

15

Стабильность срабатывания частотного разрядника в режиме самопробоя при напряжении до 300 кV и коммутируемой энергии до 450 J

© Б.М. Ковальчук,¹ Ю.Д. Королев,^{1,2} Е.В. Кумпяк,¹ О.Б. Франц,¹ И.А. Шемякин¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: korolev@lnp.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 14 февраля 2014 г.)

Представлено описание стенда для исследования двухэлектродных разрядников на напряжение до 300 кV и частоту следования импульсов до 10 Hz, работающих в воздухе при повышенном давлении. Типичное время импульсной зарядки накопительной емкости в стенде составляет около 100 мс. Исследован разрядник, в котором стабильность срабатывания по напряжению на уровне менее 10% достигается за счет использования коронного разряда в предпробойной стадии. Показано, что причиной нестабильного срабатывания является наработка окислов азота в разряднике. Для поддержания концентрации окислов на приемлемом уровне использованы режимы непрерывной продувки газа, и дан метод оценки необходимых потоков газа.

1. Введение

Для получения сильноточных высоковольтных импульсов с уровнем напряжения от 100 кV и более традиционно используются генераторы с емкостными накопителями энергии и газовыми разрядниками высокого давления [1,2]. При этом, как правило, применяется импульсная зарядка емкостного накопителя. Чтобы обеспечить срабатывание разрядника в заданный момент времени, т. е. при заданном напряжении, целесообразно применять управляемые разрядники. Однако устройства с внешним запуском довольно сложны, поэтому особый интерес представляют двухэлектродные разрядники, работающие в режиме самопробоя. Напряжение, при котором происходит пробой разрядника, может изменяться от импульса к импульсу. Соответственно одной из проблем является обеспечение стабильного срабатывания разрядника по напряжению.

Электрическая прочность двухэлектродного разрядника при поле, близком к однородному, обычно характеризуется так называемым напряжением статического пробоя. Когда мы говорим об измерении этого напряжения, то подразумеваем следующую ситуацию. К электродам прикладывается напряжение, медленно растущее во времени. В течение времени нарастания напряжения на катоде возникают одиночные иницирующие электроны, из которых могут развиваться первичные электронные лавины. Характерное время подъема напряжения должно быть существенно больше, чем время развития предпробойных явлений до начала резкого роста тока. Тогда пробой происходит при некотором пороговом напряжении, которое и называется напряжением статического пробоя. В описанных условиях величина пробивного напряжения имеет незначительный разброс, поэтому эти условия являются наиболее приемлемыми для разрядника, работающего в режиме самопробоя.

Однако в реальных разрядниках при подаче на электроды импульсного напряжения процессы в предпробойной стадии часто отличаются от представленной идеализированной картины. Импульсный пробой может происходить при напряжениях как выше, так и ниже, чем напряжение статического пробоя. В сильноточных разрядниках катод подвергается значительной эрозии, и ток эмиссии иницирующих электронов сильно зависит от состояния поверхности катода. Тогда, если на катоде возникают микроучастки с повышенной электронной эмиссией, то пробивное напряжение промежутка снижается, причем оно сильно флуктуирует от импульса к импульсу.

Особый случай это разрядники, работающие в режиме высокой частоты следования импульсов. Здесь снижение напряжения импульсного пробоя и большой разброс пробивных напряжений происходят за счет того, что предшествующий разряд влияет на условия пробоя в последующем разряде. Например, в промежутке могут оставаться газодинамические возмущения, либо следы не распавшейся полностью плазмы. Кроме того, на напряжение пробоя влияет изменение химического состава газа.

При создании разрядников применяются специальные меры, чтобы предотвращать нестабильность пробивного напряжения. Ясно, что здесь используют принудительную прокачку газа, причем выбор межэлектродной конфигурации и подбор скорости прокачки представляют собой не простую проблему. Применяются также системы со специально создаваемым коронным разрядом, чтобы стабилизировать ток иницирующих электронов с катода [3,4].

К настоящему времени получены впечатляющие результаты по исследованию и созданию двухэлектродных разрядников, работающих в режиме самопробоя

при уровне энергии порядка 10 J и менее. Для получения импульсов с фронтом порядка наносекунды используются режимы разрядников высокого давления в условиях, близких к статическому пробое [2,5,6], а в субнаносекундных генераторах используется режим пробоя сильно перенапряженных промежутков [7–9].

В последнее время повышенный интерес проявляется к разрядникам с большой коммутируемой энергией, в частности, для технологических применений [10,11]. В нашей предшествующей работе [12] предложена конструкция разрядника на напряжение до 300 kV при коммутируемой энергии до 450 J и частоте следования импульсов до 10 Hz.

