

04

Модулированный коронный наносекундный разряд в воздухе атмосферного давления

© Н.М. Лепёхин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов,
М.У. Булатов, Д.И. Сухаревский, В.С. Сысоев

Высоковольтный научно-исследовательский центр — филиал
Всероссийского электротехнического института им. В.И. Ленина,
Московская область, Истра
E-mail: info@schema5.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2014 г.

Получен особый тип коронного разряда — модулированный коронный наносекундный разряд, для которого в геометрической системе электродов с резко неоднородным электрическим полем в воздухе атмосферного давления и естественной влажности определены параметры разряда.

В работе [1] исследован коронный разряд в воздухе атмосферного давления, когда переход от положительной короны к искровому пробую осуществляется через стадию, при которой зона ионизации распространяется до катода, и возникает так называемый „факельный“ разряд. Максимально достижимый ток факельного разряда лежит в пределах от 0.5 до 1.5 мА. В [2] при различных конфигурациях разрядного промежутка (проводник над плоскостью, проводник в цилиндре, два и более параллельных проводника) реализован линейный коронный факельный разряд (ЛКФР), для формирования которого необходимо выполнить следующие условия: катод отделить от отрицательного полюса высоковольтного источника питания искровым иницирующим разрядником (ИР) и ввести в разрядную цепь со стороны анода дроссель с большой индуктивностью. Частота срабатывания искрового ИР, т.е. частота модуляции напряжения на катоде разрядного промежутка, регулируется от 10 Hz до 14 kHz. В [3] в отличие от [2] при формировании ЛКФР вместо искрового ИР применен импульсный тиратрон, а в [4] — транзистор. Частота включения тиратрона или транзистора может регулироваться от 1 до 20 kHz. Таким образом,

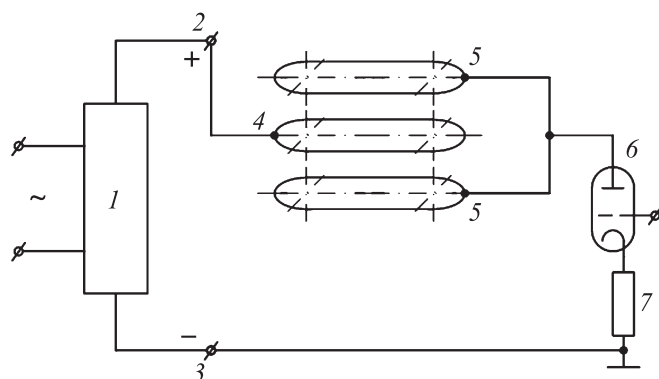


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — высоковольтный источник квазинепрерывного тока (источник питания); 2, 3 — положительный и отрицательный выводы источника питания; 4, 5 — анод и катод электродной системы; 6 — импульсный тиратрон; 7 — измерительный шунт.

частота модуляции напряжения на катоде разрядного промежутка в ходе исследований [2–4] не превышала 20 kHz. При этом разряд развивается в следующей последовательности [4]: „классическая“ корона положительной полярности — формирование объемного заряда с ВАХ, соответствующей характеристике ЛКФР — пробой разрядного промежутка с последующим формированием дугового разряда.

В представленной работе экспериментально установлено, что в резко неоднородном электрическом поле, образованном системой параллельных проводников в воздухе атмосферного давления и естественной влажности, при выполнении условий [2], необходимых для реализации ЛКФР, и последовательном росте частоты модуляции напряжения на катоде с помощью управляемого коммутатора до частот, превышающих указанные в [2–4], после формирования ЛКФР возникает особый тип коронного разряда — модулированный коронный наносекундный разряд (МКНР).

