

УДК 553;621

## **ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ВАКУУМНОГО УПРАВЛЯЕМОГО РАЗРЯДНИКА С ШЕСТИАЗОРНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ**

*Д. Ф. Алферов, Н. И. Коробова, В. А. Сидоров*

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

*Для коммутации мощных импульсных высоковольтных источников энергии с токами до сотен килоампер длительностью несколько миллисекунд все большее применение находит высокоточный управляемый вакуумный разрядник с шестизазорной стержневой электродной системой, которая обеспечивает наиболее оптимальное использование объема вакуумной камеры. В настоящей работе исследованы вольт-амперные характеристики такой электродной системы в зависимости от формы и материала электродов и величины межэлектродного зазора. Исследования выполнены*

при амплитуде тока разряда до 200 кА при скорости его нарастания до  $\sim 5 \cdot 10^9$  А/с. Отмечен ряд особенностей в динамике напряжения горения разряда в зависимости от величины и скорости нарастания тока разряда, а именно скачкообразное изменение напряжения в начальной фазе горения разряда и возбуждение высокочастотных осцилляций напряжения на фронте разрядного тока. Длительность и интенсивность неустойчивой фазы горения разряда, сопровождаемой высокочастотными осцилляциями напряжения, сильно зависят от параметров электродной системы разрядника. Рассчитаны динамика рассеиваемой в разряднике мощности и полная диссипируемая энергия в зависимости от амплитуды коммутируемого тока. По результатам исследований разработана конструкция разрядника с минимальными энергетическими потерями и большим сроком службы, оцениваемым по величине переносимого заряда  $> 10^6$  Кл.

Для коммутации мощных импульсных высоковольтных источников энергии с токами до сотен килоампер длительностью несколько миллисекунд все большее применение находит сильноточный вакуумный управляемый разрядник (РВУ) с многозачерной стержневой электродной системой. Такая система состоит из набора пространственно-чередующихся стержневых электродов переменной полярности с фиксированным зазором между стержнями [1, 2]. Одним из важных свойств стержневой электродной системы является низкое падение напряжения на дуге и более равномерный износ электродов по сравнению с дисковой системой электродов.

Характер развития сильноточного дугового разряда существенно зависит от формы стержневых электродов, величины межстержневого зазора и материала электродов. Информацию об особенностях развития разряда дает зависимость падения напряжения на разрядом промежутке от величины тока. В работе [1] исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) разрядника с цилиндрическими стержнями при коммутации синусоидального тока с частотой 60 Гц и амплитудой до 60 кА. При коммутации импульсных токов с амплитудой до 100 кА длительностью несколько миллисекунд хорошо зарекомендовал себя разрядник с трапецидальной формой стержневых электродов РВУ-40 [2, 3].

В настоящей работе измерены ВАХ шестизачерной стержневой системы в зависимости от формы и материала электродов и величины межстержневого зазора. Исследовано поведение напряжения на разряднике при протекании через него примерно треугольного импульса тока длительностью  $\sim 700$  мс с длительностью фронта  $\sim 90$  мс при изменении амплитуды тока от 10 до 200 кА. Максимальная скорость нарастания тока составляла  $\sim 5 \cdot 10^9$  А/с.

## АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Объектом исследований является управляемый вакуумный разрядник отпаянной конструкции типа РВУ-40 с шестизачерной стержневой электродной системой. Схематичный вид исследуемого разрядника представлен на рис. 1. Электродная система разрядника состоит из трех катодных и трех анодных стержней, расположенных на окружности радиусом 28 мм [2]. Узел поджига расположен в центре основания катода. Было исследовано шесть вариантов исполнения электродной системы

Исследования проводились на импульсном стенде, состоящем из накопительной батареи конденсаторов, емкостью 6000 мкФ, шунтированной диодным блоком для формирования униполярного импульса тока. Максимальное напряжение на конденсаторной батарее составляет  $U_0 = 3,5$  кВ. Для запуска разрядника использовалась такая же принципиальная электрическая схема с конденсатором емкостью 0,5 мкФ. Разряд этого конденсатора осуществлялся через управляемый газовый разрядник РУ-69. При напряжении на конденсаторе  $U_n = 4,3$  кВ амплитуда тока поджига составила  $I_n \sim 2$  кА, длительность тока поджига  $\sim 10$  мкс.