Исследовались различные электродные системы. Наилучшие результаты были получены для системы, в которой катод представлял собой стержень с плоским торцом. Оказалось, что на кромке такого катода уже при низких напряжениях появляется коронный разряд. Наличие коронного разряда в предпробойной стадии меняет ситуацию в промежутке существенным образом. С одной стороны, плазма разряда экранирует катодную кромку и способствует выравниванию электрического поля по длине промежутка [12,13–15]. С другой стороны, она является источником иницирующих электронов, причем электроны поступают в промежуток однородно, и область локальной повышенной эмиссии отсутствует. Фактически, пробоем промежутка предшествует слаботорочная стадия коронного разряда, а сам пробой представляет собой процесс перехода коронного разряда в искру [12,16–18]. В таких условиях достигнута стабильность по напряжению на уровне 10%.

В работе представлены результаты дальнейших исследований разрядника подобного типа. Для исследований создан специальный стенд, описанный ниже. Основное внимание при выборе режимов работы разрядника уделено выбору конструкции электродов и условий продувки газа через разрядник. Выявлена связь между химическим составом газа, который изменятся во времени, и переходом в нестабильный режим работы по напряжению.

Стенд для исследований и конструкция разрядника

Упрощенная схема, демонстрирующая принцип работы стенда, представлена на рис. 1. Импульсная зарядка накопительной емкости C до напряжений 200–300 kV осуществляется от электрической схемы на основе высоковольтного импульсного трансформатора с замкнутым железным сердечником T . На первичной обмотке трансформатора формируется импульс напряжения U_1 с максимальной амплитудой до 2 kV. Коммутирующим элементом в первичной цепи является сборка из тиристоров. Коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора $K = 160$, а время зарядки емкости C до максимального напряжения составляет около 100 μ s.

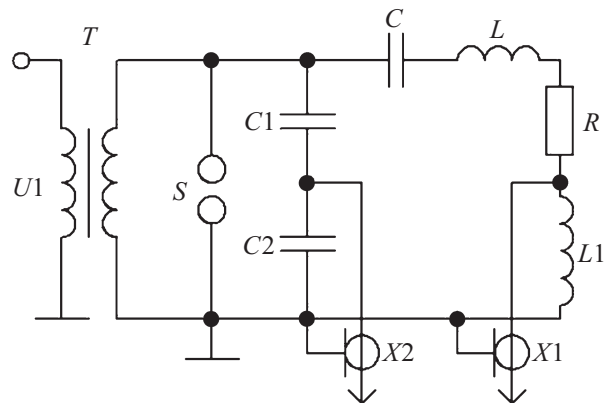


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема стенда для исследования разрядников. C — высоковольтный емкостный накопитель энергии, T — импульсный трансформатор для зарядки емкостного накопителя, L — индуктивность цепи разрядки, S — искровой разрядник высокого давления, R — сопротивление нагрузки, $C1/C2$ — емкостный делитель для регистрации зарядного напряжения, $L1$ — индуктивный датчик для регистрации тока разряда, $X1$ — канал регистрации тока разряда, $X2$ — канал регистрации зарядного напряжения.

При срабатывании разрядника S на активной нагрузке R формируется импульс тока. Одно из применений подобных схем — это технологические установки для дробления твердых материалов при электрическом пробое [10,11]. В таких системах сопротивление нагрузки (искрового канала, возникающего при электрическом пробое) мало по сравнению с импедансом внешней электрической цепи, поэтому ток разряда имеет колебательный характер. В данном стенде используется эквивалентная нагрузка $R = 2.7 \Omega$, сопротивление которой также меньше, чем импеданс $\rho = (L/C)^{1/2} = 7.35 \Omega$. Накопительная емкость была набрана из бумажно-масляных конденсаторов и составляла в большинстве описанных здесь экспериментов $C = 10$ nF.

Высоковольтные элементы стенда (накопительная емкость C , импульсный трансформатор T и сопротивление нагрузки R) были размещены в баке, заполненном трансформаторным маслом. В этом же баке располагался емкостный делитель для регистрации зарядного напряжения на емкости $C1/C2$ и индуктивный датчик $L1$ для регистрации тока через нагрузку. Разрядник S монтировался в корпусе, расположенном на боковой стенке бака. Напряжение на разрядник подавалось через проходной изолятор, который отделял газовый объем разрядника от масляного объема бака.

Конструкция разрядника схематично представлена на рис. 2. Корпус разрядника представляет разборную камеру из нержавеющей стали общим объемом около 8 liter при рабочем давлении до 8 atm. Импульсное напряжение отрицательной полярности подается на катод 2 через проходной изолятор 3. Как отмечалось ранее, в предшествующей версии разрядника [12] межэлектродный промежуток был образован плоским анодом и катодом