Целью данной работы является экспериментальная оценка параметров МКНР.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В исследуемой электродной системе анод и катод выполнены из нихромо-

вого провода диаметром 0.3 mm. При этом электродный промежуток образован анодом, расположенным между двумя равноудаленными катодами. Катоды объединены электрически. Анод и каждый из катодов выполнены в виде двух эквипотенциальных проводов. Расстояние между эквипотенциальными проводами ~ 50 mm. Вся электродная система крепилась на двух фарфоровых изоляторах, установленных вертикально, осевое расстояние между которыми ~ 300 mm, а коронирующая (рабочая) часть электродов составляла ~ 240 mm, что обусловлено ребристостью изоляторов. Катоды удалены от анода на ~ 40 mm. Область разрядного промежутка могла продуваться потоком воздуха, создаваемым вентилятором JAMICON с производительностью $340 \text{ m}^3/\text{h}$, расположенным на расстоянии 400 mm от электродной системы. Источником питания МКНР являлся высоковольтный высокочастотный резонансный инвертор с выходным множителем напряжения и звеном постоянного тока, в качестве которого, так же как и в [2], использовался дроссель с большой индуктивностью. Таким образом, схема экспериментальной установки по существу совпадает с [2]. Максимальная мощность источника питания равнялась 300 W (выходное напряжение 50 kV, ток 6 mA). В качестве коммутатора использовался импульсный тиратрон ТГИ-500/16, управляемый от подмодулятора, выполненного по стандартной электрической схеме. Подмодулятор импульсного тиратрона запускался от внешнего задающего генератора, в качестве которого использовался генератор импульсов Tektronix AFG 3252.

Показателем устойчивого горения МКНР была стационарная форма напряжения на аноде импульсного тиратрона, которая регистрировалась осциллографом Tektronix 3054B с помощью высоковольтного пробника Tektronix P6015A. Уровень напряжения на выходе высоковольтного источника питания, а также среднее значение разрядного тока во внешней цепи электродной системы измерялись с помощью встроенных в высоковольтный источник питания измерителей напряжения и тока соответственно, имеющих точность измерений $\sim 3\%$. Уровень напряжения на разрядном промежутке дополнительно контролировался киловольтметром С-100 (измерители напряжения и тока на рис. 1 не показаны). Импульсы разрядного тока регистрировались с помощью безындуктивного измерительного шунта, включенного последовательно с импульсным тиратроном. Фотографии внешнего вида исследуемой электродной системы при горении ЛКФР и МКНР представлены на рис. 2, *a, b*. Как следует из рис. 2, *a* структура горения ЛКФР, подробно

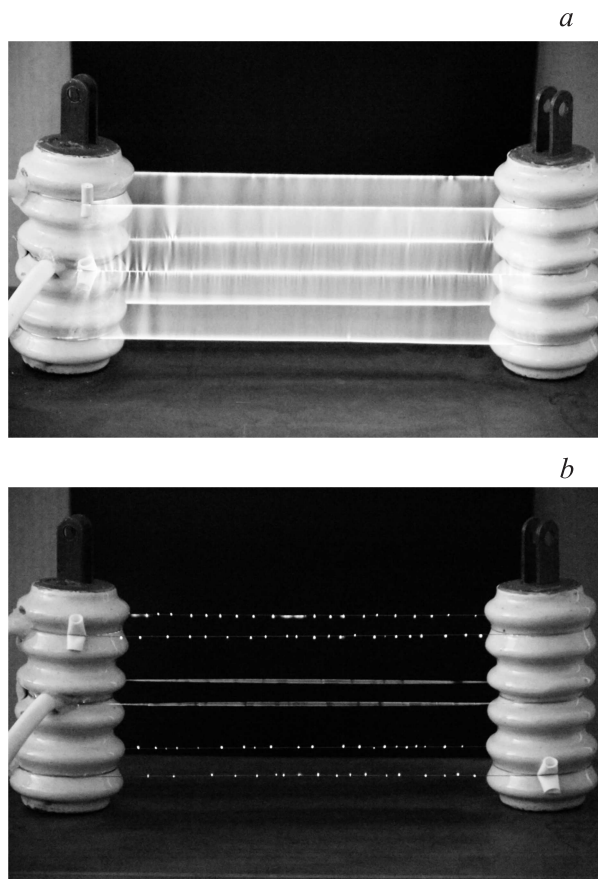


Рис. 2. Фотография внешнего вида исследуемой электродной системы: *a* — при горении линейного коронного факельного разряда (ЛКФР); *b* — при горении модулированного коронного наносекундного разряда (МКНР).

