

Общероссийский математический портал

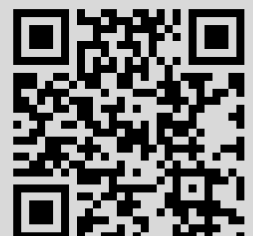
Д. Ф. Алферов, В. А. Сидоров, Развитие сильноточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе, *ТВТ*, 2001, том 39, выпуск 6, 865–872

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

24 марта 2025 г., 05:24:02



УДК 621.387.35

## РАЗВИТИЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ В СТЕРЖНЕВОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ

© 2001 г. Д. Ф. Алферов, В. А. Сидоров

Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина, Москва

Поступила в редакцию 02.03.2001 г.

Развитие импульсного сильноточного электрического разряда в стержневой электродной системе при изменении амплитуды тока от 10 до 100 кА исследовано на разборном макете вакуумной камеры при одновременной регистрации электрических характеристик разряда, свечения разрядной плазмы и пятен на электродах. Обнаружено явление быстрого перехода разряда от узла поджига в межстержневые промежутки при достижении мгновенного значения тока 5–9 кА. Установлена корреляция между моментом появления резкого спада напряжения на вакуумной дуге и моментом образования нового разрядного канала в межстержневом промежутке. Показано, что с ростом тока наблюдались различные моды вакуумной дуги в межстержневом зазоре и размножение разрядных каналов по всем межстержневым зазорам. Исследовано влияние скорости нарастания тока на процесс развития вакуумной дуги.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для коммутации энергоемких емкостных накопителей энергии все более широкое применение находят управляемые вакуумные разрядники (РВУ) отпаянной конструкции типа РВУ-43 [1, 2] с электродной системой в виде пространственно чередующихся по окружности стержней противоположной полярности. Включение РВУ осуществляется с помощью блока запуска, который создает поджигающий разряд в узле поджига. Этот разряд инициирует загорание сильноточной вакуумной дуги между основными электродами. РВУ такого типа обладают наибольшей коммутационной способностью (по току и заряду), сравнительно малым падением напряжения на дуге и возможностью работы в широком диапазоне токов  $I = 1\text{--}200$  кА и напряжений  $U = 1\text{--}30$  кВ. Ведутся разработки по повышению предельных параметров таких РВУ до 500 кА [3].

Одной из важнейших характеристик РВУ является срок службы, который в значительной степени зависит от времени горения вакуумной дуги вблизи узла поджига. Кроме того, в процессе развития разряда стержневые электроды подвергаются мощному воздействию сильноточной дуги, что также влияет на срок службы РВУ.

Проведенные исследования изменения напряжения на разряднике в течение импульса тока показали, что при достижении током  $I$  значения  $\sim 5\text{--}9$  кА наблюдается резкий ступенчатообразный спад напряжения, сопровождаемый заметным увеличением скорости нарастания тока  $dl/dt$ , а затем при дальнейшем увеличении тока появляются высокочастотные осцилляции напряжения, длительность которых уменьшается с ростом  $dl/dt$  [4].

При многократной коммутации токов более 100 кА имеет место заметная эрозия стержневых электродов [5], что свидетельствует о возможности развития контрагированной моды разряда в межстержневых зазорах.

В данной работе проведены исследования динамики свечения плазмы сильноточного импульсного разряда и пятен на электродах в макете стержневой электродной системы. Результаты позволяют качественно объяснить отмеченные выше особенности поведения напряжения в сильноточных РВУ. Предварительные данные исследований представлены в [6].

**Условия эксперимента и методика измерений.** Объектом исследований является шестизазорная стержневая электродная система, которая размещалась в разборном макете вакуумной камеры  $I$  со стеклянными окнами (рис. 1). Электродная система состоит из трех катодных и трех анодных стержней, расположенных по окружности радиусом 28 мм. На рис. 2 показан катодный узел стержневой электродной системы, в центре основания которого расположен узел поджига. Анодный узел, имеющий такой же вид, но без узла поджига, располагается стержнями вниз соосно над катодным узлом таким образом, чтобы основная часть длины стержней ( $\sim 50$  мм) была между катодными стержнями. Поперечное сечение каждого стержневого электрода имеет форму, близкую к трапецеидальной. Ранее было показано [4], что такая форма электродов обеспечивает наименьшие энергетические потери при коммутации больших токов в сильноточном РВУ. Электроды были выполнены из меди вакуумной плавки. Расстояние между соседними стержневыми электро-

