УДК 621.387.32

## ВРЕМЕНА СРАБАТЫВАНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 140 АТМОСФЕР

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru Д. С. Маханько, старший научный сотрудник НПК «Спарк» АО «Плазма», Рязань, Россия; orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

Определены характерные времена коммутации искровых разрядников-обострителей на диапазон напряжений пробоя  $100 \div 400$  кВ. Целью работы является получение количественной информации о временах коммутации разрядников-обострителей в ранее неизучавшемся диапазоне давлений рабочих газов от 20 до 140 атм в условиях статического пробоя. На основании наиболее разработанных теоретических моделей развития искрового разряда для давлений рабочих газов  $1 \div 10$  атм получена количественная информация о характерных значениях времён коммутации в диапазоне давлений от 20 до 140 атм. Установлена общая тенденция сокращения времён развития разряда пропорционально увеличению давления. Экспериментально измеренные времена коммутации разрядников-обострителей типа PO-48 (напряжение пробоя  $150 \pm 2$  кВ, давление водорода в разряднике  $55 \div 58$  атм, межэлектродный промежуток 0,3 см) имеют значения в пределах ~ 230...250 пс по уровню  $(0, 1 \div 0,9)$  напряжения пробоя.

**Ключевые слова:** разрядник-обостритель, времена развития искрового разряда, время коммутации, статический пробой в газе, давление рабочего газа, напряжение пробоя, межэлектродное расстояние.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245

### Введение

Неуправляемые искровые разрядники-обострители представляют собой двухэлектродные структуры и предназначены для формирования высоковольтных импульсов с амплитудами в сотни киловольт и длительностями переднего фронта в единицы наносекунд и менее. Такие импульсы широко применяются в технике формирования интенсивных потоков коротковолнового («жёсткого») рентгеновского излучения, в линейных ускорителях электронов, в устройствах радиоэлектронной борьбы, для накачки газовых лазеров сверхатмосферного давления, для генерации мощных потоков СВЧ–излучения.

Одним из важнейших параметров разрядников-обострителей, определяющих область их применения, является время коммутации.

На сегодняшний день времена коммутации (времена развития искровых разрядов) искровых разрядников достаточно подробно изучены в диапазоне давлений рабочих газов от 1 до 10 атм. При этом в качестве коммутирующей среды в большинстве случаев использовали атмосферный воздух. Теоретически и экспериментально найденные характерные времена развития искрового разряда при давлениях от 1 до 10 атм находятся на уровне десятков и единиц наносекунд. Здесь необходимо обратить внимание на следующий принципиальный момент: приведённые времена коммутации соответствуют условиям так называемого «импульсного» пробоя, т.е. пробоя с некоторым перенапряжением. В этих условиях времена коммутации имеют гораздо меньшие значения, чем в условиях статического пробоя. В связи с этим, определение характерных времён коммутации искровых разрядников-обострителей в диапазоне давлений рабочих газов 20 ÷ 140 атм в условиях статического пробоя представляет собой актуальную задачу.

### Развитие искрового разряда в газах при атмосферном и сверхатмосферном давлениях в условиях статического пробоя

Формирование разряда при подаче на промежуток импульсного напряжения начинается не сразу, а спустя некоторое характерное время – время статистического запаздывания. В течение этого времени в газоразрядном промежутке должен появиться хотя бы один «эффективный» электрон, который даст начало развитию электронной лавины. Кроме этого, на развитие разряда также требуется какое-то время. В итоге напряжение импульсного пробоя  $U_{umn}$  определяется соотношением [1-4]:

$$U_{umn} = U_{cmam} + \frac{dU}{dt} \cdot (\tau_{3an} + \tau_{pa36}), \tag{1}$$

где  $U_{cmam}$  – напряжение статического пробоя;  $\frac{dU}{dt}$  – скорость нарастания напряжения на промежутке;  $\tau_{san}$  – статистическое время запаздывания;  $\tau_{pase}$  – характерное время развития разряда.

В обычных условиях характерные времена статистического запаздывания могут достигать значений в несколько микросекунд. В условиях эксплуатации разрядниковобострителей средние значения напряжённости электрического поля достигают значений от  $10^5$  до  $8 \cdot 10^5$  В/см. С учётом усиления электрического поля на микронеоднородностях катода локальные значения электрического поля увеличиваются в  $10 \div 100$  раз [4]. Такие значения электрического поля обеспечивают автоэлектронную эмиссию и появление в промежутке свободных электронов и тем самым нивелируют значение статистического времени запаздывания  $\tau_{3an}$  до нуля.

