

Исследование процесса коммутации в псевдоискровом разряднике с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда

Ю.Д. Королев*, Н.В. Ландль, О.Б. Франц, В.Г. Гейман, А.В. Болотов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**korolev@lnp.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Исследуется процесс коммутации в псевдоискровом разряднике при анодных напряжениях до 20 кВ, коммутируемых токах на уровне 1 кА и типичных временах нарастания тока около 20 нс. Показано, что в стадии коммутации в разряднике имеет место плотный тлеющий разряд и так называемый сверхплотный тлеющий разряд со взрывоэмиссионными процессами на катоде. Характер нарастания тока зависит от метода запуска и от конструкции узла запуска и катодной полости. Предложены методы уменьшения времени коммутации.

Ключевые слова: псевдоискровой разрядник, разряд с полым катодом, тлеющий разряд.

1. Введение

Псевдоискровой разрядник представляет собой сильноточный коммутирующий прибор, основанный на разряде низкого давления с полым катодом [1, 2]. Первые работы по исследованию разряда низкого давления в конфигурации электродов псевдоискрового разрядника и созданию самих разрядников, были выполнены на разборных макетах с внешним напуском газа. На базе этих исследований были разработаны отпаянные приборы металлокерамические приборы, в которых рабочее давление поддерживается за счет встроенного генератора водорода [3–5]. Тем не менее, исследования с разборными макетами продолжают довольно интенсивно [2, 6–8].

В типичных электрических схемах включения разрядника высокое напряжение прикладывается к аноду, а внутри заземленной катодной полости располагается система внешнего запуска. Один из методов запуска основан на применении вспомогательного тлеющего разряда. Данный метод позволяет обеспечить наносекундную стабильность срабатывания разрядника относительно момента прихода импульса запуска, и реализовать режим параллельной работы большого числа приборов на общую нагрузку [2, 5].

При решении проблемы наносекундной стабильности работы разрядников получены впечатляющие результаты по пониманию процесса формирования разряда в стадии запаздывания пробоя, т.е. в предпробойной стадии. Для сильноточной стадии разряда, соответствующей процессу коммутации, также имеются определенные результаты. В частности, предложены модели поддержания плазмы в этой стадии [2, 9]. Настоящая работа направлена главным образом на выявление особенностей роста тока в разряднике в процессе коммутации.

2. Устройство разрядника и метод запуска

Схематическое устройство разрядника показано на Рис.1. Высоковольтные электроды, анод *A* и полый катод *C*, размещены в корпусе из керамики с внутренним диаметром 86 мм. Рабочее давление водорода в диапазоне (0.3–0.7) Торр поддерживается за счет баланса между скоростью откачки и скоростью натекания газа. Длина основного межэлектродного промежутка между электродами *A* и *C* составляет 3 мм. Этот промежуток сообщается с катодной полостью через 8 отверстий в плоской части электрода *C* диаметром 3 мм, расположенных на окружности диаметром 26 мм. В таких условиях без внешнего запуска основной высоковольтный промежуток выдерживает без пробоя напряжение V_0 до 20 кВ.

Электроды узла запуска A_1 и C_1 представляют собой полости с внутренним диаметром 36 мм и глубиной 46 мм. На плоской части электрода C_1 имеется отверстие, диаметр которого в большинстве экспериментов был равен 10 мм.

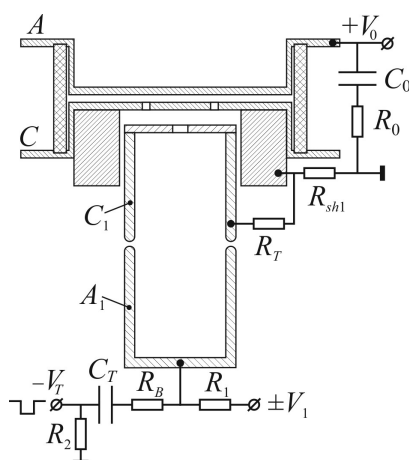


Рис. 1. Схема разрядника со вспомогательным тлеющим разрядом и метод запуска, основанный на иницировании плазмы в заземленной катодной полости C . Накопительная емкость $C_0 = 5.5$ нФ, сопротивление нагрузки в цепи анода $R_0 = 15$ Ом. Напряжение питания вспомогательного тлеющего разряда $V_1 = (0.4-3)$ кВ, балластное сопротивление $R_1 = 55$ кОм. Амплитуда импульса запуска $V_T = (2-3.5)$ кВ, $R_T = (0-1000)$ Ом, $C_T = 230$ нФ, $R_2 = 100$ Ом, $R_B = 50$ Ом.