описанная в [2], и структура горения МКНР, как следует из рис. 2, *b* принципиально различны. Очевидно, различны и механизмы развития этих разрядов. Не рассматривая возможные механизмы развития МКНР, отметим следующее. Из рис. 2, *b* видно, что, с одной стороны, при горении МКНР в геометрической системе электродов с резко неоднородным

электрическим полем разряд локализован в относительно малом объеме вблизи анода со слабым свечением вокруг него, что характерно для „классической“ положительной короны. С другой стороны, на поверхности катода видны отдельные коронирующие точки, что характерно для „классической“ отрицательной короны. Таким образом, МКНР — это биполярный коронный разряд. Здесь следует также отметить, что, во-первых, шаг коронирующих точек близок к равномерному, что можно объяснить экранирующим действием формируемого объемного заряда во внешней области разрядного промежутка вблизи каждой из точек. При этом шаг коронирующих точек уменьшается с увеличением высоковольтного анодного напряжения. Во-вторых, свечение межэлектродного промежутка едва заметно, т.е. в целом МКНР однороден, о чем также свидетельствует звук разряда — практически беззвучный (при частотах выше 20 kHz). В-третьих, стабильность режима формирования и горения МКНР для испытанного диапазона анодных напряжений (до 50 kV) не зависит от наличия или отсутствия потока воздуха естественной влажности, создаваемого вентилятором.

Осциллограммы среза напряжения на катоде электродной системы (на аноде импульсного тиратрона) и импульсов тока МКНР, полученные при средней напряженности электрического поля (далее напряженности поля), определяемой отношением напряжения на положительном выводе источника питания к расстоянию между анодом и катодом, равной $\sim 8 \text{ kV/cm}$ и частоте модуляции напряжения на разрядном промежутке (частоте управляющих импульсов на сетке тиратрона) 50 и 100 kHz представлены на рис. 3, *a, b*. Как следует из осциллограмм, уровни и длительности среза напряжения на аноде тиратрона равны соответственно $\sim 1.0 \text{ kV}$ и $\sim 25 \text{ ns}$ (рис. 3, *a*), а также $\sim 0.6 \text{ kV}$ и $\sim 20 \text{ ns}$ (рис. 3, *b*). Разрядный ток в том и другом случае носит характер затухающих синусоидальных колебаний с частотой $\sim 45 \text{ MHz}$. Максимальные амплитуды разрядных токов соответственно равны $\sim 2.4 \text{ A}$, (рис. 3, *a*) и $\sim 1.1 \text{ A}$ (рис. 3, *b*), что обеспечивает в обоих случаях протекание средних разрядных токов $\sim 3.6 \text{ mA}$. При частоте модуляции 50 kHz и максимальной напряженности электрического поля $\sim 8.4 \text{ kV/cm}$ максимальное среднее значение разрядного тока равнялось $\sim 4.8 \text{ mA}$, а мощность, вкладываемая в разряд, составила $\sim 160 \text{ W}$. При частоте модуляции 100 kHz и максимальной напряженности поля $\sim 8.9 \text{ kV/cm}$ максимальное среднее значение разрядного тока равнялось 5.9 mA , а мощность, вкладываемая в разряд, составила $\sim 200 \text{ W}$. Таким образом в