Напряжения, подаваемые на разрядник-обостритель, имеют характерные времена нарастания 5 ÷ 10 мкс [5, 6]. Для амплитуд напряжения 200 ÷ 400 кВ это даёт значения скорости нарастания  $dU/dt = 5 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$  B/c. Для времён развития разряда в разрядникахобострителях  $\tau_{\text{разв}} \approx 10^{-9}$  с приращение достигает напряжения  $\frac{dU}{dt} \cdot \tau_{\text{разе}} \approx 50 \div 400$  B. Эти значения на уровне 200 ÷ 400 кВ не играют существенной роли. Поэтому напряжение импульсного пробоя  $U_{uMn}$  будет достаточно точно соответствовать статическому напряжению пробоя  $U_{cmam}$ . При более высоких скоростях подачи напряжения на газоразрядных промежуток напряжение импульсного пробоя может существенно превышать значение напряжения

Формирование искрового разряда в условиях статического пробоя может протекать в соответствии с двумя различными по сути механизмами [7-10]. Первый из них – относительно медленный – получил название «Таунсендовского». Второй механизм, получивший название «стримерного», имеет несколько другую природу [4, 8-12].

статического пробоя.

### Напряжения статического пробоя при сверхатмосферных давлениях

Напряжение статического пробоя по «Таунсендовскому» механизму определяют как [13-15]:

$$U_{np} \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln A \cdot p \cdot d - \ln \ln(1 + \frac{1}{\gamma})},$$
(2)

A и B – константы, определяемые родом газа и величиной напряжённости электрического поля; p – давление рабочего газа, торр; d – величина межэлектродного промежутка, см.

Коэффициенты A и B имеют размерность  $\frac{1}{cM \cdot mopp}$  и  $\frac{B}{cM \cdot mopp}$  соответственно. Их зна-

чения известны для приведённых напряжённостей электрического поля *E/p* в области 100 ÷

150 <u>В</u> и выше и соответствуют условиям «импульсного» пробоя. Для условий стати-

ческого пробоя величина E/p имеет значения  $10 \div 15 \frac{B}{c M \cdot mopp}$ . Для этих условий сведения о

значениях коэффициентов *A* и *B* в литературе отсутствуют. Их значения подбирались таким образом, чтобы расчётные значения напряжений пробоя соответствовали реальным значениям напряжений срабатывания разрядников-обострителей при известных давлениях рабочих газов.

Более корректным и менее противоречивым следует признать метод определения напряжения пробоя по «стримерному» механизму. В этом случае имеет место равенство напряжённости электрического поля в головке электронной лавины значению поля в межэлектродном промежутке (критерий стримерного пробоя). Такое условие реализуется в лавинах с «критическим» усилением. В этом случае напряжение пробоя  $U_{np}$  может определяться по величине напряжённости электрического поля из соотношения [4, 7-9]:

$$U_{np} = E_{\text{lock}} \cdot d_{a\kappa} = E_0 \cdot d_{a\kappa}, \tag{3}$$

 $E_0$  – средняя напряжённость электрического поля в межэлектродном промежутке, В/см;  $d_{a\kappa}$  – междуэлектродное расстояние, см.

Величина локальной напряжённости электрического поля  $E_{_{\it лок}}$  определяется как

$$E_{_{AOK}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_{_{\Sigma}}}{r_{_{AGS}}^2}, \qquad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная (8,85·10<sup>-12</sup> Ф/м);  $q_{\Sigma}$  – суммарный заряд электронов в головке лавины;  $r_{\pi a \theta}$  – радиус головки электронной лавины (в предположении её сферичности).

В свою очередь, радиус головки электронной лавины определяется следующим «диффузионным» соотношением [8, 9, 14]:

$$r_{_{ABB}} = \sqrt{4 \cdot D_e \cdot \tau_{_{\mathcal{J}P}}}, \qquad (5)$$

где  $D_e$  – коэффициент диффузии электронов в газе;  $\tau_{_{\it ДP}}$  – время дрейфа электронной лавины.