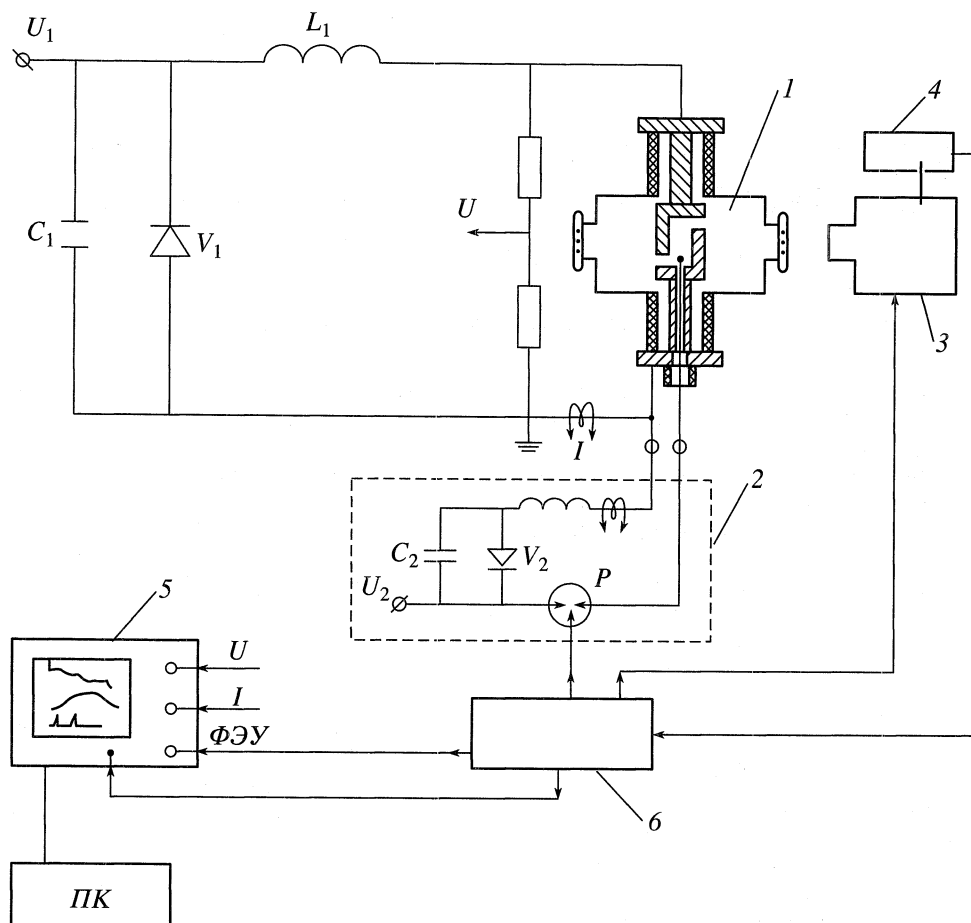


Рис. 1. Электрическая схема сильноточного стенда: 1 – разборный макет вакуумной камеры, 2 – блок запуска, 3 – СФР, 4 – ФЭУ, 5 – осциллограф, 6 – пульт управления.

дами  $d \approx 8$  мм. Электродная система ориентировалась в камере таким образом, чтобы один из межстержневых зазоров (видимый зазор) находился напротив стеклянного окна.

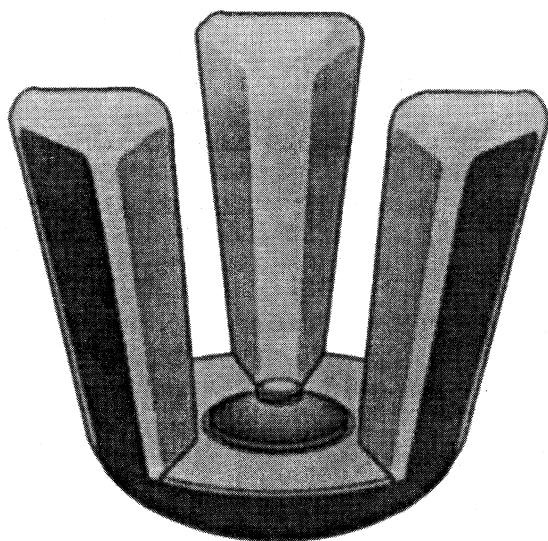


Рис. 2. Катодный узел стержневой электродной системы.

Исследования проводились на сильноточном импульсном стенде, который содержал батарею конденсаторов  $C_1$  суммарной емкостью до 12400 мкФ (рис. 1). Батарея имела восемь практически равных параллельных секций с независимым кабельным подводом к нагрузке, что позволило уменьшить индуктивность разрядного контура до  $L_1 \sim 2$  мкГн. В некоторых циклах измерений секции шунтировались диодными блоками  $V_1$  для формирования униполярного импульса тока. Максимальное напряжение на конденсаторной батарее составляло  $U_1 = 3$  кВ. Инициация разряда осуществлялась с помощью блока запуска 2, принципиальная электрическая схема которого аналогична схеме основного разрядного контура ( $C_2 = 0.1-0.5$  мкФ,  $U_2 = 5$  кВ). Блок запуска срабатывал в результате включения разрядника  $P$  и формировал иницирующий импульс тока до 2 кА, длительностью  $\approx 10$  мкс.