Принцип запуска практически всех видов псевдоискровых разрядников основан на том, что в заданный момент времени тем или иным способом генерируется плазма внутри заземленной катодной полости. Тогда электроны из плазмы извлекаются под действием анодного напряжения в основной высоковольтный промежуток через отверстия в плоской части электрода C , и происходит иницирование основного разряда в соответствии с механизмом, описанным в [2].

Известный метод запуска, позволяющий применительно к условиям Рис.1 обеспечивать наносекундную стабильность срабатывания разрядника, сводится к следующему. В исходном состоянии к аноду приложено напряжение V_0 , и между электродами A_1 и C_1 поддерживается стационарный тлеющий разряд с полым катодом и полым анодом при типичном токе около 20 мА. Разряд горит за счет напряжения V_1 положительной полярности. Это значит, что для вспомогательного тлеющего разряда полость A_1 играет роль полого анода, а полость C_1 служит полым катодом. Соответственно, в полости C_1 имеется плазма отрицательного свечения. Ионы из этой плазмы могут проходить через отверстие в электроде C_1 , однако наличие данного потока ионов практически не приводит к снижению пробивного напряжения высоковольтного промежутка [8].

При приложении импульса запуска V_T отрицательной полярности возникает импульсный разряд запуска в системе электродов A_1 и C_1 . Под действием этого импульса происходит перестройка вспомогательного тлеющего разряда, т.е. полость A_1 превращается в полый катод разряда запуска, а полость C_1 превращается в полый анод. В таких условиях легко обеспечивается перехват тока разряда запуска через отверстие в заземленную катодную полость C . Иными словами, в полости C генерируется плазма, что приводит к запуску прибора. Следует заметить, что наличие сопротивления R_T в схеме способствует процессу перехвата тока и запуску разрядника [5, 8].

Оказалось, что в описанной конструкции и в применяемой схеме разрядник запускается даже при зажигании вспомогательного тлеющего разряда и при отсутствии генератора импульсов V_T . Запуск происходит, если для иницирования вспомогательного разряда

используется напряжение V_1 отрицательной полярности. В этом случае ток вспомогательного разряда перехватывается через отверстие в электроде C , в полостях C_1 и C возникает плазма положительного столба, и даже малый ток вспомогательного разряда оказывается достаточным, чтобы инициировать пробой в основном промежутке.

3. Процесс коммутации при запуске разрядника за счет инициирования от вспомогательного тлеющего разряда

Типичные осциллограммы, иллюстрирующие развитие процесса коммутации основного промежутка для случая инициирования пробоя за счет зажигания вспомогательного тлеющего разряда представлены на Рис. 2.

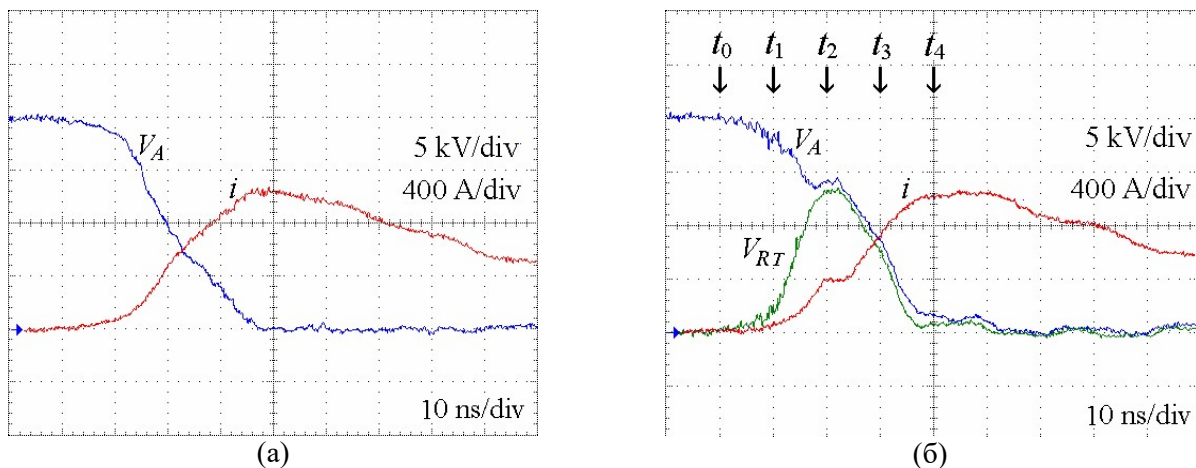


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на аноде разрядника V_A , полного коммутируемого тока $i(t) = i_1(t)$ и падения напряжения на сопротивлении R_T , позволяющего получить ток на электрод C_1 . (а) – $R_T = 0$. (б) – $R_T = 1000$ Ом.