Численные значения коэффициента диффузии электронов в конкретном газе для какогото фиксированного давления (p = 1 торр или p = 1 атм) находились из справочной литературы или вычислялись исходя из известного соотношения [16-18]:

$$D_e = \frac{1}{3} \cdot \lambda_e \cdot \vartheta_x, \tag{6}$$

где  $\lambda_e$  – длина свободного пробега электронов в газе при заданном давлении;  $9_x$  – хаотическая скорость электронов в данном газе.

Расчёты напряжений пробоя по «Таунсендовскому» и по «стримерному» механизмам показали почти линейную зависимость от давления, а абсолютные значения напряжений пробоя имеют близкие значения. Так, для межэлектродного расстояния 0,3 см при давлении 20 атм значения напряжения пробоя, вычисленные по первому механизму, составляют  $\approx 40$  кВ для водорода и  $\approx 80$  кВ для азота. Для промежутка 0,6 см – соответственно 85 кВ для водорода и 160 кВ для азота. При увеличении давления до 140 атм в водороде напряжение пробоя промежутка 0,3 см составляет 240 кВ, промежутка 0,6 см – 450 кВ. Для азота при давлении 140 атм напряжение пробоя промежутка 0,3 см составляет 240 кВ, промежутка 0,6 см – 450 кВ. Для азота при давлении 140 атм напряжение пробоя промежутка 0,3 см составляет 240 кВ, помежутка 0,6 см – 450 кВ. Для азота при давлении 140 атм напряжение пробоя промежутка 0,3 см составляет 240 кВ, помежутка 0,450 кВ.

Вычисления напряжений пробоя по «стримерному» механизму дают значения, отличающиеся от значений, вычисленных по «Таунсендовскому» механизму, на ± 10 %.

### Расчёт значений времени коммутации в разрядниках-обострителях

Для искровых разрядников-обострителей время коммутации является одним из важнейших электрофизических параметров, определяющих их область применения. Изучению процессов, определяющих проводимость искрового канала и времён коммутации посвящено большое число исследовательских работ [4, 7-12]. Однако, все эти исследования проводились в условиях «импульсного» пробоя и ограничивались давлениями в области одной атмосферы Единичные упоминания относятся к давлению в 10 атм. Поведение времён коммутации в области давлений 20 ÷ 140 атм, характерных для современных разрядников-обострителей, до настоящего времени не изучено.

Одно из первых определений времени развития искрового разряда базируется на том, что за это время электронная лавина достигает «критического» усиления ( $N = 10^8$ ) и далее трансформируется в «скоростной» стример. Согласно этому определению, время развития разряда  $t_{pp}$  определяется из условия достижения и «критического» усиления и имеет вид [4, 7, 8, 14]:

$$t_{pp} = \frac{\ln 10^8}{\alpha \cdot 9_{\mu p}},\tag{7}$$

где  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации;  $\mathcal{G}_{AP}$  – скорость дрейфа электронов при заданном значении параметра (*E/p*).

Значения коэффициентов ударной ионизации определялись путём экстраполяции известных зависимостей ( $\alpha/p$ ) от (E/p) в область значений (E/p), характерных для статического пробоя.

Характерные для статического пробоя значениях  $E / p = 10 \div 15 \frac{B}{cM \cdot mopp}$  значения ( $\alpha/p$ ) в

водороде и в азоте находятся в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-1} \frac{1}{c_M \cdot mopp}$ , а скорости дрейфа для

 $E / p = 10 \div 15 \frac{B}{c_M \cdot mopp}$  для водорода и азота находятся в пределах (0,4 ÷ 0,5) · 10<sup>7</sup> см/с [8, 9,

13, 14, 17].

Малые времена развития разряда, согласно выражению (7), могут быть достигнуты только при наличии больших значений коэффициента ударной ионизации  $\alpha$  и скорости дрейфа электронов. Скорость дрейфа электронов не зависит от давления и полностью определяется приведённой напряжённостью электрического поля (*E/p*). Коэффициент ударной ионизации зависит от давления линейно [для фиксированного значения (*E/p*)] [7, 9, 14, 17, 20]. Таким образом, для существенного сокращения времени коммутации необходимо заметным образом увеличивать давление коммутирующей среды.

