редакция физ.-математ. лит. — М., 1968. — 336 с.

Capacitance currents in power electronics devices and apparatus

E. F. Burtsev

The Lenin's All-Russian Electrical Engineering Institute, Moscow, Russia

Using physical simulation it is shown experimentally that capacitance currents in electrical apparatus under high rate of voltage increase (decrease) (dU/dt) facilitate the arising of barrier discharges. The latter result in accelerated aging of isolation and may be a cause of apparatus failure because of electrical breakdown. The functioning of electrical capacitors under pulse conditions was investigated.