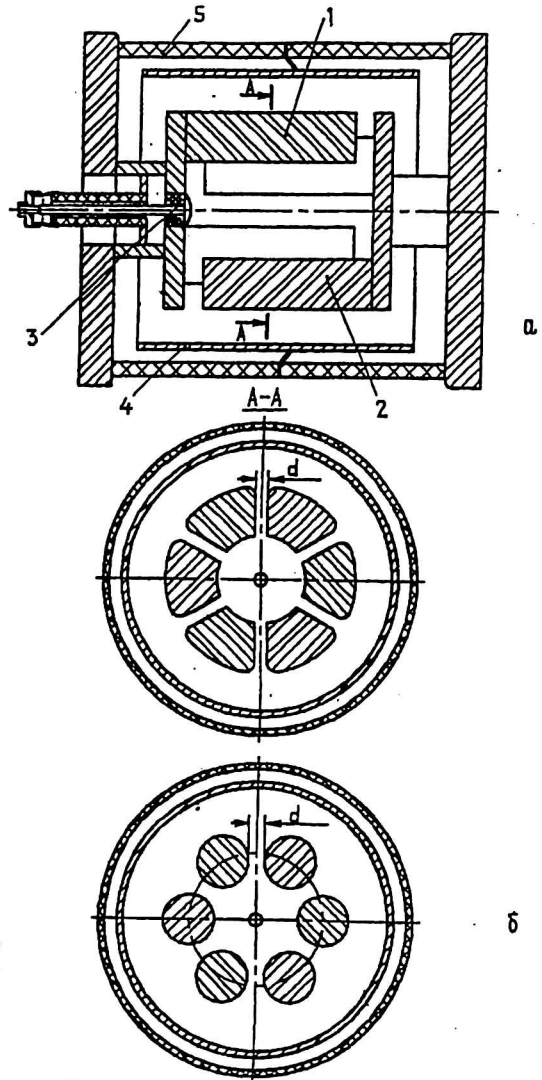


Рис. 1. Схематичный вид управляемого вакуумного разрядника с трапециевидными (а) и цилиндрическими (б) стержневыми электродами: 1 — катодный стержень; 2 — анодный стержень; 3 — узел поджига; 4 — экран; 5 — керамический корпус

Токи основного  $I$  и инициирующего разряда  $I_p$  измерялись поясами Роговского, а напряжение на разрядном промежутке  $U$  измерялось омическим делителем. При измерении ВАХ напряжение измерялось только при  $dI/dt = 0$ . Это позволило не учитывать влияние индуктивной составляющей падения напряжения  $L_p dI/dt$  на разряднике. При анализе формы импульса напряжения  $U(t)$  производилось вычитание индуктивной составляющей из зарегистрированного импульса напряжения, положив  $L_p = 7 \cdot 10^{-8}$  Гн.

Регистрация электрических сигналов производилась цифровым осциллографом С9-8 с последующей записью и обработкой на компьютере.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились при амплитуде тока  $I_m = 10-200$  кА ( $U_0 \sim 0,2-3$  кВ). При этом особое внимание уделялось изучению динамики тока и напряжения в течение фронта разрядного тока.

Особенности развития начальной стадии разряда наиболее заметны при сравнительно малых амплитудах тока  $I_m \sim 10$  кА. На рис. 2, а, б представлены типичные осциллограммы напряжения и тока в этом режиме для Си электродов трапециевидной формы (разрядник № 3 из табл. 1).

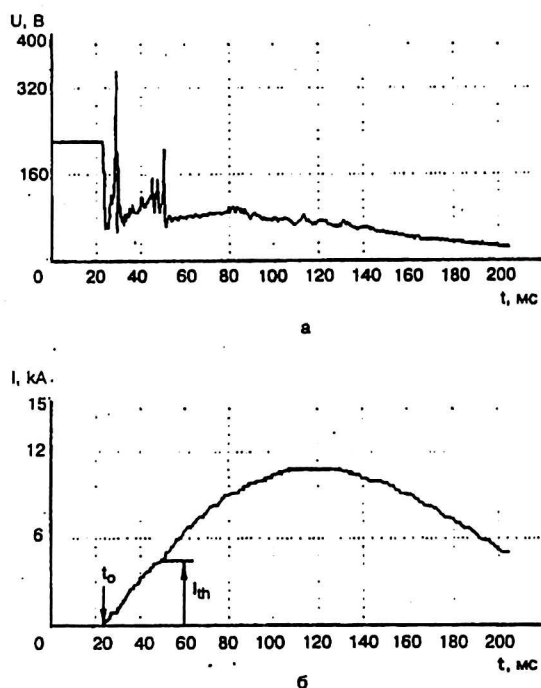


Рис. 2. Типичные осциллограммы напряжения (а) и тока (б) в разряднике с медными трапециевидными стержневыми электродами с  $d = 8$  мм при  $U_0 = 0,2$  кВ

Видно, что после включения разрядника напряжение сначала резко падает за  $\sim 1-2$  мкс от начала тока поджига  $t_0$ , а затем начинает возрастать с ростом тока. Причем увеличение напряжения сопровождается высокочастотными осцилляциями, амплитуда которых сравнима с  $U_0$ . После достижения током значения  $I_{th} \sim 4-6$  кА, как правило, имеет место резкий спад напряжения в виде ступеньки. В этот момент наблюдается перегиб на фронте тока — скорость его нарастания заметно увеличивается. Вслед за первой иногда наблюдается вторая ступенька с меньшей глубиной модуляции. В дальнейшем с ростом тока разряд горит спокойно, а напряжение плавно падает.