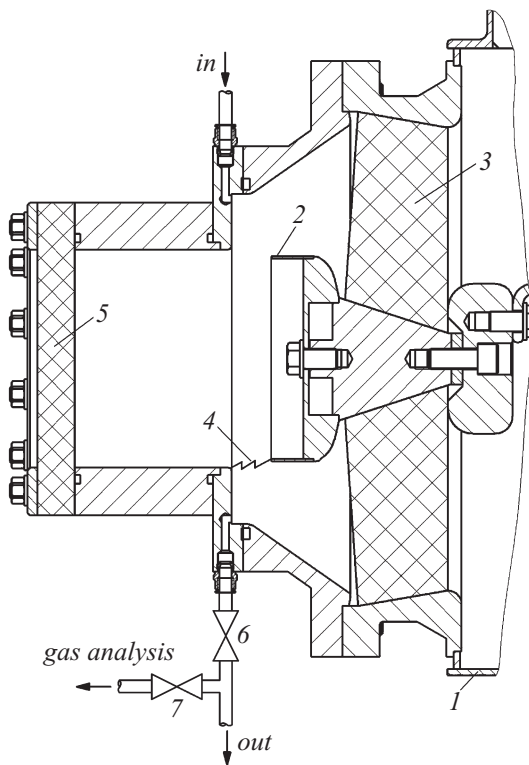


Рис. 2. Схематический чертеж разрядника *S*. 1 — стенка бака заполненного трансформаторным маслом, 2 — катод разрядника, 3 — проходной изолятор, 4 — схематическое изображение канала разряда, 5 — окно для наблюдения разряда, 6 — вентиль для регулирования потока газа, 7 — вентиль для подачи газа в систему химического анализа.

в форме стержня с плоским торцом. Стабилизация пробивного напряжения происходила вследствие того, что на предпробойной стадии на острой кромке катода возникал коронный разряд.

При большом числе срабатываний происходило постепенное сглаживание острой кромки катода, условия возникновения коронного разряда затруднялись, и стабильность срабатывания разрядника по напряжению ухудшалась. Поэтому в дальнейшем мы применили катод в форме тонкостенной трубки большого диаметра. Это позволило увеличить общую площадь рабочей части катода, поскольку здесь весь торец катода фактически служит кромкой, на которой возникает коронный разряд. Поскольку разрядник представлял собой разборную систему, то в экспериментах проводилось изменение диаметра катода, толщины стенки катода и межэлектродной конфигурации в целом. Результаты, представленные далее, соответствуют конфигурации электродов, показанной на рис. 2. Здесь искровой пробой происходил между катодом 2 и стенкой разрядника (канал искрового разряда схематично показан как позиция 4). Внутренний диаметр катода составлял 160 мм, толщина стенки была 2 мм, и межэлектродное расстояние было 30 мм.

Торец разрядника в описываемых экспериментах был закрыт окном из оргстекла 5. Это позволяло производить визуальные наблюдения искрового разряда, фотографировать разряд и получать спектры свечения в видимой области длин волн. Спектры снимались с помощью спектрометра Ocean Optics USB 2000+. Сигнал поступал на вход спектрометра через световод со зрачком входа около 0.2 мм. Специальная оптическая система для переноса изображения на вход световода не применялась, поскольку канал разряда возникает случайным образом на различных участках катода. Световод был расположен так, что мы регистрировали как излучение от разряда и элементов конструкции, прошедшее через газ, так и излучение, возникающее в самом газе в результате люминесценции. Спектральный диапазон измерений обрезался в ультрафиолетовой области окном 5 из оргстекла (рис. 2) и составлял $\Delta\lambda = 380\text{--}850\text{ nm}$. Полное количество импульсов для получения спектра обычно составляло около 25, т.е. при частоте $f = 5\text{ Hz}$ полное время экспозиции было около 5 с.

Эксперименты проводились как в режиме постоянной продувки газа через разрядник, так и в режиме без продувки. Газ (в большинстве случаев осушенный воздух) подавался в разрядник через фланец камеры, как показано на рис. 2. Выход газа осуществлялся через вентиль 6, причем выходной поток и рабочее давление газа в разряднике регулировались с помощью этого вентиля.

В процессе работы разрядника происходит существенное изменение химического состава газа [19–22]. Чтобы выявить связь между составом газа и стабильностью работы разрядника, мы производили измерения концентрации кислорода и окислов азота в различных режимах. Часть выходного потока газа отводилась вентилем 7 и с помощью микронасоса подавалась в анализатор газа. Газовый анализатор был разработан компанией „Проманалитприбор“, Бердск. Он позволял измерять типичный состав дымовых газов, образующихся в процессе горения углеводородов [20,23,24]. Применительно к настоящим экспериментам работа датчиков для определения концентрации O_2 и NO основана на электрохимическом принципе (использовались соответственно датчики 2FO Flue Gas CiTiceL и 3MNF/F CiTiceL). Для определения концентрации NO_2 в приборе применялся оптический метод, основанный на измерении коэффициента поглощения в инфракрасной области спектра. В целом прибор позволял проводить измерения практически в режиме реального времени (характерное время отклика на изменение состава смеси было не более 10 с).