Рост тока в основном межэлектродном промежутке происходит при разрядке емкости C_0 , которая в исходном состоянии заряжена до напряжения $V_0 = 20$ кВ. Осциллограмма $V_A(t)$ показывает потенциал анода относительно земли, измеряемый с помощью высоковольтного пробника, и осциллограмма V_{RT} показывает потенциал электрода C_1 относительно земли, т.е. фактически падение напряжения на сопротивлении R_T . Сигнал полного коммутируемого тока в цепи анода $i(t)$ снимается с шунта R_{sh1} .

Рассмотрим вначале поведение осциллограмм применительно к Рис. 2а, т.е. для условий $R_T = 0$. Коммутируемый ток $i(t)$ протекает под действием анодного напряжения $V_A(t)$ положительной полярности. Это значит, что заземленные электроды C и C_1 играют роль полого катода сложной формы.

В процессе развития разряда внутри полого катода формируется плазма отрицательного свечения. В общем случае такая плазма имеется внутри восьми отверстий в плоской части электрода C , в самой полости C , а также в полости C_1 . Тогда коммутируемый ток протекает с анода A и замыкается на внутреннюю поверхность восьми отверстий, на боковую поверхность полости C и на боковую поверхность полости C_1 . Соответственно, полый катод можно рассматривать как состоящий из двух секций C и C_1 . Часть полного тока i_1 замыкается на секцию C , и другая часть i_2 замыкается на секцию C_1 , так что ток в цепи анода $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$.

Процесс коммутации, начинается в момент $t_0 = 0$. В момент $t_1 = 10$ нс имеем полный коммутируемый ток $i = 80$ А и напряжение на промежутке $V_A(t_1) = 18.5$ кВ. Измеряемое напряжение V_A представляет собой разность потенциалов между анодом и заземленным

катодом, т.е. это фактически напряжение горения разряда в процессе коммутации, $V_A(t) = V_d$. Как будет ясно из дальнейшего, ток в момент t_1 замыкается главным образом на секцию C . Это ток плотного тлеющего разряда с полым катодом, и падение напряжения катодном слое V_c приблизительно равно V_d . Сам катодный слой, т.е. область между плазмой отрицательного свечения и катодом, примыкает к внутренней поверхности восьми отверстий и к внутренней поверхности полости C .

В интервале времен между t_1 и t_2 происходит генерация плазмы внутри отверстий и в полости C за счет эффекта полого катода. Ток на катод обеспечивается главным образом потоком ионов из этой плазмы. Поскольку концентрация плазмы растет, то имеет место увеличение тока $i(t)$ и соответствующий спад напряжения на аноде. К моменту времени t_2 ток достигает 480 А, и напряжение горения разряда, т.е. падение напряжения на области прикатодного падения потенциала снижается до $V_d = 10$ кВ.

На последующих временных стадиях плазма начинает генерироваться не только в полости секции C , но также в полости секции C_1 . Тогда увеличение полного тока разряда происходит не только за счет компонента $i_1(t)$, но также за счет компонента тока $i_2(t)$ на секцию C_1 . В момент времени $t_4 = 40$ нс ток достигает максимального значения $i_m = 1040$ А. Напряжение горения разряда снижается до уровня менее 1 кВ, и максимальный ток определяется начальным напряжением на емкости $V_0 = 20$ кВ, сопротивлением в цепи нагрузки $R_0 = 15$ Ом и индуктивностью электрической цепи.

Чтобы понять более детально формы горения разряда при развитии процесса коммутации и характер распределения тока по поверхности катода, рассмотрим осциллограммы на Рис. 2б, которые соответствуют условиям, когда секция C_1 соединена с землей через сопротивление $R_T = 1000$ Ом. Как видно из электрической схемы, данное сопротивление ограничивает долю коммутируемого тока, протекающего на секцию C_1 . В результате форма полного тока $i(t)$ существенно изменяется. Отметим, что в данном случае мы также регистрируем осциллограмму напряжения V_{RT} , т.е. потенциал электрода C_1 относительно земли. Тогда ток, протекающий на секцию C_1 определяется как $i_2(t) = V_{RT}/R_T$.

Из сравнения осциллограмм на Рис. 2а и Рис. 2б видно, что на интервале времен от t_0 до t_2 формы полного коммутируемого тока $i(t)$ практически совпадают, и ток на секцию C_1 пренебрежимо мал. Это значит, что коммутируемый ток на катоде замыкается на внутреннюю поверхность отверстий в плоской части электрода C и на боковую поверхность полости C .