После заряда  $C_1$  до заданного напряжения  $U_1$  на узел поджига подавался иницирующий импульс и между стержневыми электродами загоралась электрическая дуга, которая закорачивала конденсаторную батарею на индуктивную нагрузку  $L_1$ . Параметры импульса тока регулировались

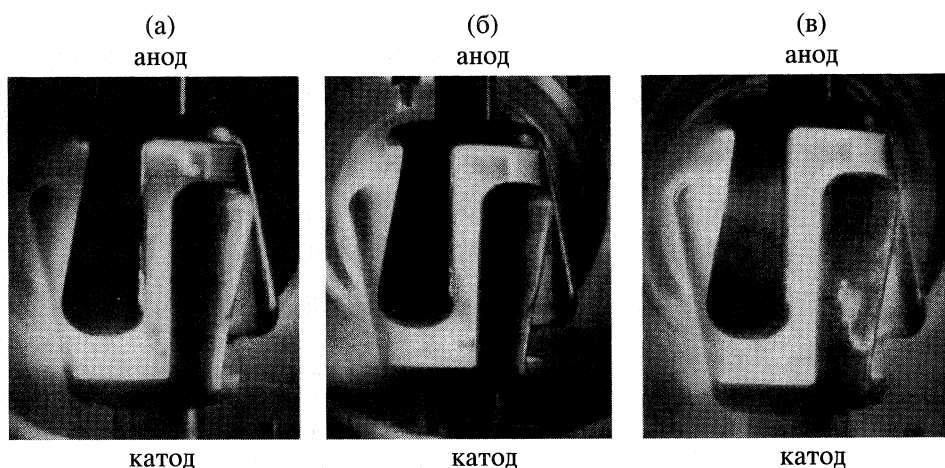


Рис. 3. Фотографии свечения плазмы вакуумной дуги: а –  $I_m = 5$ , б – 15, в – 27 кА.

путем изменения зарядного напряжения  $U_1$ , емкости  $C_1$  и индуктивности  $L_1$ .

Перед началом исследований камера вместе с электродной системой прогревалась при  $T \sim 300^\circ\text{C}$  не менее 8 ч. В процессе исследований давление в камере поддерживалось на уровне  $\leq 10^{-3}$  Па.

Динамика свечения разрядной плазмы в исследуемой электродной системе наблюдалась с помощью высокоскоростного фоторегистратора (СФР) в режиме покадровой регистрации. Длительность экспозиции каждого кадра составляла от 8 до 16 мкс. СФР – 3 дополнительно оснащен фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) – 4, который вырабатывал сигнал в момент попадания свечения на 9-й кадр СФР-граммы. Измерение токов основного  $I_1$  и иницирующего  $I_2$  разрядов проводилось с помощью поясов Роговского, а напряжение на электродной системе измерялось с помощью омического делителя. Регистрация электрических сигналов осуществлялась одновременно с записью СФР-грамм при помощи цифровых осциллографов С9-8 – 5 с последующей обработкой на персональном компьютере (ПК). Обработка осциллограмм напряжения проводилась с учетом индуктивной составляющей падения напряжения на вакуумной камере ( $U_L = L_K dI/dt$ ,  $L_K \approx 3 \times 10^{-7}$  Гн).

Управление работой стенда осуществлялось с помощью пульта б, который вырабатывал сигналы на открытие затвора СФР, запуск разрядника  $P$  блока запуска и на запуск осциллографа. Пульт был оснащен блоком регулируемых задержек, который позволял сдвигать во времени момент запуска разрядника  $P$  и осциллографа относительно сигнала с ФЭУ.

**Эксперимент.** На рис. 3 представлены фотографии свечения разрядной плазмы, полученные при экспозиции в течение всего импульса тока, который имел униполярную форму с длительностью фронта  $\sim 140$  мкс и спадом  $\sim 1$  мс ( $C_1 = 6$  мФ и

диодные блоки подсоединены). Вверху расположен анодный, а внизу катодный узел электродной системы. Отметим, что при малых амплитудах тока  $I_m \approx 5$  кА (рис. 3а) основная часть свечения сосредоточена вблизи основания катода (в основном между узлом поджига в центре катода и торцом анодного стержня). С увеличением амплитуды тока до величины  $I_m \approx 15$  кА значительная часть свечения наблюдается уже в видимом межстержневом зазоре (рис. 3б). При  $I_m \approx 27$  кА свечение заполняет практически весь видимый межстержневой зазор (рис. 3в). При этом свечение вблизи узла поджига становится малозаметным.

Более детально проследить динамику свечения плазмы в стержневой электродной системе позволяют СФР-граммы, полученные при различных максимальных скоростях нарастания разрядного тока  $dI/dt \sim U_1/L_1 \sim 10^7\text{--}10^9$  А/с. Основная часть измерений проводилась в колебательном режиме разрядного тока (без диодных блоков).

В начальный момент времени (начало протекания иницирующего импульса тока) вблизи узла поджига появляется светящееся пятно (катодное пятно – КП). На следующих кадрах видно, как из этого пятна образуется светящееся облако, которое распространяется в направлении торца анодного стержня. В результате образуется светящийся канал между узлом поджига и торцом анодного стержня. При сравнительно малых токах  $I_m < 8$  кА разряд горит только в этом канале в течение всего импульса тока. В этом случае с ростом тока при  $I > 6$  кА число КП вблизи узла поджига увеличивается и появляются заметные всплески напряжения. При малых значениях  $dI/dt < 10^8$  А/с (такие режимы были получены при увеличении индуктивности  $L_1$ ) после образования КП на СФР-граммах наблюдается диффузное свечение в видимом межстержневом зазоре, которое распространяется в направлении основания анода.