Результаты экспериментов и обсуждение

Исследования разрядника проводились при использовании в качестве рабочих газов азота, смесей азота с

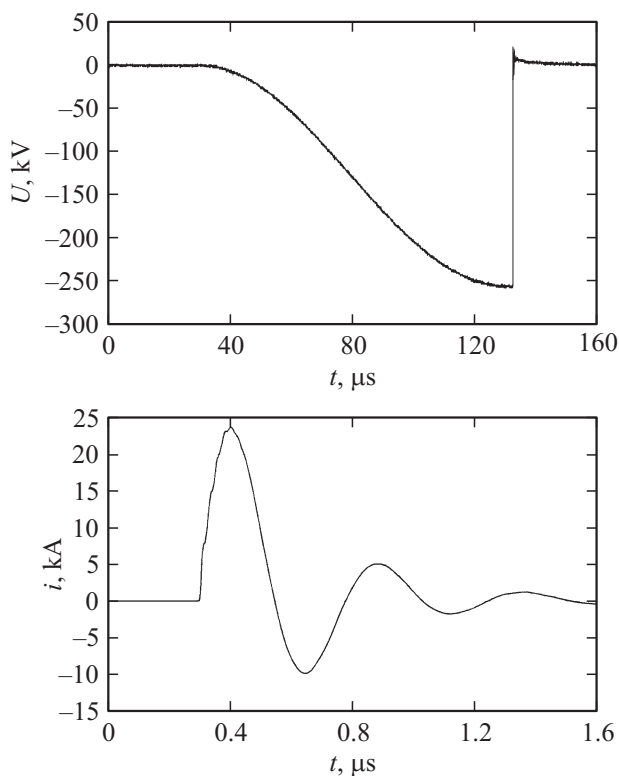


Рис. 3. Пример осциллограммы напряжения на электродах разрядника и тока в промежутке после срабатывания разрядника. $C = 10$ нФ.

CO_2 и осушенного воздуха. Необходимо отметить, что эффект стабилизации пробивного напряжения за счет использования катода с острой кромкой наблюдался лишь для разряда в воздухе. Поэтому последующие результаты приведены для разрядника, работающего на воздухе. Одной из задач было определение необходимых потоков газа через разрядник, при которых стабильность срабатывания по напряжению сохраняется.

На рис. 3 представлен пример осциллограммы напряжения на межэлектродном промежутке разрядника $U(t)$, и коммутируемого тока $i(t)$. Данный рисунок представлен для того, чтобы продемонстрировать указанные выше параметры электрической цепи и методику измерения пробивного напряжения. Видно, что пробой разрядника, фиксируемый по резкому спаду напряжения на электродах, происходит в момент $t = 132 \mu\text{s}$, когда напряжение достигло $U_{br} = 255$ кВ. Собственная индуктивность контура $L = 0.54 \mu\text{H}$ была вычислена по наилучшему совпадению расчетной и экспериментальной осциллограммы затухающего тока.

На рис. 4 показаны наложенные друг на друга осциллограммы импульса напряжения при работе разрядника с частотой следования импульсов $f = 5$ Hz в условиях, когда продувка газа отсутствует. В течение примерно одной минуты работы имеет место достаточно хорошая стабильность срабатывания разрядника (рис. 4, *a*). Разброс во временах срабатывания не превышает $5 \mu\text{s}$.

Одиночные пробои при низком напряжении на емкости отсутствуют. Искровые каналы в этом режиме возникают случайным образом на всей поверхности электродов (привязываются случайным образом ко всей кромке катода).

Увеличение времени работы до 2–3 min приводит к тому, что газ нагревается. Это видно и по нагреву стенки разрядника, и по повышению давления, которое фиксируется манометром. Давление газа повышается с исходного $p = 4.6$ atm до $p = 5$ atm. Наиболее примечательны в данных условиях следующие факты. Прежде всего, обращает на себя внимание то, что разброс срабатывания разрядника по времени (и соответственно по напряжению) возрастает. Применительно к условиям настоящих экспериментов разброс становится значительным, начиная с числа импульсов N примерно равном 1000, т.е. примерно после трех минут непрерывной работы разрядника. Это иллюстрируется осциллограммой на рис. 4, *b*. Хотя искровые каналы не привязываются к одному и тому же месту на электродах, но наблюдается преимущественное возникновение каналов в верхней части камеры. Газ в разряднике постепенно мутнеет и приобретает желтый цвет, что связано с наработкой двуокиси азота в камере.

