

Стабильность срабатывания двухэлектродных разрядников высокого давления в режиме самопробоя при напряжениях несколько сотен киловольт

Н.В. Ландль^{}, Ю.Д. Королев, В.В. Ростов, В.Ф. Ландль, А.С. Степченко, А.А. Гришков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**landl@lnp.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Проанализированы режимы работы двухэлектродных разрядников в газах высокого давления в различных устройствах, предназначенных для получения наносекундных импульсов высокого напряжения. Показано, что причины нестабильного срабатывания разрядников по напряжению связаны главным образом с двумя причинами: нестабильность возникновения инициирующих электронов от импульса к импульсу и наличием газодинамических возмущений в промежутке в условиях, когда разрядник работает при высокой частоте следования импульсов. Обе причины приводят к снижению напряжения импульсного пробоя по сравнению со статическим пробивным напряжением. Существенное снижение импульсного пробивного напряжения имеет место в условиях, когда среднее электрическое поле в разряднике превышает 400 кВ/см, и разряд инициируется за счет тока автоэмиссии с катода.

Ключевые слова: искровой разрядник в газе высокого давления, пробивное напряжение.

1. Введение

Двухэлектродные разрядники в газах высокого давления, работающие в режиме самопробоя, часто используются в устройствах, где коаксиальная формирующая линия заряжается импульсным напряжением с длительностью фронта от нескольких микросекунд и более. Типичными примерами подобных устройств являются наносекундные ускорители типа «Синус» [1–3], наносекундные рентгеновские трубки [4, 5] и другие системы [6].

Одной из проблем в двухэлектродных разрядниках без принудительного внешнего запуска является обеспечение условий, в которых пробой в разряднике происходит в заданный момент времени на фронте зарядного напряжения. В идеализированном случае при большом времени зарядки пробой развивается, когда напряжение на электродах достигает так называемого статического пробивного напряжения [3, 5, 7]. Однако имеются факторы, в силу которых данный случай не реализуется, и для импульсного напряжения пробоя наблюдаются разбросы в моменте срабатывания разрядника и соответствующие разбросы напряжения на нагрузке. Данная работа направлена на выявление физических механизмов, вызывающих нестабильное срабатывание разрядников.

2. Статическое пробивное напряжение. Отклонение пробивных напряжений от закона Пашена

Когда говорят о напряжении статического пробоя, то подразумевается следующая ситуация [8]. Имеется межэлектродный промежуток с однородным электрическим полем, известной длиной зазора d и известным давлением газа p . На катоде присутствует хотя бы один инициирующий электрон, который дает начало развитию первичной электронной лавины. Пусть мы достаточно медленно повышаем напряжение на промежутке, и характерное время повышения напряжения намного больше, чем характерное время развития разрядных явлений. Тогда при достижении некоторого порогового напряжения происходит пробой промежутка, т.е. имеет место резкий рост тока во внешней электрической цепи и спад напряжения на электродах. Пороговое напряжение V_{br} , определенное таким способом, и считается напряжением статического пробоя.

В условиях статического пробоя количество электронов в первичной лавине оказывается достаточным, чтобы за счет фотоэффекта на катоде возникали вторичные электроны и

вторичные электронные лавины. Другими словами, имеет место стадия следующих друг за другом лавинных генераций. На данной стадии в промежутке происходит накопление пространственного заряда положительных ионов, внешнее электрическое поле искажается пространственным зарядом ионов, и новые лавины развиваются в искаженном электрическом поле. Количество электронов в каждой последующей лавине больше, чем в предшествующей лавине. В результате развития предпробойных процессов происходит переход к стадии необратимого нарастания тока, т.е. фактически к стадии пробоя.

Критерием пробоя в соответствии с описанным таунсендовским механизмом является соотношение

$$\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1, \quad (1)$$

где γ – коэффициент вторичной эмиссии на катоде, α – коэффициент ударной ионизации.

Использование последнего соотношения позволяет рассчитать статическое пробивное напряжение, поскольку в литературе имеется большое количество данных по измеренным коэффициентам ударной ионизации, а также по коэффициентам γ .