В момент t_2 рост тока $i(t)$ резко замедляется и на осциллограммах $V_A(t)$ и $i(t)$ наблюдаются ступеньки с характерной длительностью около 5 нс. Рассмотрим условия поддержания разряда, применительно к данной временной стадии, когда в соответствии с Рис. 2б анодное напряжение $V_A(t_2) = 14$ кВ и полный ток $i(t_2) = 400$ А.

Внутри отверстий в плоской части электрода C и в самой полости C имеется плазма, и потенциал этой плазмы примерно равен 14 кВ. Иными словами, вблизи поверхности электрода C имеется область прикатодного падения потенциала $V_{c1} \approx V_A(t_2) = 14$ кВ. Как и в любом виде тлеющего разряда с полым катодом, генерация плазмы в полости происходит благодаря рассеянию в объеме энергии электронов, ускоренных в слое прикатодного падения потенциала. Из осциллограмм видно, что имеет место замедление роста тока, что обусловлено замедлением роста концентрации плазмы в полости C .

Рост полного тока $i(t)$ мог бы происходить за счет генерации плазмы в секции C_1 . Однако ток на эту секцию искусственно ограничен сопротивлением R_T и составляет $i_2(t_2) = V_{RT}/R_T = 13$ А. Физическая причина ограничения тока состоит в следующем. На стадии ступеньки потенциал плазмы внутри полости C_1 примерно равен 14 кВ и потенциал электрода C_1 в соответствии с осциллограммой $V_{RT} = 13$ кВ. Тогда величина прикатодного

падения потенциала вблизи внутренней поверхности электрода C_1 может быть оценена как $V_{c2} = (V_A - V_{RT}) \approx 1$ кВ. Такая малая величина катодного падения потенциала недостаточна для эффективной генерации плазмы в полости C_1 .

Таким образом, имеем условия, в которых к моменту времени t_2 рост тока за счет секции C резко замедляется на короткое время около 5 нс. Дальнейшее увеличение тока мы связываем с переходом от плотного тлеющего разряда к так называемому сверхплотному тлеющему разряду. В соответствии с концепцией, разработанной в [9] сверхплотный тлеющий разряд соответствует ситуации, когда в катодном слое V_{c1} развивается так называемая взрывоэмиссионная неустойчивость, и на внутренней поверхности отверстий формируются катодные пятна. Эмиссионная способность катода резко возрастает, и ток разряда увеличивается вследствие роста тока на секцию C .

С другой стороны, для случая $R_T = 0$ мы не наблюдаем ступеньки в росте тока. Различие условий поддержания разряда в том, что для данного случая в качестве заземленной катодной полости работают совместно секции C и C_1 . Иными словами, заземленная катодная полость имеет большой размер за счет большой глубины полости, роста концентрации плазмы в полости большой глубины не наблюдается.

В связи со сказанным, конструкция разрядника была модифицирована. Расстояние между плоскими частями электродов C и C_1 было увеличено от $h = 6$ мм до $h = 20$ мм. В данной конструкции с целью детального исследования распределения тока по внутренней поверхности катодной полости эта полость сделана в виде двух секций 1 и 2 , причем сигнал тока на каждую секцию может сниматься с отдельных шунтов R_{sh1} и R_{sh2} . Модифицированная конструкция показана на Рис. 3.

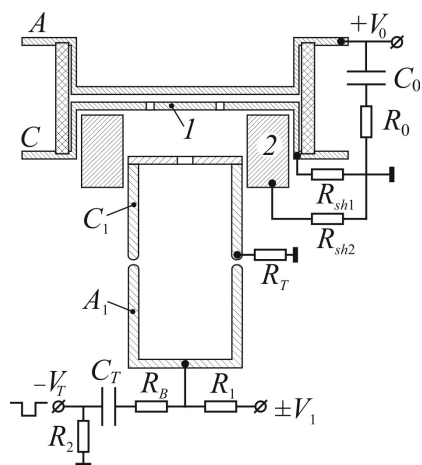


Рис. 3. Модифицированное устройство разрядника с секционированным полым катодом и методы запуска.