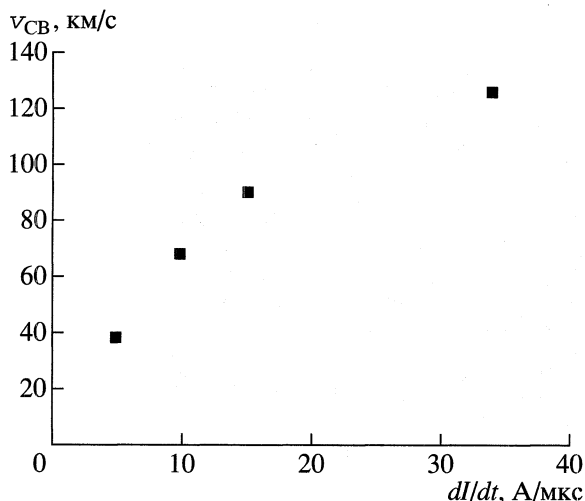


Рис. 4. Зависимость скорости распространения фронта диффузного свечения  $v_{св}$  от скорости нарастания тока  $dl/dt$ .

Скорость распространения фронта этого свечения  $v_{св} \sim 10^5$  см/с при  $dl/dt \sim 2 \times 10^7$  А/с и увеличивается с ростом  $dl/dt$  (см. рис. 4). В режимах с более короткими импульсами тока при  $L_1 \sim 2$  мкГн, отличающихся более высокими начальными значениями  $dl/dt$ , диффузное свечение плазмы становится менее заметным из-за недостаточной чувствительности фотопленки при необходимом временном разрешении СФР-грамм.

При  $I_m > 8$  кА ( $dl/dt > 10^8$  А/с) первоначальный разрядный канал стягивается на торец анодного стержня и наблюдается образование нового КП на катодном стержне в межстержневом зазоре на расстоянии  $h \sim 20$ –30 мм от основания катода. Из этого КП образуется светящийся канал, который закорачивает межстержневой зазор. Момент образования такого канала совпадает с первым ступенчатобразным спадом напряжения на рис. 5 при токе  $I_k = 7$ –8 кА. В этом режиме разряд в межстержневом зазоре горит из одного КП и практически не перемещается вплоть до окончания импульса тока. Первый разрядный канал из узла поджига постепенно затухает при уменьшении тока. Отметим, что напряжение, при котором образуется новое КП, практически не зависит от  $dl/dt$  и составляет 150–200 В. В некоторых опытах образование нового КП происходило в одном из соседних (невидимых) межстержневых зазоров, что проявлялось в виде заметных отблесков свечения из этого зазора. В этом случае в видимом межстержневом зазоре не наблюдалось образования никаких разрядных каналов в течение импульса тока.

На рис. 6 представлена зависимость тока  $I_k$ , при котором разряд переходил в межстержневой зазор, от максимальной скорости нарастания тока. Характерно, что во всех исследуемых режимах

вплоть до  $dl/dt \sim 10^9$  А/с образование первого разрядного канала в межстержневом зазоре практически не зависело от скорости нарастания тока, а определялось только мгновенным значением тока в диапазоне 5–9 кА.

При увеличении скорости нарастания тока до значений  $dl/dt \geq 5 \times 10^8$  А/с новые КП возникают сразу в нескольких межстержневых зазорах практически одновременно в пределах временного разрешения СФР-грамм  $\sim 8$  мкс. Типичные для этих режимов осциллограммы представлены на рис. 7. Новые КП горят, как правило, неустойчиво, погасая и возникая вновь, что сопровождается заметным нерегулярным шумом напряжения. Затем с ростом тока происходит размножение КП в видимом зазоре (а, возможно, и в соседних). Как следует из анализа СФР-грамм, по мере нарастания тока эти пятна быстро (в течение 15–25 мкс) выстраиваются в ряд на рабочей поверхности катодного стержня вдоль его оси. Иногда КП переходят и на торцы катодных стержней, что приводит к появлению значительных ( $\sim 400$  В) всплесков напряжения. Заметим, что в этом режиме свечение вблизи узла поджига, как правило, быстро погасает после образования новых КП на катодных стержнях и разряд полностью переходит в межстержневые зазоры.

В сильноточном режиме в течение длительности фронта тока свечение по высоте зазора обычно сильно неоднородно и часто наблюдается образование яркой светящейся области вблизи поверхности анодного стержня, которая, по мнению авторов, соответствует процессу образования анодного пятна (АП). Образование АП проявляется на осциллограммах в виде появления более интенсивных и высокочастотных осцилляций напряжения (см. рис. 7), которые затухают при уменьшении тока, когда светящиеся области из АП и из КП перекрываются.

Как и следовало ожидать, шунтирование  $C_1$  диодными блоками практически не влияет на характерные особенности развития разряда на фронте тока. Однако, в отличие от рассмотренных выше режимов, в случае униполярного импульса тока наблюдается более однородное свечение в межстержневом зазоре на спаде тока, характерное для диффузной моды горения вакуумной дуги.