На рисунке 1 приведены расчётные зависимости времён развития искрового разряда в среде водорода от давления в пределах 20 ÷ 140 атм при варьировании значения параметра

 $(\alpha/p)$  в пределах от 10<sup>-4</sup> до 10<sup>-1</sup>  $\frac{1}{c_M \cdot mopp}$ . Значения параметра  $(\alpha/p)$  соответствуют условиям

статического пробоя.

Видно, что при малых значениях параметра ( $\alpha/p$ ) ( $10^{-4} \div 10^{-3}$ ) характерные времена развития разряда исчисляются единицами микросекунд и сотнями наносекунд (кривые  $1 \div 3$ ,  $p = 20 \div 60$  атм). По мере увеличения значения параметра ( $\alpha/p$ ) и давления – времена развития разряда уменьшаются до значений  $3 \div 1$  нс. При достижении давления в 140 атм – время развития разряда сокращается до 0,4 нс.

Анализ графических зависимостей показывает, что времена развития разряда связаны с давлением обратно пропорциональной зависимостью.

Рассмотренный метод не учитывает значения тока разряда в электрической цепи и влияние на величину времени развития электрофизических параметров разрядного контура.

На рисунке 2 приведены зависимости времён развития разряда с учётом величины тока в разрядном контуре в соответствии с формулой [10, 19]:

$$t_{pa36} = 9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\sqrt[3]{I_0 \cdot p}}{E_0}, \tag{8}$$

где p – давление газа, атм;  $E_0$  – напряжённость электрического поля, при которой происходит пробой, В/см;  $I_0 = U_0/R_H$  – ток в нагрузке  $R_H$ , соединённой последовательно с газоразрядным промежутком, при напряжении пробоя  $U_0$ .

Выражение (8), учитывающее ток в разрядном контуре, показывает, что при коммутации больших токов невозможно добиться минимальных значений времён коммутации.



Рисунок 1 – Расчётные зависимости времён развития искрового разряда при статическом пробое от давления водорода при различных значениях параметра (a/p)
 Figure 1 – Calculated dependences of spark discharge development times at static breakdown from hydrogen pressure at different parameter values (a/p)



Рисунок 2 – Зависимости времени развития разряда в водороде от давления, рассчитанные по формуле (8) для трёх значений тока разряда  $I_{\theta}$ Figure 2 – Dependences of discharge development time in hydrogen from the pressure calculated by formula (8) for three values of discharge current  $I_{\theta}$  Величина напряжённости электрического поля  $E_0$  определялась из соответствующих значений напряжений пробоя  $U_0$  и величины межэлектродного промежутка. Времена коммутации, как и ожидалось, увеличиваются с увеличением тока разряда. Однако обращает на себя внимание тот факт, что характерные времена коммутации находятся в пикосекундной области. Такие малые времена коммутации в указанном диапазоне токов и  $E_0$  практически недостижимы.

В [7, 10, 19] получено аналитическое выражение для времени коммутации с учётом спада напряжения на промежутке с уровня  $0.9U_0$  до уровня  $0.1U_0$ :

$$t_{pase} = 2 \cdot p \cdot d^2 \cdot \frac{1}{a \cdot U_0^2},\tag{9}$$

где p – давление газа, атм; d – межэлектродный промежуток, см; a – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность  $\frac{amM \cdot cM^2}{B^2 \cdot c}$ ;  $U_0$  – напряжение пробоя.

Коэффициент «*a*» определяется родом газа и известен только для трёх видов газа – воздуха, азота и аргона. Коэффициент «*a*» для этих газов имеет следующие значения:  $a_1 = 0.8$ ,  $a_2 = 0.6$  и  $a_3 = 27$  [5, 19]. Для расчётов времени развития разряда в водороде, в силу отсут-

ствия каких-либо сведений о его величине, постулировалось, что  $a_{H2} = \frac{amM \cdot cM^2}{B^2 \cdot c}$ 



Рисунок 3 – Зависимости времени коммутации в азоте (1) и в водороде (2) от давления Figure 3 – Dependences of switching time from pressure in nitrogen (1) and in hydrogen (2)

На рисунке 3 отражены расчётные зависимости времени развития разряда в азоте (кривая 1) и в водороде (кривая 2) от давления. Каждая кривая имеет одинаковые значения времён развития разряда как в промежутке  $d_{a\kappa} = 0.6$  см, так и в промежутке  $d_{a\kappa} = 0.3$  см.