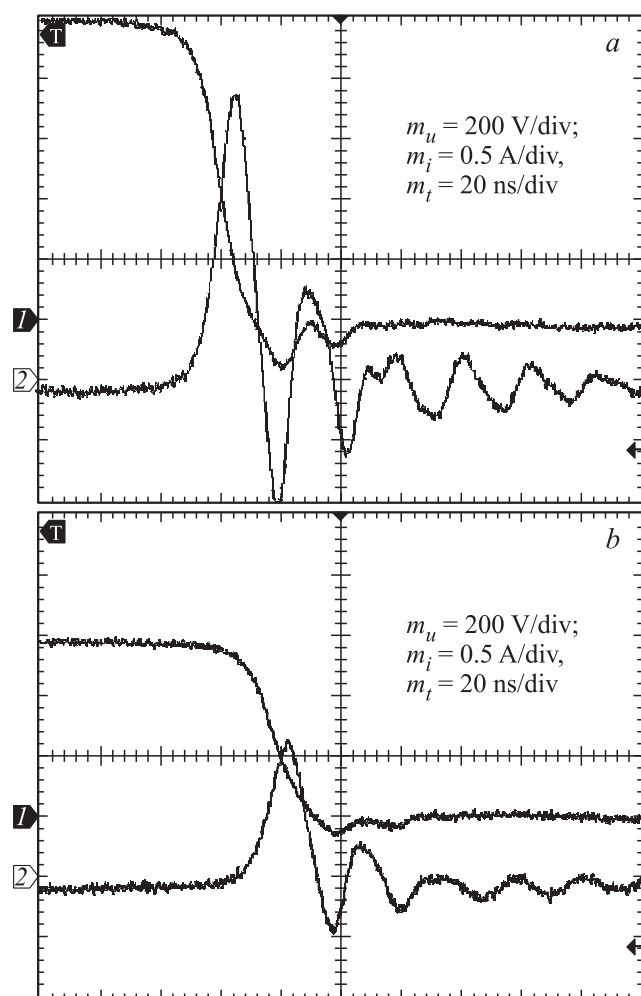


Рис. 3. Осциллограммы среза напряжения (луч 1) на катоде электродной системы (на аноде импульсного тиратрона) и импульса тока МКНР (луч 2) при различной частоте управляющих импульсов на сетке тиратрона (частоте модуляции напряжения на разрядном промежутке). Частота модуляции, kHz: *a* — 50, *b* — 100.

пересчете на единицу длины коронирующего электрода максимальные средние значения разрядного тока равнялись ~ 10 mA/m (при частоте 50 kHz) и ~ 12 mA/m (при частоте 100 kHz). Следует отметить, что при близких параметрах нагрузки и значениях напряженности поля, в „классической“ положительной короне максимальное среднее значение разрядного тока равняется ~ 0.6 mA/m, а мощность, вкладываемая в разряд, ~ 3 W [2], в ЛКФР для различных нагрузок, рассмотренных в [2–4], максимальные средние значения разрядного тока и мощности, вкладываемые в разряд, соответственно составляют: ~ 12.7 mA/m и 55 W [2], ~ 8.5 mA/m и 50 W [3], ~ 6.5 mA/m и 40 W [4].

В данной работе максимальная частота модуляции напряжения на катоде разрядного промежутка была ограничена параметрами подмодулятора импульсного тиратрона. Переход МКНР в искровой пробой, при напряженности поля ~ 8 kV/cm и кратковременном повышении частоты модуляции до 500 kHz, не наблюдался. При этом рост среднего разрядного тока ограничивался действием стабилизатора тока резонансного инвертора источника питания на уровне ~ 6 mA.

Итак, в геометрической системе электродов с резко неоднородным электрическим полем показана возможность формирования особого типа коронного разряда — модулированного коронного разряда наносекундного диапазона, в котором максимальный средний ток разрядного промежутка в пересчете на единицу длины коронирующего электрода составил ~ 12 mA/m, а мощность, вкладываемая в разряд, ~ 200 W. При повышении частоты модуляции до 500 kHz переход МКНР в искровой пробой не наблюдался.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства РФ (договор 14.B25.31.0023).

Список литературы

- [1] Богданова Н.Б., Певчев Б.Г. // Электричество. 1978. № 12. С. 5–9.
- [2] Ашмарин Г.В., Лелевкин В. М., Токарев А.В. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 10. С. 939–944.
- [3] Токарев А.В. // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 10. С. 106–110.
- [4] Гречухин А.А., Лелевкин В.М., Смирнова Ю.Г., Токарев А.В. // Вестник КРСУ. 2009. Т. 9. № 11. С. 36–45.