Анализ результатов измерений в азоте показывает, что в диапазоне напряжений близких к напряжению статического пробоя удобно использовать следующую аппроксимацию для коэффициента ударной ионизации [8]:

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right), \quad (2)$$

где в диапазоне $E/p = (27-200)$ В/(см·Торр) имеем $A = 8.8$ см⁻¹·Торр⁻¹, $B = 275$ В⁻¹·см·Торр.

Поскольку для отношения α/p соблюдается закон подобия (2), то можно показать, что статическое пробивное напряжение подчиняется известному закону Пашена [7, 8], согласно которому напряжение пробоя зависит от произведения давления газа на длину зазора pd .

На Рис. 1 представлены экспериментальные зависимости статического пробивного напряжения от произведения давления азота на межэлектродное расстояние в области высоких значений pd [9].

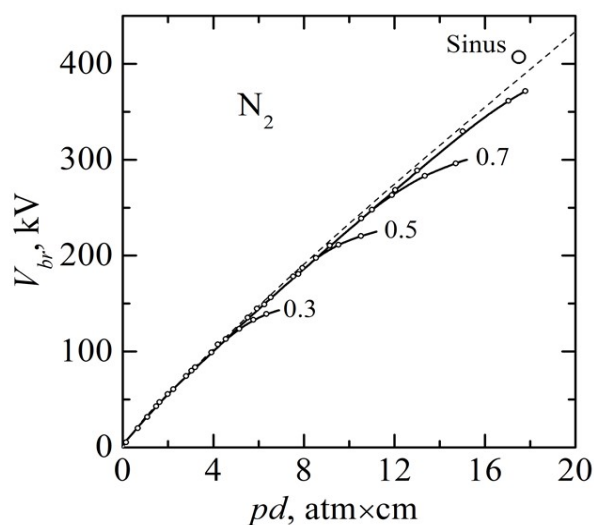


Рис. 1. Иллюстрация закона Пашена для пробивных напряжений в азоте. Цифры на кривых показывают межэлектродные расстояния в см, при которых наблюдаются отклонения от закона Пашена в сторону уменьшения пробивных напряжений. Пунктирная линия – расчет по критерию пробоя (1) при $\gamma = 10^{-4}$.

Видно, что для условий, когда электрическое поле в промежутке достаточно большое, пробивное напряжение оказывается меньше, чем было бы при соблюдении закона Пашена. Причина в том, что разряд инициируется не одиночными электронами, а присутствует заметный ток автоэмиссии, приводящий к снижению пробивного напряжения. Например, при длине зазора $d = 0.3$ см, и напряжении на промежутке $V_{br} = 135$ кВ среднее электрическое поле $E_{br} = 450$ кВ. При таком поле становится заметной автоэлектронная эмиссия с отдельных микроострий, и именно наличие тока автоэмиссии является фактором, приводящим к отклонению от кривой Пашена в сторону снижения напряжения пробоя.

3. Условия работы разрядников в ускорителях типа «Синус»

Как отмечалось выше, иллюстративным примером использования двухэлектродных неуправляемых разрядников является электрическая схема, применяемая для формирования высоковольтного импульса в наносекундных ускорителях [1]. Например, в работе [3] исследовалась стабильность работы разрядника с продувкой газа (азота). В большинстве экспериментов длина зазора была $d = 3.5$ см и давление газа до 10 атм.

Формирующая коаксиальная линия имела волновое сопротивление 50 Ом и электрическую длину 10 нс. Время зарядки формирующей линии составляло 35 мкс, и разрядник настраивался так, чтобы пробой происходил примерно в момент времени $t_{br} = 25$ мкс. Типичное напряжение, при котором происходил пробой разрядника, было на уровне 400 кВ. Тогда легко видеть, что максимальное электрическое поле в промежутке длиной 3.5 см не превышало 120 кВ/см. Данная длина зазора была выбрана из соображений, чтобы напряжение импульсного пробоя было близко к статическому пробивному напряжению, и чтобы эффект снижения напряжения за счет автоэмиссионного тока не имел место. Соблюдение данного подхода иллюстрируется на Рис. 1, где нанесены условия работы ускорителя «Синус» в соответствии с данными статьи [3]. Видно, что импульсное пробивное напряжение разрядника слегка превышает напряжение статического пробоя, показанное на рисунке пунктирной линией.