Независимость от величины межэлектродного промежутка вытекает из самого выражения для времени развития (9). Напряжение на промежутке пропорционально величине самого промежутка. Поэтому частное от деления величины межэлектродного промежутка на значение напряжения является константой.

В [5] было учтено влияние индуктивности разрядного контура L и омического сопротивления R на время развития искрового разряда.

Эта закономерность отражается формулой:

$$t_{pase} = 21 \cdot \frac{p \cdot d^2}{a \cdot U_0^2} + 2, 2 \cdot \frac{L}{R},\tag{10}$$

где *L* – индуктивность разрядного контура; *R* – сопротивление нагрузки.

Параметры *p*, *d* и *a* имеют тот же самый смысл и численные значения, что и в выражении (9). Для типичных значений индуктивности в разрядном контуре L = 100 нГн для нагрузок в 100 – 10000 Ом второе слагаемое в выражении (10) имеет значение 1 – 0,1 нс. Значение первого слагаемого в этом выражении всегда будет превышать вклад второго слагаемого.

Типичные зависимости времени развития разряда в соответствии с выражением (10) приведены на рисунке 4 для водорода и азота.

На рисунке 5 отражены зависимости времён коммутации, рассчитанные с использованием исходных данных фундаментальных соотношений, полученных из экспериментальных данных для произведения [4, 8, 9, 19]:

$$p \cdot t_{pase} = F\left(\frac{E}{p}\right),\tag{11}$$

где p – давление, атм;  $F\left(\frac{E}{p}\right)$  – функция, определяемая экспериментальным путём для инди-

видуальных газов.

уальных газов. Функции  $F\left(\frac{E}{p}\right)$  в выражении (11) отражены графически в работах [4, 8, 9] для множе-

ства газов, за исключением водорода. Поэтому при расчётах использовались необходимые данные, которые также находились путём экстраполяции графиков в область значений (*E/p*), характерных для статического пробоя. В качестве газов были использованы воздух и аргон.





Figure 4 – Dependences of switching time from pressure for hydrogen (curve 1) and nitrogen (curve 2), calculated by ratio (10)



Рисунок 5 – Зависимости времени развития разряда от давления для аргона (кривая 1) и воздуха (кривая 2), полученные из графических зависимостей функции (11) Figure 5 – Dependences of switching time from pressure for argon (curve 1) and air (curve 2), calculated by ratio (11)

Для аргона (атомарный газ) время развития разряда находится в субнаносекундной области, тогда как в воздухе – в наносекундной области.

Приведённые в данной работе расчётные значения времён развития разряда различными методами в диапазоне давлений  $p = 20 \div 140$  атм отражают общую тенденцию к сокращению времени коммутации с увеличением давления. Это следует также и из анализа соотношений (7) – (11). В соответствии с выражением (7), время развития искрового разряда определяется в первую очередь коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$ , величина которого пропорциональна давлению, и скоростью дрейфа электронов  $\mathcal{G}_{дP}$ , величина которой от давления не

зависит. В других соотношениях величина давления в виде линейного множителя входит в значения напряжённости электрического поля и напряжения пробоя. В конечном итоге величина давления явно присутствует в выражениях (9) – (11) в знаменателе, обеспечивая тем самым обратную от давления зависимость времени развития разряда. Согласно выражению (9) время развития искрового разряда пропорционально давлению в степени  $p^{-1/3}$ .

Значительный разброс в величинах времени развития (доли мкс – единицы и десятки нс) может быть связан со следующими факторами: значения коэффициентов ударной ионизации находились путём экстраполяции в неисследованную область малых значений параметра (E/p), характерных для статического пробоя, и изменением вкладов основных элементарных процессов в значение времени развития разряда при увеличении давления почти на два порядка.