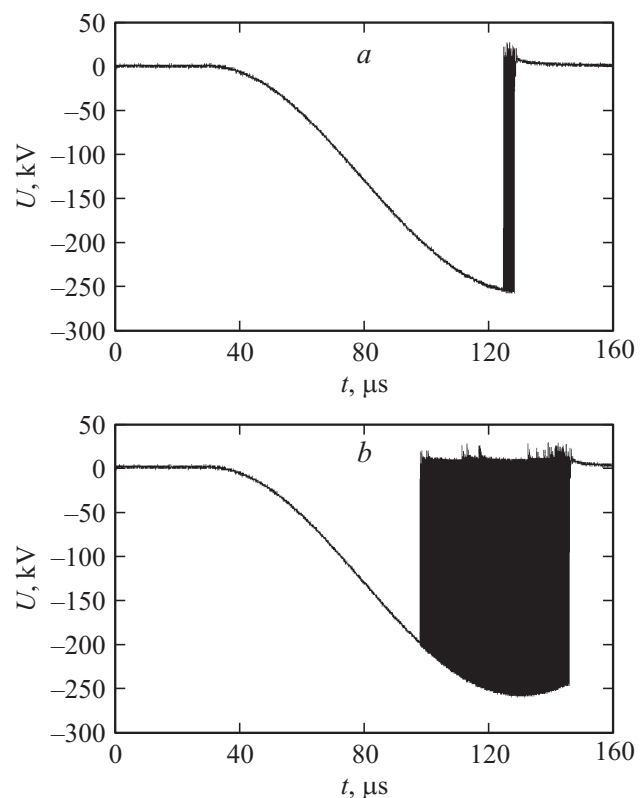


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на промежутке при одновременном наложении 65 импульсов, иллюстрирующие разброс срабатывания разрядника. *a* — серия после одной минуты работы разрядника в непрерывном режиме. *b* — серия после трех минут работы в непрерывном режиме. Продувка воздуха через разрядник не производится. $p = 4.6$ atm, $f = 5$ Hz.

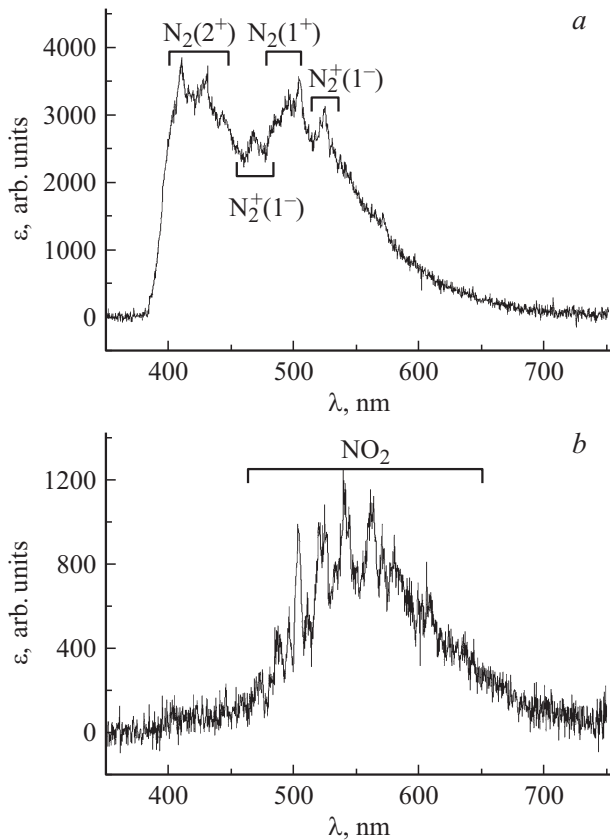


Рис. 5. Спектры излучения, зарегистрированные в разные моменты времени t после включения разрядника при частоте срабатывания $f = 5$ Hz. a — $t = 5$ s (полное число срабатываний $N = 25$ импульсов), b — 300 s, $N = 500$.

Наличие двуоксида азота и ее влияние на свойства разряда подтверждается спектральными измерениями. Соответствующие спектры представлены на рис. 5. Как и следовало ожидать, после напуска новой порции воздуха в разрядник в спектре наиболее интенсивно возбуждаются полосы первой $N_2(1^+)$ и второй $N_2(2^+)$ положительных систем молекул азота, а также первой отрицательной системы $N_2^+(1^-)$ молекулярного иона азота.

При увеличении числа срабатываний разрядника интенсивность излучения азота начинает постепенно уменьшаться. Наиболее сильное падение интенсивности происходит в области длин волн $\Delta\lambda = 400\text{--}480$ nm. Наряду с этим в спектре появляется полоса люминесценции молекулы NO_2 . Когда число срабатываний достигает значения $N \approx 1000$, излучение азота пропадает практически полностью и наблюдается только полоса NO_2 (рис. 5, b).

Появление в газе двуоксида азота позволяет объяснить резкое падение интенсивности излучения молекул азота и молекулярного иона азота, возникающее в процессе работы разрядника. Известно, что наряду с излучением, молекула NO_2 эффективно поглощает свет в областях $\Delta\lambda \leq 250$ и 300–600 nm. При этом максимум поглоще-

ния приходится на область $\Delta\lambda = 400\text{--}480$ nm. Проведенный анализ показывает, что поведение наблюдаемых интенсивностей согласуется с данными по коэффициентам поглощения газа.

Измерение концентрации окислов азота и кислорода в данных условиях производилось следующим образом. Мы задавали некоторый режим работы разрядника (например, $f = 5$ Hz, $U_{br} = 255$ kV, $p = 4.6$ atm) и производили определенное количество разрядов N . После этого медленно выпускали газ из объема камеры с помощью вентиля b и одновременно производили измерения химического состава газа. Когда давление в камере оказывалось равным атмосферному, производилась откачка остатков воздуха и промывка камеры. Затем камера наполнялась новой порцией воздуха и следующую точку по измерению химического состава получали при другом количестве импульсов. Пример кривых, показывающих зависимости концентраций NO и NO_2 от количества импульсов N , показан на рис. 6. Ясно, что при описанном методе измерений данные по содержанию окислов азота фактически приведены к атмосферному давлению.