На Рис. 2 представлены данные по стабильности работы разрядника по напряжению. Здесь показаны средние значения импульсного пробивного напряжения и отклонения пробивных напряжений от среднего. Разброс на кривой соответствует максимальному и минимальному напряжению, измеренному для каждой точки в серии из 1000 импульсов.

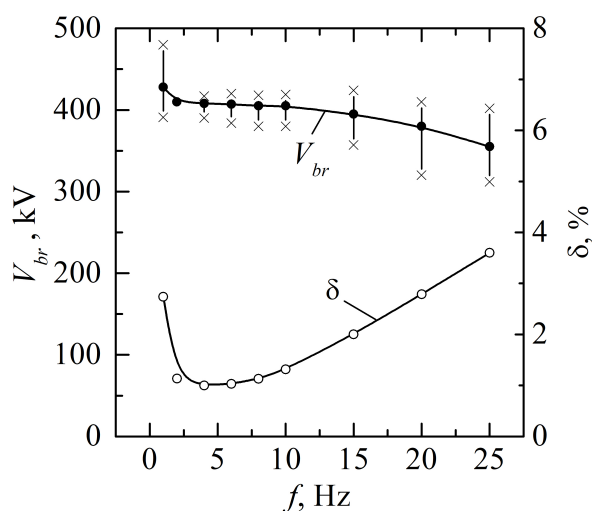


Рис. 2. Среднее напряжение пробоя разрядника в ускорителе «Синус» [3] и среднее квадратичное отклонение δ напряжения в зависимости от частоты следования импульсов. Давление газа (азота) $p = 5$ атм, принудительная продувка газа через разрядник отсутствует.

В общем случае разброс в напряжении срабатывания разрядника обусловлен разным временем формирования разряда от импульса к импульсу. Под временем формирования подразумевается интервал от момента, когда напряжение на промежутке достигает статического пробивного напряжения до момента начала пробоя (до момента резкого спада напряжения). Изменение времени формирования происходит по двум основным причинам: из-за разного количества иницирующих электронов и вследствие возникновения газодинамических возмущений в промежутке, когда разрядник работает в режиме высокой частоты следования импульсов.

Существуют самые разнообразные механизмы возникновения иницирующих электронов на поверхности катода. При этом следует иметь в виду, что процесс иницирования электронов на катоде во многом определяется влиянием предшествующего разряда, например, оседанием ионов на диэлектрические пленки и вкрапления на катоде, адсорбцией на катоде молекул кислорода в виде отрицательных ионов с последующим отрывом электрона от иона и т.д. [8]. Применительно к условиям настоящих экспериментов важным фактором может быть фотоэффект на катоде, если катод облучается от паразитного незавершенного разряда по поверхности изолятора в разряднике.

Исходя из механизма пробоя ясно, что характерный масштаб времени формирования разряда – это время пересечения промежутка первичной электронной лавиной. В условиях эксперимента при типичной дрейфовой скорости электронов 10^7 см/с это время составляет около 0.35 мкс. При таунсендовском пробое и при иницировании разряда одиночными электронами полное время формирования определяется числом следующих друг за другом лавинных генераций, т.е. может быть примерно в 10 раз больше [8]. В таких условиях напряжение импульсного пробоя оказывается максимальным. Этот случай соответствует частоте 1 Гц на Рис. 2.

Если число иницирующих электронов увеличивается, то уменьшается время формирования пробоя и, соответственно, напряжение импульсного пробоя. По нашим представлениям, оптимальное количество иницирующих электронов имело место в диапазоне частот от трех до десяти герц. Здесь достигнута наилучшая стабильность срабатывания разрядника по напряжению на уровне 1 %, причем импульсный пробой происходит при напряжении близком к напряжению статического пробоя.