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: рабочие напряжения, при которых эксплуатируются разрядники-обострители, находятся в пределах  $80 \div 400$  кВ. В междуэлектродных промежутках d, равных 0,3 и 0,6 см, создаются напряжённости электрического поля на уровне  $E_0 = 6,67 \cdot 10^5$  В/см. С учётом усиления электрического поля на микронеоднородностях рабочих поверхностей катодов значения локальных напряжённостей могут быть в  $10 \div 100$  раз выше, т.е. находиться на уровне  $E_{no\kappa} = 6,67 \cdot 10^6 \div 6,7 \cdot 10^7$  В/см. Такие значения напряжённости электрического поля в состоянии вызывать заметные фотоэлектронные токи. Этот факт является очень важным с точки зрения создания большого числа первичных электронов, при котором реализуется режим так называемого «многоэлектронного инициирования». В этих условиях характерные времена развития разряда уменьшаются в разы [7, 10, 19]. Таким образом, при переходе к высоким давлениям ( $p > 50 \div 60$  атм) и очень высоким напряжениям 100 ÷ 400 кВ напряжённости электрических полей автоматически обеспечат дополнительное сокращение времени коммутации разрядников-обострителей из-за появления в газоразрядном промежутке свободных электронов.

# Экспериментальное определение времён коммутации в разрядниках-обострителях сверхатмосферного давления

Измерения времён коммутации искровых разрядников-обострителей были проведены на базе Лаборатории электронных ускорителей Института электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) старшим научным сотрудником, к. т. н., Шунайловым С.А.

Измерение времени коммутации производилось в разрядниках-обострителях типа PO-48, интегрированных в измерительный комплекс на основе промышленного генератора «Радан Эксперт» [21]. Данные разрядники имели межэлектродное расстояние 0,3 см, в качестве рабочего газа в разрядниках использовался водород при давлениях 55 ÷ 58 атм, обеспечивающий напряжения пробоя разрядников на уровне  $150 \pm 2$  кВ. Наружный диаметр корпуса разрядника равнялся 40 мм.

На рисунке 6 представлены внешний вид генератора с измерительной линией и упрощённая электрическая схема генератора.

Выход импульсного генератора сопряжён с 45-омной коаксиальной линией с встроенным емкостным делителем напряжения. Переходная характеристика делителя находится в пределах ~ 80 пс. Сигнал с делителя поступал на осциллограф с полосой 6 ГГц (переходная характеристика ~ 60 пс). Таким образом, измерительный тракт позволял корректно оценивать вре-

менные процессы более 100 пс. Электрическая длина линии до резистивной нагрузки – 1 нс, определяет верхнюю границу диапазона корректных временных измерений (без отражений фронта высоковольтного импульса от нагрузки).



a (a)





# Figure 6 – External view of generator with measuring line (a) and a simplified electrical scheme of generator with spark gap–sharpener (b)

На рисунке 7, *а* представлены три характерные осциллограммы выходного напряжения генератора для 3-х разрядников-обострителей РО-48. Времена коммутации этих приборов можно считать идентичными ~ 230...250 пс. Сигналы получены в одинаковых условиях (генератор / делитель / тракт). Время нарастания напряжения на зазоре разрядников составляло порядка 1 мкс. В режиме «холостого хода» (режим отсутствия пробоя разрядника) трансформатор заряжает формирующую линию до 180 ÷ 190 кВ (зависит от напряжения пробоя неуправляемого разрядника РК).

Методика измерений для всех трех разрядников-обострителей была идентичной. После установки разрядника-обострителя (сборки генератора) и заполнения системы трансформаторным маслом выполнялась тренировка разрядника в течение тысячи импульсов.

На рисунке 7, *б* показан режим накопления 10 выходных импульсов генератора. Имеет место высокая стабильность срабатывания разрядников-обострителей РО-48. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя  $\delta$ Uпб, определённый по ГОСТ 21107.7-75, не превышает 2 %.



Рисунок 7 – Осциллограммы выходного напряжения генератора: a – для трех разрядников PO-48, б – режим накопления 10 импульсов Figure 7 – Oscillograms of generator output voltage: a – for three spark gaps-sharpeners RO-48, b – 10 pulse accumulation mode

#### Заключение

1. Впервые расчётным путём определены зависимости времён развития искрового разряда в условиях статического пробоя по основным соотношениям (7–11) в диапазоне давлений 20 ÷ 140 атм, характерных для промышленно выпускаемых разрядников-обострителей, наполняемых водородом или азотом. Установлена общая тенденция сокращения времени развития искрового разряда с увеличением давления.