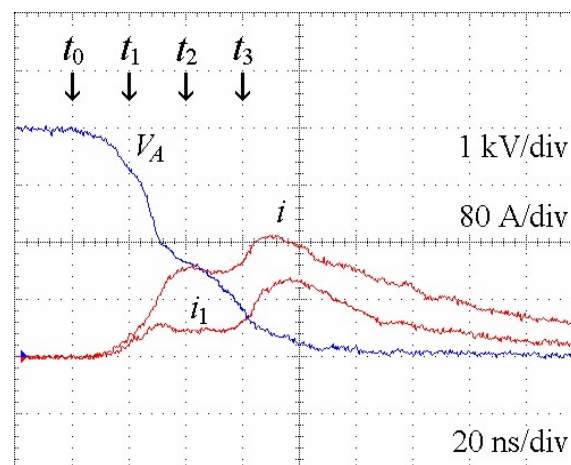


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на аноде V_A , полного коммутлируемого тока $i(t)$, протекающего через секции 1 и 2 , и тока $i_1(t)$ через секцию 1 .

В данной конструкции при уровне напряжений в 20 кВ даже при наличии в схеме сопротивления R_T выраженные ступеньки на осциллограммах тока и напряжения отсутствовали, т.е. переход от стадии плотного тлеющего разряда к сверхплотному разряду происходил на интервале времен менее 5 нс. Различные формы тлеющего разряда в процессе коммутации наиболее наглядно иллюстрируются для условий пониженного анодного напряжения, когда процесс коммутации протекает более медленно. На Рис. 4 приведены соответствующие осциллограммы для случая, когда $V_0 = 4$ кВ, и инициирование разряда в основном промежутке осуществляется за счет зажигания вспомогательного тлеющего разряда при отрицательной полярности напряжения V_1 .

Видно, что до момента t_1 коммутируемый ток замыкается главным образом на секцию 1, т.е. обеспечивается за счет генерации плазмы внутри отверстий в плоской части электрода С. Далее начинает работать весь объем катодной полости, и полный ток $i(t)$ растет за счет тока на боковую поверхность секции 2. В частности, в течении интервала времени в окрестности t_2 имеем стадию плотного тлеющего разряда. Полный коммутируемый ток $i(t_2) = 120$ А, причем ток на секцию 1 составляет около 50 А. Катодное падение потенциала на данной стадии $V_c \approx V_A(t_2) \approx 1500$ В.

4. Заключение

Показано, что процесс коммутации в разряднике при токах на уровне 1 кА обусловлен развитием плотного тлеющего разряда с полым катодом и сверхплотного тлеющего разряда со взрывоэмиссионными процессами на катоде. При этом характер нарастания тока зависит от метода запуска и от конструкции узла запуска и заземленной катодной полости.

Благодарности

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

5. Список литературы

- [1] K. Frank and J. Christiansen, The fundamentals of the pseudospark and its applications, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **17**(5), 748, 1989; doi: 10.1109/27.41195
- [2] Y.D. Korolev and N.N. Koval, Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **51**, 323001, 2018; doi: 10.1088/1361-6463/aacf10
- [3] V.D. Bochkov, V.M. Dyagilev, V.G. Ushich, O.B. Frants, Y.D. Korolev, I.A. Shemyakin, and K. Frank, Sealed-off pseudospark switches for pulsed power applications (current status and prospects), *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **29**(5), 802, 2001; doi: 10.1109/27.964478
- [4] R.P. Lamba, U.N. Pal, B.L. Meena, and R. Prakash, A sealed-off double-gap pseudospark switch and its performance analysis, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **27**(3), 035003, 2018; doi: 10.1088/1361-6595/aaab80
- [5] Y.D. Korolev, N.V. Landl, O.B. Frants, V.G. Geyman, G.A. Argunov, P.V. Logachev, P.A. Bak, and A.V. Akimov, A sealed-off pseudospark switch with nanosecond stability of triggering, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. **68**(9), 4692, 2021; doi: 10.1109/TED.2021.3096182
- [6] U.N. Pal, P.R. Lamba, Varun, V.L. Meena, and K. Frank, A multi-gap multiaperture pseudospark switch and its performance analysis for high-voltage applications, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. **67**(12), 5600, 2020; doi: 10.1109/TED.2020.3029022
- [7] W.D. Ding, S.K. Shen, J.Q. Yan, Y.A. Wang, and B. Wang, Discharge characteristics of a pseudospark switch in series with a saturable inductor, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **47**(10), 4572, 2019; doi: 10.1109/TPS.2019.2919254
- [8] Y.D. Korolev, N.V. Landl, O.B. Frants, V.G. Geyman, A.V. Bolotov, and V.O. Nekhoroshev, Study of trigger mechanisms of a pseudospark switch configuration with a steady-state auxiliary glow discharge, *Phys. Plasmas*, vol. **30**(9), 093501, 2023; doi: 10.1063/5.0155949
- [9] Y.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, I.A. Shemyakin, and V.G. Geyman, High-current stages in a low-pressure glow discharge with hollow cathode, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **41**(8), 2087, 2013; doi: 10.1109/TPS.2013.2266675