Похожие особенности изменения напряжения наблюдались во всех исследуемых разрядниках. Пороговый ток  $I_{th}$ , при котором имеет место первая ступенька напряжения, зависит от варианта электродной системы. Усредненное по пяти пускам значение этого тока представлено в табл. 1. Ток  $I_{th}$  практически не зависит от  $I_m$  в пределах точности наших измерений.

Таблица 1

## Варианты исполнения электродной системы

РВУ номер	Материал электродов	Форма стержня	Межстержневой зазор $d$ , мм	Активная площадь поверхности стержней $S_a$ , мм <sup>2</sup>	Пороговый ток $I_{th}$ , кА
1	FeCu	Трапециевидная	8	2880	6,5
2	CrCu	"	8	2880	5,8
3	Cu	"	8	2880	3,6
4	Cu	Цилиндрическая	8	1440	4,3
5	Cu	Трапециевидная	12	3000	4,7
6	Cu	"	12	2160	3,9

При малых токах  $I_m \leq 10$  кА возможно также развитие разряда, когда шум напряжения продолжается вплоть до погасания разряда. При этом амплитуда тока для тех же значений  $U_0$  заметно меньше, чем в случае ступенчато-образного спада напряжения.

При более высоких амплитудах тока  $I_m \geq 20$  кА, кроме рассмотренной выше неустойчивой фазы, с ростом тока возбуждается еще одна неустойчивая фаза, сопровождаемая значительным высокочастотным шумом напряжения (рис. 3). Похожее явление наблюдалось также и в плоскопараллельных дисковых электродных системах [4—6]. В таких системах при превышении некоторого порогового значения тока появляется высокочастотный шум напряжения, который продолжается на участке роста тока и прекращается только тогда, когда ток начинает спадать. Интенсивность шума напряжения возрастает с увеличением межэлектродного расстояния.

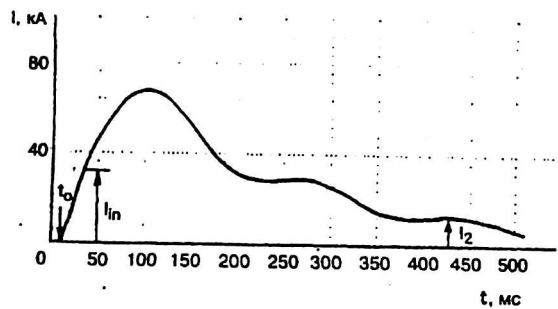
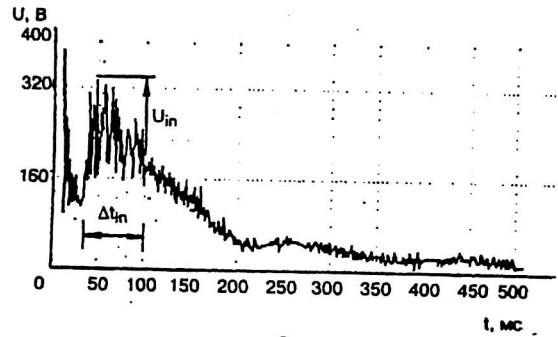


Рис. 3. Типичные осциллограммы напряжения (а) и тока (б) в разряднике с медными трапециевидными стержневыми электродами с  $d = 8$  мм при  $U_0 = 1$  кВ

В нашем случае амплитуда шума напряжения, как правило, максимальна в начале неустойчивой фазы. В дальнейшем, по мере развития разряда, шум постепенно затухает. После окончания неустойчивой фазы разряд горит спокойно и падение напряжения на разрядном промежутке уменьшается вплоть до окончания импульса тока. Ток  $I_{in}$  при котором начинается возбуждение второй неустойчивой фазы, ее длительность  $\Delta t_{in}$  и максимальная амплитуда шума напряжения  $U_{in}$  зависят от варианта электродной системы и амплитуды тока. В табл. 2 представлены данные измерений этих параметров неустойчивой фазы, усредненные по пяти пускам для четырех значений  $U_0$ .