2. Положенные в основу моделей развития искрового канала различные физические процессы и соотношения между ними в диапазоне давлений 20 ÷ 140 атм дают значительный разброс в абсолютных значениях времён развития разряда (от долей мкс до единиц и десятков пс).

3. Экспериментально измеренные значения времён развития искрового разряда в разрядниках-обострителях типа PO-48 с рабочими давлениями водорода 55 ÷ 58 атм и величиной межэлектродного промежутка 0,3 см, обеспечивающих напряжение пробоя разрядника  $150 \pm 2$  кВ, находятся в пределах ~ 230...250 пс по уровню (0,1 ÷ 0,9) напряжения пробоя. Эти значения существенно меньше тех, которые приводятся производителями разрядниковобострителей на напряжение пробоя 150 кВ. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя  $\delta U_{n6}$  разрядников-обострителей типа PO-48 при работе на частоте до 15 Гц, определённый по ГОСТ 21107.7-75, не превышает 2 %.

### Библиографический список

1. Актон Д. Р., Свифт Д. Д. Газоразрядные лампы с холодным катодом. М.: Энергия, 1965. 480 с.

2. Окресс Е.К., Винсент И., Цзян Та-Гуань. Незавершённые электрические разряды в газах // ТИИЭР. 1967. № 12. С. 113-114.

3. Месяц Г. А., Бычков Ю. И., Кремнев В. В. Импульсный наносекундный электрический разряд в газе // УФН. 1972. Т.107. Вып.2. С. 201-228.

4. Meek J. M., Craggs J. D. Electrical Breakdown of Gases. NY, Brisbane, Toronto: John Wiley. 1975. 869 pages.

5. Киселев Ю. В., Черепанов В. П. Искровые разрядники. М.: Сов. радио, 1976. 72 с.

6. Kozlov B. A., Makhanko D. S. Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less than 10 nanoseconds // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2064(1). 012126.

7. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука. 1991. 224 с.

8. Мик Д., Крэгс Д. Электрический пробой в газах / пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 605 с.

9. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах / пер. с англ. М.: Мир, 1968.

10. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.

11. Doran A. A., Meyer J. Photographic and oscillographic investigations of spark discharges in hydrogen // Brit. J. Appl. Phys. 1967. Vol. 18, pp. 793-799.

12. Meyer J. The development of the discharge plasma in a hydrogen spark at small pd values // Brit. J. Appl. Phys. 1969. vol. 20. № 2. pp. 221-227.

13. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Том І. Общие вопросы электродинамики газов. М.;Л. Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1952. 432 с.

14. Лозанский Э. Д., Фирсов О. Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 272 с.

15. Соболев В. Д. Физические основы электронной техники. М.: Высшая школа, 1979. 448 с.

16. Хаксли П., Кромитон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977.

17. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект. 2009. 734 с.

18. Григорьев И. С., Михайлов Е. З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

19. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.

20. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.

21. Shpak V. G., Shunailov S. A., Oulmascoulov M. R., Yalandin M. I. Subnanosecond Front, High Voltage Generator based on a Combined Pulsed Forming Line // Proc.of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, ML, USA. 1997. vol. 2. pp. 1581-1585.

UDC 621.387.32

## SWITCHING TIMES OF SPARK GAPS-SHARPENERS AT PRESSURE UP TO 140 ATMOSPHERE

**B. A. Kozlov,** Dr. Sc. (Phys. and Math.), full professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru **D. S. Makhanko**, senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

Characteristic switching times of spark gaps-sharpeners for the breakdown voltage range of  $100 \div 400$  kV are determined. **The aim of this work is** to obtain quantitative information about the switching times of spark gaps-sharpeners in the previously unstudied pressure range from 20 to 140 atmospheres under static breakdown conditions. Based on the most developed theoretical models for the development of a spark discharge for pressures of  $1 \div 10$  atmospheres, quantitative information was obtained on the characteristic values of switching times in pressure range from 20 to 140 atmospheres. General tendency for the reduction of discharge development time proportionally to pressure increase has been established. Experimentally measured switching times of spark gaps-sharpeners of RO-48 type (breakdown voltage  $150 \pm 2$  kV, hydrogen pressure in spark gap-sharpener  $55 \div 58$  atm, interelectrode gap 0.3 cm) have values within ~ 230 ... 250 picoseconds at the level  $(0.1 \div 0.9)$  of breakdown voltage.