Как отмечалось выше, разбросы пробивных напряжений проявляются, когда количество импульсов достигает $N \approx 1000$. Это соответствует следующему содержанию окислов азота в воздухе: $[NO] \approx 1.2$ g/m³ и $[NO_2] \approx 2.5$ g/m³. Легко понять, что содержание кислорода изменяется незначительно. Так, в исходной смеси измеренное значение концентрации кислорода составляет 20.9%, а при количестве импульсов $N = 1500$ оно уменьшается до 20.5%. Из кривых видно, что содержание NO возрастает примерно линейно при увеличении количества импульсов во всем диапазоне N . Поэтому

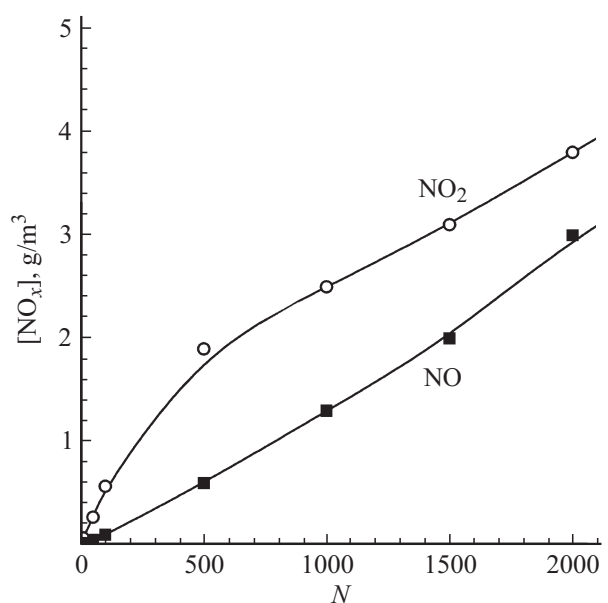


Рис. 6. Изменение концентрации NO и NO_2 в разряднике при увеличении количества импульсов. Продувка воздуха через разрядник не производится. $p = 4.6$ atm, $f = 5$ Hz.

при оценках и последующем обсуждении удобно привязываться именно к содержанию NO в камере.

Из угла наклона зависимости содержания NO в газе от количества импульсов можно определить скорость образования молекул NO. Для графика на рис. 6 эта скорость оказывается $\Psi = 1.43 \cdot 10^{14} \text{ 1/cm}^3 \cdot \text{s}$. С другой стороны, величина Ψ может быть записана в виде

$$\Psi = \frac{Wf}{\eta V_0 p}, \quad (1)$$

где W — энергия, выделяемая в газе от одиночной искры, f — частота следования импульсов, η — энергетическая цена образования одной молекулы NO, V_0 — объем камеры, p — давление газа в камере, т.е. произведение $V_0 p$ представляет собой объем газа в камере, соответствующий атмосферному давлению.

Тогда, используя экспериментальные данные и выражение (1), мы можем определить энергетическую цену образования молекулы NO в разряде. В условиях эксперимента в искре рассеивается примерно 15% энергии, запасенной в емкостном накопителе. Тогда энергетическая цена образования молекулы NO составляет $\eta \approx 290 \text{ eV}$. Отметим, что в работах [20–22] специально исследовалось образование окислов азота в различных видах разрядов. Оказалось, что для искрового разряда с энергией в импульсе около 5 J и частоте следования импульсов 2 Hz цена образования молекулы NO составляла около 600 eV [21,22]. В тлеющем разряде атмосферного давления эта цена была уменьшена до 35–50 eV.

Для стабильной работы разрядника в непрерывном режиме необходимо производить непрерывную продувку воздуха через разрядник. На основе представленных выше результатов можно сделать оценки потоков воздуха G , при которых содержание окислов азота остается достаточно малым и разрядник работает стабильно. Изменение содержания NO во времени описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \Psi - \frac{G}{V_0 p} [\text{NO}] = \Psi - G_0 [\text{NO}], \quad (2)$$

где G — поток воздуха на входе в разрядник и соответственно на выходе из разрядника.