Образование АП и появление характерного шума напряжения имеют место в диапазоне токов  $I_m = 30$ –100 кА ( $dl/dt > 3.5 \times 10^8$  А/с). Шум напряжения, как правило, затухает в течение длительности фронта тока. В некоторых опытах при  $dl/dt > 6 \times 10^8$  А/с после образования первого АП наблюдается появление нового АП на другом участке межстержневого зазора или в соседнем зазоре. Отметим, что после образования АП на противоположной аноду поверхности катодного стержня происходит значительное усиление яр-

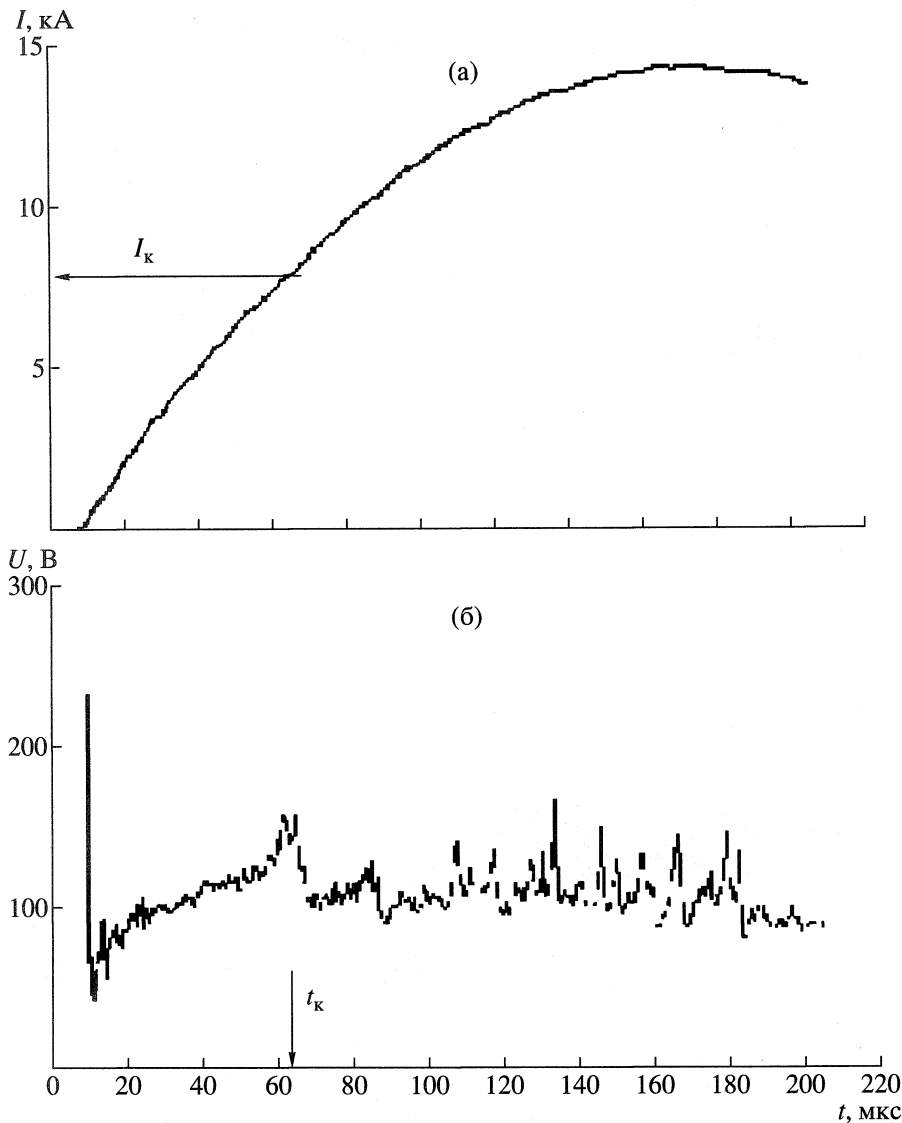


Рис. 5. Осциллограммы тока  $I$  (а) и напряжения  $U$  (б) при  $U_1 = 0.5$  кВ,  $C_1 = 6000$  мкФ:  $I_k$  – ток, при котором появляется первое КП в межстержневом зазоре;  $t_k$  – время его появления.

кости и увеличение размеров светящейся области. Иногда появляются яркие выбросы свечения наружу из невидимых межстержневых зазоров, что сопровождается заметным ростом напряжения. Измерения при различных значениях емкости  $C_1$  вплоть до 12.4 мФ показали, что поведение свечения разряда в межстержневом промежутке определяется в основном максимальной скоростью нарастания тока. На рис. 8 представлена зависимость от  $dl/dt$  тока  $I_A$ , при котором образуется первое АП. Здесь объединенные точки показывают появление двух АП в течение одного импульса тока. Видно, что при  $dl/dt > 6 \times 10^8$  А/с ( $I_m > 50$  кА) появление АП наблюдается в диапазоне мгновенных значений тока  $I_A = 25-50$  кА и имеет статистический характер.

Аналогичные исследования были проведены в режиме поджига на аноде ( $U_1 < 0$ ). Надежная ини-

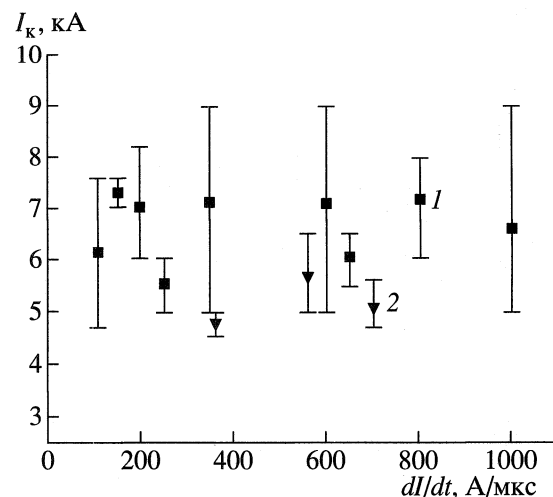


Рис. 6. Зависимость тока  $I_k$ , при котором разряд переходит в межстержневой зазор, от скорости нарастания тока  $dl/dt$ : 1 – поджиг на катоде, 2 – поджиг на аноде.