*Key words:* spark gap, spark gap-sharpener, spark discharge development time, switching time, static breakdown in gas, gas pressure, breakdown voltage, interelectrode distance.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245

### References

1. Akton D. R., Svift D. D. *Gazorazrjadnye lampy s holodnym katodom* (Gas discharge lamps with cold cathode), Moscow: Jenergija. 1965, 480 p. (in Russian).

2. Okress E. K., Vinsent I., Czjan Ta-Guan. Nezavershjonnye jelektricheskie razrjady v gazah. *TII-JeR*. 1967, no.12, pp. 113-114. (in Russian).

3. **Mesjac G. A., Bychkov Ju. I., Kremnev V. V.** Impul'snyj nanosekundnyj jelektricheskij razrjad v gaze. *UFN*, 1972, vol.107, no.2, pp. 201-228. (in Russian).

4. Meek J. M., Craggs J. D. *Electrical Breakdown of Gases*. NY, Brisbane, Toronto: John Wiley, 1975, 869 p.

5. **Kiselev Ju. V., Cherepanov V. P.** *Iskrovye razrjadniki* (Spark arresters). Moscow: Sovetskoe radio. 1976, 72 p. (in Russian).

6. Kozlov B. A., Makhanko D. S. Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less than 10 nanoseconds. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 2064(1), 012126.

7. Korolev Ju. D., Mesjac G. A. *Fizika impul'snogo proboja gazov* (Physics of pulsed breakdown of gases). Moscow: Nauka. 1991, 224 p. (in Russian).

8. Mik D., Krjegs D. *Jelektricheskij proboj v gazah* (Electrical breakdown in gases). Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literature. 1960, 605 p. (in Russian).

9. Reter G. Jelektronnye laviny i proboj v gazah (Electronic avalanches and breakdown in gases). Moscow: Mir. 1968. (in Russian).

10. **Mesjac G. A.** *Impul'snaja jenergetika i jelektronika* (Pulse energy and electronics). Moscow: Nauka, 2004. 704 p. (in Russian).

11. Doran A. A., Meyer J. Photographic and oscillographic investigations of spark discharges in hydrogen. *Brit. J. Appl. Phys.* 1967, vol. 18, pp. 793-799.

12. Meyer J. The development of the discharge plasma in a hydrogen spark at small pd values. *Brit. J. Appl. Phys.* 1969, vol. 20, no. 2, pp. 221-227.

13. **Granovskij V. L.** Jelektricheskij tok v gaze. Tom I. Obshhie voprosy jelektrodinamiki gazov (Electric current in gas. Volume I. General questions of electrodynamics of gases). Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoj literatury. 1952, 432 p. (in Russian). 14. Lozanskij Je. D., Firsov O. B. *Teorija iskry* (Theory of spark). Moscow: Atomizdat. 1975, 272 p. (in Russian).

15. Sobolev V. D. Fizicheskie osnovy jelektronnoj tehniki (Physical foundations of electronic technology). Moscow: Vysshaja shkola. 1979, 448 p. (in Russian).

16. **Haksli P., Kromiton R.** *Diffuzija i drejf jelektronov v gazah* (Diffusion and electron drift in gases). Moscow: Mir. 1977. (in Russian).

17. **Rajzer Ju. P.** *Fizika gazovogo razrjada* (Physics of gas discharge). Dolgoprudnyj: Intellekt, 2009. 734 p. (in Russian).

18. Grigor'ev I. S., Mihajlov E. Z. *Fizicheskie velichiny*. *Spravochnik* (Physical quantities. Directory). Moscow: Jenergoatomizdat. 1991, 1232 p. (in Russian).

19. Mesjac G. A. Generirovanie moshhnyh nanosekundnyh impul'sov. (Generation of powerful nanosecond pulses), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 256 p. (in Russian).

20. Granovskij V. L. Jelektricheskij tok v gaze. Ustanovivshijsja tok. (Electric current in gas. Steadystate current). Moscow: Nauka. 1971, 544 p. (in Russian).

21. Shpak V. G., Shunailov S. A., Oulmascoulov M. R., Yalandin M. I. Subnanosecond Front, High Voltage Generator based on a Combined Pulsed Forming Line. *Proc.of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore*. ML, USA, 1997, vol. 2, pp. 1581-1585.