Решение уравнения (2) имеет вид

$$[\text{NO}] = \frac{\Psi}{G_0} [1 - \exp(-G_0 t)]. \quad (3)$$

Из последнего соотношения и из (1) видно, что стационарная концентрация NO в разряднике определяется как

$$[\text{NO}]_{st} = \frac{\Psi}{G_0} = \frac{Wf}{\eta G}. \quad (4)$$

Это значит, что стационарная концентрация не зависит от объема разрядника V_0 и определяется потоком воздуха через разрядник G . Выбирая поток воздуха достаточно большим, мы можем иметь ситуацию, когда

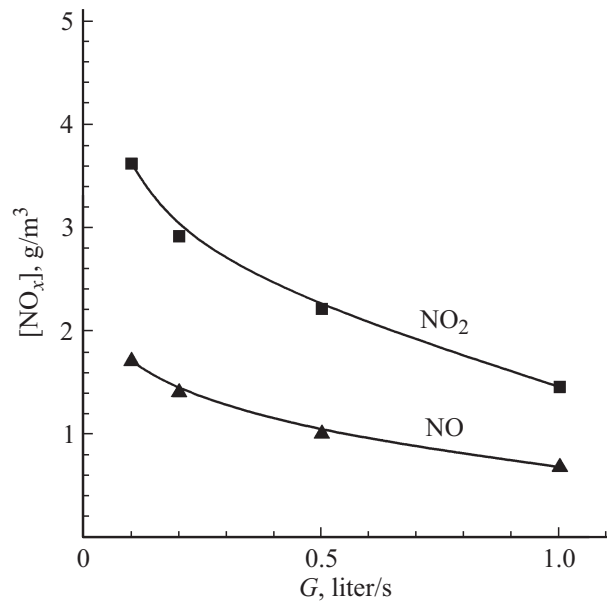


Рис. 7. Концентрация NO и NO₂ в разряднике в зависимости от потока воздуха через разрядник в режиме непрерывной работы. $p = 4.6 \text{ atm}$, $f = 5 \text{ Hz}$.

концентрации окислов азота в разряднике малы и практически не влияют на разброс срабатывания.

Легко видеть, что характерное время выхода концентрации NO на стационарное значение зависит как от скорости потока воздуха, так и от объема камеры

$$\tau = \frac{1}{G_0} = \frac{Wf}{\eta G}. \quad (5)$$

Ранее отмечалось, что разбросы в срабатывании разрядника начинают проявляться при содержании $[\text{NO}] \approx 1.2 \text{ g/m}^3$, т.е. при концентрации $[\text{NO}] \approx 2.4 \cdot 10^{16} \text{ 1/cm}^3$. Тогда легко оценить, что, например, при потоке воздуха $G = 0.5 \text{ liter/s}$ стационарная концентрация окиси азота составит $[\text{NO}]_{st} \approx 1.1 \cdot 10^{16} \text{ liter/cm}^3$, а характерное время выхода концентрации на стационарное значение будет $\tau \approx 74 \text{ s}$. В таком случае разрядник должен работать стабильно. В соответствии с оценками разброс в срабатывании должен начать проявляться при потоках воздуха от $G = 0.2 \text{ liter/s}$ и менее.

Режим непрерывной продувки газа через разрядник также исследовался в наших экспериментах. Пример результатов измерений содержания окислов азота представлен на рис. 7. Эксперимент производился следующим образом. Путем регулировки отверстия вентилей в системе напуска газа и вентиля б (рис. 2) в камере устанавливалось определенное рабочее давление и определенный поток газа через разрядник (например, $p = 4.6 \text{ atm}$, $G = 1 \text{ liter/s}$). Часть выходного потока отбиралась в систему анализа газа через вентиль 7. После этого разрядник включался в рабочий режим. Тогда со временем происходила наработка концентрации окислов азота в разряднике и выход этих концентраций на стационарные значения. Процесс нарастания концентрации

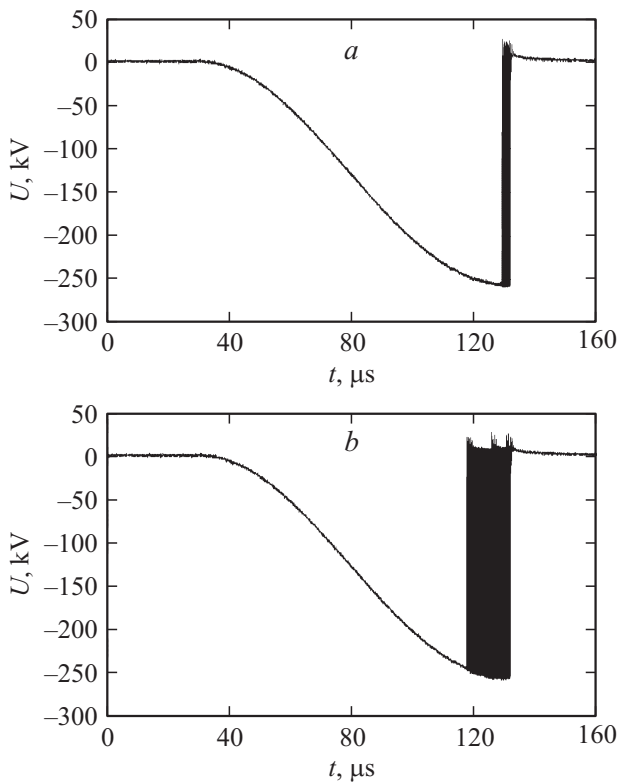


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на промежутке при одновременном наложении 65 импульсов, иллюстрирующие разброс срабатывания разрядника при различных потоках воздуха через разрядник в режиме непрерывной работы. *a* — $G = 1$ liter/s, *b* — $G = 0.2$ liter/s. $p = 4.6$ atm, $f = 5$ Hz.