Дальнейшее увеличение частоты следования импульсов приводит к тому, что условия в предшествующем импульсе начинают оказывать определяющее влияние на пробой в последующем импульсе. Формально это влияние можно интерпретировать как увеличение числа иницирующих электронов, в частности, по причине неполной рекомбинации плазмы в паузе между импульсами. Из Рис. 2 видно, что среднее напряжение импульсного пробоя уменьшается. Характерно, что уменьшение времени происходит за счет того, что появляются пробои, в которых напряжение меньше, чем статическое пробивное напряжение. Среднеквадратичный разброс пробивных напряжений также увеличивается.

Еще одна существенная причина нестабильной работы разрядника по напряжению состоит в возникновении так называемых газодинамических возмущений в межэлектродном промежутке. Дело в том, что при протекании тока импульсного пробоя в разрядной области выделяется энергия, что приводит к снижению концентрации нейтральных частиц в месте где локализован канал разряда. При наличии таких участков происходит снижение статического пробивного напряжения.

Для устранения данной причины в разрядниках ускорителей типа «Синус» применяется принудительная продувка газа поперек оси промежутка. Идея в том, чтобы за счет выбора соответствующей скорости потока обеспечить полную смену газа в разрядной зоне в паузе

между импульсами. Заметим, что эта мера позволяет также вынести из промежутка плазму предшествующего разряда к моменту, когда должен происходить последующий пробой.

Исследования стабильности работы разрядника применительно к данному случаю производилось, в частности, в работе [3], где представлены данные для различных скоростей потока газа. Показано, что при скорости потока около 8 м/с стабильная работа со среднеквадратичным отклонением пробивного напряжения на уровне 1 % имеет место вплоть до частоты повторений 100 Гц. При увеличении частоты повторений наблюдалось резкое увеличение среднеквадратичного отклонения, причем оно происходило за счет наличия импульсов с малым пробивным напряжением. Увеличение скорости потока до 20 м/с позволило увеличить частоту, при которой разрядник работал стабильно, до 250 Гц.

4. Условия работы отпаянных разрядников обострителей типа РО

Данные разрядники представляют собой метало-керамические конструкции, работающие в атмосфере водорода при давлениях от 50 атм и более [4, 5]. Типичная длина зазора в таких разрядниках $d = (3-4)$ мм, а напряжение импульсного пробоя достигает 250 кВ. Условия пробоя в разрядниках удобно пояснить, отталкиваясь от кривой Пашена, представленной в работе [9], которая приведена на Рис. 3.

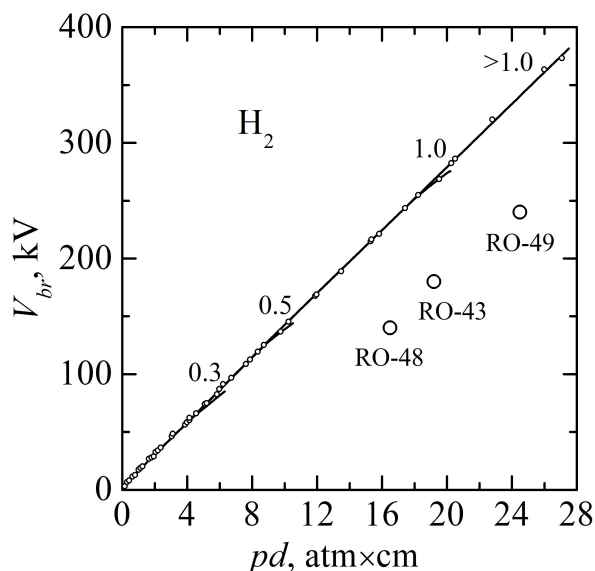


Рис. 3. Закон Пашена для пробивных напряжений в водороде [9] и условия работы разрядников обострителей типа РО, применяемых в импульсных рентгеновских трубках [4].