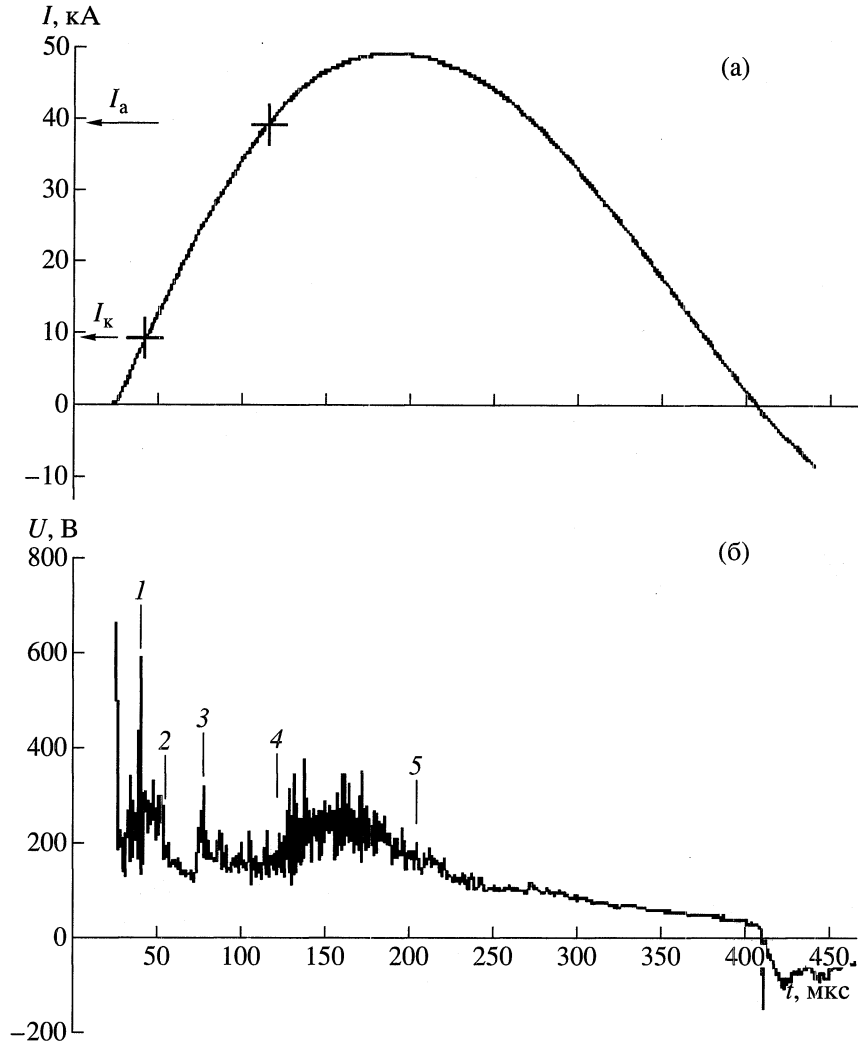


Рис. 7. Осциллограммы тока  $I$  (а) и напряжения  $U$  (б) при  $U_1 = 1.5$  кВ,  $C_1 = 6000$  мкФ:  $I_k$  – ток, при котором появляется первое КП в межстержневом зазоре;  $I_a$  – ток, при котором появляется АП в межстержневом зазоре; 1 – появление первого КП в межстержневом зазоре; 2 – появление второго КП; 3 – размножение КП вдоль поверхности катодного стержня в направлении основания анода; 4 – появление АП; 5 – перекрытие светящихся областей из КП и АП.

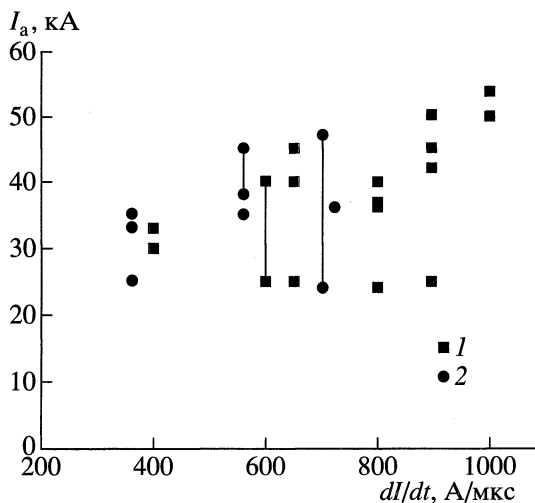


Рис. 8. Зависимость тока  $I_a$ , при котором образуется первое анодное пятно, от скорости нарастания тока  $dl/dt$ : 1 – поджиг на катоде, 2 – поджиг на аноде.