регистрировался анализатором газа. В следующей серии производилась промывка камеры воздухом, и устанавливался другой поток воздуха через разрядник. Затем цикл измерений повторялся при другом потоке воздуха. Точки, показанные на рис. 7, соответствуют измеренным стационарным концентрациям окислов азота (по крайней мере, для условий $G = 1$ и 0.5 liter/s).

Как и следует из приведенных оценок, при уменьшении потока газа через разрядник концентрация NO в смеси возрастает, что приводит к ухудшению стабильности срабатывания разрядника. Это подтверждается осциллограммами напряжения, показанными на рис. 8. Представляется, что даже при $G \approx 0.2$ liter/s разброс срабатывания разрядника еще приемлемый. Дальнейшее снижение G ведет к увеличению разброса, и осциллограмма приобретает вид, сходный с показанной на рис. 4, *b*.

Заключение

В работе представлено описание стенда для исследования двухэлектродных разрядников высокого давления при напряжении до 300 кВ, частоте следования импульсов до 10 Hz и энергии в одиночном импульсе

до 450 J. Время импульсной зарядки высоковольтной накопительной емкости в стенде составляет около 100 μs. Исследован разрядник, в котором стабильность срабатывания по напряжению достигается за счет использования коронного разряда в предпробойной стадии.

Показано, что основной причиной нестабильного срабатывания является наработка окислов азота в разряднике. Предложены режимы непрерывной продувки воздуха, обеспечивающие стабильность срабатывания по напряжению не хуже 10%. Предложен метод оценки потока воздуха, при котором обеспечивается стабилизация работы разрядника в частотном режиме.

Работа поддержана Междисциплинарными интеграционными проектами СО РАН © ИМ-126 и ПР-107.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [2] *Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф.* Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.
- [3] *Harrower J.A., MacGregor S.J., Tuema F.A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. N 7. P. 790–797.
- [4] *Beveridge J.R., MacGregor S.J., Given M.J., Timoshkin I.V., Lehr J.M.* // IEEE Trans. Dielect. and Elect. Insulation. 2009. Vol. 16. N 4. P. 948–955.
- [5] *Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., Landl V.F., Alekseenko P.I.* // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 197–209.
- [6] *Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // Proc. of the IEEE. 2004. Vol. 92. N 7. P. 1166–1179.
- [7] *Andreev Y.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N.* // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 211–217.
- [8] *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // УФН. 2005. Т. 175. Вып. 3. С. 225–246.
- [9] *Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 52–61.
- [10] *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Sinebrykhov V.A.* // Journal of Instrumentation. 2013. Vol. 8. Article Number P09012.
- [11] *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak E.V., Zorin V.B., Kiselev V.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. N 10. Article Number 103506.
- [12] *Ковальчук Б.М., Королев Ю.Д., Кумпяк Е.В.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 8. С. 124–128.
- [13] *Апполонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н.* // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 135–145.
- [14] *Стушков Ю.К., Самусенко А.В., Субботский А.С., Ковалев А.Н.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 11. С. 21–28.
- [15] *Болтачев Г.Ш., Зубарев Н.М.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 11. С. 28–37.
- [16] *Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Geyman V.G., Shemyakin I.A., Enenko A.A., Matveev I.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. N 12. P. 2314–2320.

- [17] *Korolev Y.D., Frants O.B., Geyman V.G., Kasyanov V.S., Landl N.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40. N 11. P. 2951–2960.
- [18] *Akisev Y.S., Grushin M.E., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Pan'kin M.V., Trushkin N.I.* // Plasma Phys. Rep. 2000. Vol. 26. N 2. P. 157–163.
- [19] *Korolev Y.D., Mesyats G.A., Yarosh A.M.* // High Energy Chem. 1987. Vol. 21. N 5. P. 389–392.
- [20] *Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Suslov A.I.* // IEEE Trans. Plasma Sci., 2012. Vol. 40. N 11. P. 2837–2842.
- [21] *Namihira T., Tsukamoto S., Wang D.Y., Katsuki S., Hackam R., Okamoto K., Akiyama H.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28. N 1. P. 109–114.
- [22] *Sakai S., Matsuda M., Wang D., Namihira T., Akiyama H., Okamoto K., Toda K.* // Acta Physica Polonica. A. 2009. Vol. 115. N 6. P. 1104–1106.
- [23] *Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Geyman V.G., Karengin A.G., Pobereznikov A.D., Kim Y., Rosocha L.A., Matveev I.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. N 12. P. 3214–3222.
- [24] *Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Kasyanov V.S., Galanov S.I., Sidorova O.I., Kim Y., Rosocha L.A., Matveev I.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40. N 2. P. 535–542.