На приведенной кривой цифрами показаны длины зазора в см, при которых наблюдаются отклонения от закона Пашена в сторону уменьшения напряжений статического пробоя за счет автоэмиссии электронов с поверхности катода. Видно, что отклонения начинают проявляться при среднем электрическом поле около 300 кВ/см.

Что касается условий пробоя в разрядниках типа РО, то здесь имеют место существенно более высокие электрические поля. Например, разрядник РО-43 при длине промежутка $d = 0.32$ см и давлении газа $p = 60$ атм предназначен для работы при напряжении вплоть до 190 кВ. Тогда легко видеть, что среднее электрическое поле здесь достигает 590 кВ. При таком поле определенно проявляется эффект снижения импульсного пробивного напряжения в результате автоэмиссии. Это значит, что инициирование процесса пробоя в разрядниках происходит за счет тока автоэмиссии. Именно поэтому предварительная тренировка

поверхности катода является неотъемлемым этапом в технологии изготовления отпаянных разрядников.

В связи со сказанным представляет интерес обсуждение работы разрядника в статье [6]. Здесь коммутируемая энергия была до 450 Дж, и большие коммутируемые токи вызывали значительную эрозию поверхности катода. Места повышенной эрозии служили центрами автоэлектронной эмиссии, и тогда появлялись импульсы, в которых импульсное пробивное напряжение существенно снижалось.

5. Заключение

Показано, что нестабильная работа искровых разрядников в режиме самопробоя связана главным образом с двумя причинами: нестабильность возникновения инициирующих электронов от импульса к импульсу и наличием газодинамических возмущений в промежутке в условиях, когда разрядник работает при высокой частоте следования импульсов. Обе причины приводят к снижению напряжения импульсного пробоя по сравнению со статическим пробивным напряжением.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FWRM-2021-0007.

6. Литература

- [1] G.A. Mesyats, S.D. Korovin, A.V. Gunin, V.P. Gubanov, A.S. Stepchenko, D.M. Grishin, V.F. Landl, and P.I. Alekseenko, Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines, *Laser and Particle Beams*, **21**(2), 197, 2003, doi: 10.1017/S0263034603212076
- [2] V.V. Rostov, V.V. Barmin, V.F. Landl, P.V. Vyhodtsev, K.P. Artemov, and A.S. Stepchenko, High-current pulsed-repetitive electron accelerator “Sinus-320”. Formation and diagnostics of a wide-aperture beam, *Russ. Phys. Journal*, **62**(7), 1253, 2019, doi: 10.1007/s11182-019-01842-5
- [3] N.M. Bykov, A.V. Gunin, S. D. Korovin, and Y. D. Korolev, Operating features of a high-voltage spark gap switch with gas blow normal to the breakdown path in a repetitively pulsed mode, *Instrum. Exp. Tech.*, **51**(6), 838, 2008, doi: 10.1134/S0020441208060110
- [4] B.A. Kozlov and D.S. Makhanko, Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less than 10 nanoseconds, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2064**, 012126, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012126
- [5] B.A. Kozlov and D.S. Makhanko, Switching times of spark gaps-sharpeners at pressure up to 140 atmosphere, *Vestnik of RSREU*, **84**, 234, 2023, doi: 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245
- [6] B.M. Koval’chuk, Yu.D. Korolev, E.V. Kumpyak, O.B. Frants, and I.A. Shemyakin, Operating stability of a self-breakdown spark-gap frequency switch rated at a voltage of 300 kV and a switched power of up to 450 J, *Tech. Phys.* **59**, 1874, 2014, doi: 10.1134/S1063784214120135
- [7] J.M. Meek and J.D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1953.
- [8] Yu.D. Korolev and G.A. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases*, Ekaterinburg: Ural Division of the Russian Academy of Science, 1998.
- [9] E. Finkelmann, Der elektrische Durchschlag verschiedener Gase unter hohem Druck, *Archiv f. Elektrotechnik*, **31**, 282, 1937, doi: 10.1007/BF01657319