циация разряда в данном режиме происходила при амплитуде тока поджига  $I_n > K U_1^{-0.5}$ , где  $K \approx 8 \times 10^4 AB^{0.5}$ . В этом случае первое КП образуется на торце катодного стержня напротив узла поджига. Затем при достижении током значений 5–6 кА разрядный канал полностью переходит от узла поджига в межстержневой зазор. Такой переход всегда сопровождается ступенчатообразным уменьшением напряжения. Диапазон токов, в котором наблюдается образование КП в межстержневом зазоре в режиме поджига, на аноде меньше, чем в режиме поджига на катоде (рис. 6). В дальнейшем поведение разряда в межстержневых зазорах практически такое же, как и в режиме поджига на катоде.

**Обсуждение результатов.** Полученные результаты наглядно подтверждают предложенный авторами в [4] качественный сценарий развития иници-

ируемого сильноточного импульсного вакуумного разряда в стержневых электродных системах.

На начальном этапе развития разряда после подачи инициирующего импульса вблизи узла поджига образуется КП, которое генерирует направленный поток плазмы. Этот поток распространяется во всем объеме электродной системы и закорачивает вакуумный промежуток по кратчайшему расстоянию между основанием катода и торцом одного из анодных стержней. В результате между основанием катодного узла и торцевой поверхностью анодного стержня образуется токовый канал, что приводит к резкому уменьшению напряжения. В условиях проведенных экспериментов длина токового канала составляла  $\sim 15$  мм.

Основная часть тока на этой стадии развития разряда протекает по анодному стержню, катодные стержни в переносе тока практически не участвуют, так как в межстержневых зазорах нет КП. При этом часть направленного потока катодной плазмы распространяется и в межстержневом зазоре вдоль поверхностей анодного и катодного стержней в направлении основания анода. Возбужденные атомы и ионы этого потока генерируют наблюдаемое диффузное свечение. Можно предположить, что течение потока катодной плазмы с начальной скоростью  $\sim 10^6$  см/с происходит в квазистационарных и пространственно неоднородных, скрещенных электрическом и магнитном полях, причем магнитное поле формируется током в анодном стержне. В результате взаимодействия тока  $j_{\perp}$ , протекающего поперек межстержневого зазора, с поперечной составляющей магнитного поля  $B_{\perp}$  средняя скорость течения плазменного потока в условиях данных экспериментов должна уменьшаться пропорционально  $(j_{\perp} \times B_{\perp})$  и длительности времени взаимодействия. При этом концентрация ионов на фронте плазменного потока будет возрастать, а соответственно увеличится и плотность ионного тока на боковую поверхность катодного стержня [4]. С увеличением скорости нарастания тока такое торможение плазменного потока должно уменьшаться. Все эти явления наблюдались в опытах при измерении скорости распространения фронта диффузного свечения.

В дальнейшем с ростом тока на СФР-граммах наблюдается контрагирование разрядного канала на торец одного из анодных стержней, что приводит к увеличению напряжения на разрядной камере. Вследствие стягивания канала магнитным полем, возбуждаемым собственным током разряда, развивается неустойчивость, характерная для длинных вакуумных промежутков при высоких значениях  $dl/dt > 10^8$  А/с [7]. Развитие такой неустойчивости сопровождается заметным увеличением напряжения и появлением спонтанного КП в межстержневом зазоре. Образование КП в прикатодном слое между плазмой и поверхностью

катодного стержня происходит, когда напряженность электрического поля на катоде  $E_k$  превышает некоторое пробивное значение, которое зависит от материала катода и состояния его поверхности. Величина  $E_k$  увеличивается с ростом плотности ионного тока  $j_{\perp}$  и напряжения на прикатодном слое  $U_k$  как  $E_k^2 \sim fI\sqrt{U}$ , где  $f$  – доля ионного тока [8]. С ростом тока  $I$  напряженность  $E_k$  возрастает до пробивного значения и на боковой поверхности катодного стержня образуется спонтанное КП.

Из результатов исследований следует, что переход разряда от узла поджига в межстержневые промежутки определяется только током разряда  $I = 5-9$  кА для выбранной геометрии электродной системы и материала электродов и не зависит от скорости его нарастания. С учетом того, что напряжение перед пробоем межстержневого зазора составляет  $U \approx 150-200$  В, условие образования КП в межстержневом зазоре можно описать соотношением  $I\sqrt{U} > 10^5 AB^{0.5}$ . Отметим, что данное условие согласуется с условием инициации разряда в режиме поджига на аноде в результате образования КП под плазмой поджигающего разряда на торцевой поверхности катодного стержня [5]. Таким образом, рассмотренный механизм перехода разряда в межстержневой зазор стержневой электродной системы качественно согласуется с результатами выполненных экспериментов. Для количественных оценок требуется проведение более детальных измерений и теоретический анализ динамики направленного потока плазмы между стержневыми электродами в поперечном магнитном поле.

Образование нового разрядного канала в межстержневом промежутке приводит к резкому уменьшению напряжения и погасанию первоначального разрядного канала. Результаты измерений свидетельствуют о четкой временной корреляции между этими процессами.

Последующее развитие разряда в значительной степени определяется величиной и формой магнитного поля в межстержневых промежутках, формируемого собственным током разряда. Магнитное поле в каждом промежутке имеет продольную и поперечную составляющие относительно направления тока дуги [9]. Соотношение между этими составляющими зависит от распределения токов по стержневым электродам.

Обнаружено, что с ростом тока КП в межстержневом промежутке размножаются и выстраиваются в линию, которая параллельна оси стержня. Такая динамика КП может быть обусловлена ретроградным движением пятен в поперечном магнитном поле [10]. Продольная составляющая магнитного поля становится существенной, когда ток начинает протекать по всем стержневым электро-



дам. По-видимому, при увеличении тока именно влиянием продольной составляющей магнитного поля можно объяснить увеличение однородности заполнения пятнами рабочей поверхности катодных стержней.

На сильноточной стадии развития разряда при мгновенных значениях тока  $I_A \geq 25$  кА наблюдается образование АП, горение которых сопровождается характерным шумом напряжения и существенным расширением светящейся области на катодном стержне напротив АП. Такие пятна последовательно погасают и возникают вновь в различных межстержневых зазорах. Наблюдаемое развитие этих процессов похоже на аналогичные явления в сильноточной вакуумной дуге на дисковых электродах [11, 12]. Следует отметить, что в наших экспериментах наблюдались более высокие значения минимального тока  $I_A$ , чем в [11], при сравнимых длительностях импульса тока, а длительность неустойчивой фазы горения разряда в отличие от [12] заметно сокращалась с ростом  $dl/dt$  и амплитуды тока. По мнению авторов, отмеченное свойство сильноточного разряда в стержневых электродных системах может быть обусловлено влиянием продольной составляющей магнитного поля и быстрым размножением разрядных каналов по всем межстержневым промежуткам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований инициации и развития импульсного сильноточного вакуумного разряда в стержневой электродной системе обнаружено явление быстрого перехода разряда от узла поджига в межстержневые промежутки. Это явление наблюдалось в фиксированном диапазоне токов основного разряда  $\sim 5-9$  кА и практически не зависело от скорости нарастания тока при  $dl/dt \approx 10^7-10^9$  А/с. В процессе измерений установлена четкая корреляция между моментом появления резкого спада напряжения на вакуумной дуге и моментом образования нового разрядного канала в межстержневом промежутке.

С ростом тока после перехода разряда в межстержневой промежуток наблюдалось размножение катодных пятен вдоль линии, параллельной оси электродной системы, размножение разрядных каналов в соседние межстержневые промежутки и циклическое образование и погасание анодных пятен, которое приводило к расширению занятой катодными пятнами области на поверхности катодного стержня напротив анодного пятна. Все эти процессы сопровождались характерными изменениями напряжения на дуге, что позволяло предсказывать поведение вакуумной дуги по характеру изменения напряжения. Сокращение длительности неустойчивой фазы развития разряда, наблюдаемое при высокой скорости

нарастания тока, обусловлено быстрым размножением разрядных каналов по всем межстержневым промежуткам. Этот эффект обеспечивает хорошую коммутационную способность РВУ со стержневой электродной системой в сильноточном режиме, что, в принципе, позволяет повысить коммутируемые токи в такой системе до 500 кА.

Наблюдаемые особенности поведения сильноточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе в значительной степени обусловлены влиянием магнитного поля, формируемого протекающим по стержневым электродам током.

Авторы выражают благодарность И.А. Лукацкой, Я.И. Лондеру и К.Н. Ульянову за полезные обсуждения результатов настоящей работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A.* High Current Vacuum Switching Devices for Power Energy Storages // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. № 1. P. 323.
2. *Sidorov V.A., Alferov D.F., Korobova N.I.* Influence of Switching Regimes on Dielectric Strength of High Current Triggered Vacuum Switches // 12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. June 1999. P. 1254.
3. *Warren T., Dickens J., Neuber A. et al.* Development of Improved Triggered Vacuum Switches // 12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. June 1999. P. 1264.
4. *Alferov D.F., Korobova N.I., Sidorov V.A.* The Burning Voltage of High-Current Vacuum Arc in a Six-Gap Rod Electrode System // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. № 4. P. 586.
5. *Алферов Д.Ф., Сидоров В.А.* Модернизированный вакуумный управляемый разрядник с шестизазорной стержневой электродной системой // ПТЭ. 1996. № 3. С. 80.
6. *Alferov D.F., Sidorov V.A.* High-Current Vacuum Arc Evolution in a Six-Gap Rod Electrode System // Proc. 19th ISDEIV. Xi'an. China. 2000. P. 515.
7. *Алферов Д.Ф., Коробова Н.И., Сибиряк И.О.* Развитие сильноточного импульсного разряда в вакууме // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 3. С. 399.
8. *Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А., Сибиряк И.О.* Образование новых катодных пятен в вакуумном разряднике // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 4. С. 202.
9. *Алферов Д.Ф., Лукацкая И.А., Селикатова С.М., Сидоров В.А.* Распределение магнитного поля в стержневой электродной системе вакуумных разрядников. Тез. докл. X конф. по физике газового разряда. Рязань. 2000. С. 64.
10. *Drouet M.G.* The Physics of the Retrograde Motion of the Electric Arc // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13. № 5. P. 235.
11. *Miller H.C.* Discharge Modes at the Anode of Vacuum Arc // IEEE Trans. Plasma Sci. 1983. V. 11. № 3. P. 122.
12. *Zalucki Z., Janiszewski J.* Transition from Constricted to Diffuse Vacuum Arc Modes during High AC Current Interruption // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. № 4. P. 991.