Таблица 2

Характеристики неустойчивой фазы и энергетические потери

$U_0$ , кВ	$I_m$ , кА	Ток возбуждения $I_{in}$ , кА					Длительность $\Delta t_{in}$ , мкс					Максимальный шум напряжения $U_{in}$ , В					Рассеиваемая энергия $\epsilon$ , кДж				
		2*	3*	4*	5*	6*	2*	3*	4*	5*	6*	2*	3*	4*	5*	6*	2*	3*	4*	5*	6*
0,6	35—40	33	32	36	30	32	60	74	76	93	100	150	180	300	270	290	0,59	0,62	0,76	0,60	0,73
1	65—70	40	35	37	41	40	45	90	116	120	140	180	340	350	370	1,24	1,64	1,66	1,52	1,87	
2	130—150	58	46	48	41	43	25	29	100	140	140	200	460	570	460	2,83	4,61	5,98	5,05	5,7	
3	180—220	72	58	52	60	45	12	21	45	180	180	240	520	620	560	4,2	6,86	8,4	8,96	9,26	

\* Номер РВУ.

Характеристики неустойчивой фазы для композиционных материалов FeCu и CrCu практически совпадают. Поэтому в табл. 3 представлены данные только для CrCu (№ 2). Из результатов измерений следует, что композиционные материалы CrCu и FeCu характеризуются наименьшими значениями  $\Delta t_{ин}$  и  $U_{ин}$ . В случае Cu электродов (№ 3) интенсивность шума напряжения существенно выше, чем для композиционных материалов той же формы, при тех же амплитудах тока. Длительность  $\Delta t_{ин}$  в этих разрядниках (№ 2 и № 3) заметно уменьшается с увеличением  $I_m$ . При  $I_m > 100$  кА шум напряжения затухает на участке роста тока до достижения током амплитудного значения. Длительность и интенсивность шума неустойчивой фазы существенно возрастают при использовании цилиндрических стержней (№ 4) по сравнению с трапециевидными стержнями в случае фиксированного межстержневого зазора. Сравнимое усиление неустойчивой фазы наблюдается и при увеличении межстержневого зазора (№ 5 и № 6). При этом с увеличением активной площади поверхности стержневых электродов интенсивность шума немного уменьшается.

Таблица 3

## Технические параметры сильноточных РВУ

Показатели	РВУ-40	РВУ-43
Рабочее напряжение, кВ	0,5—20	0,5—20
Рабочий ток, кА	10—150	10—200
Максимальное количество электричества в импульсе, Кл	80	120
Время запаздывания включения, мкс	<2	<2
Напряжение поджига, кВ	5	5
Ток поджига, А, не менее	1000	1000
Длительность тока поджига, мкс, не менее	5	5
Время восстановления электрической прочности, мкс	100	100
Частота, Гц	0,02	0,02
Ресурс, число включений*	$10^3$	$10^4$
Габаритные размеры, мм	∅ 150 x 203	∅ 150 x 203
Масса, кг	9	7

\* При  $I_m \cong 150$  кА,  $Q = 30$  Кл в импульсе.

На рис. 4 показано изменение рассеиваемой в разряднике мощности  $P$  (а) и энергии  $\varepsilon$  (б), в течение импульса тока, рассчитанное из осциллограмм на рис. 3. Видно, что значительная часть рассеиваемой энергии выделяется на фронте тока. Импульс мощности имеет примерно колоколообразную форму с замедленным спадом после максимума тока. Усредненные энергетические потери используемых РВУ приведены в табл. 2. Согласно этим данным наименьшим уровнем рассеиваемой энергии характеризуются CrCu электроды. С увеличением зазора и при переходе к цилиндрическим электродам рассеиваемая в разряде энергия увеличивается.

Интенсивность шума напряжения и его длительность существенно влияют на ВАХ разрядника, измеренные при амплитуде тока (рис. 5). В каждом цикле измерений при заданном  $U_0$  производилось пять коммутаций и определялось среднее значение амплитуды тока  $I_m$  и напряжения  $U_m$ , а также максимальный разброс данных измерений. При наличии осцилляций вблизи максимума тока измерялось усредненное значение напряжения.

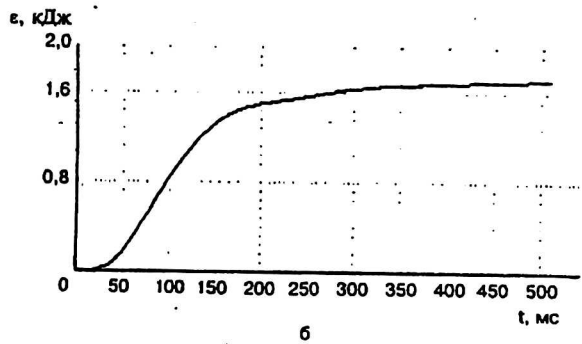
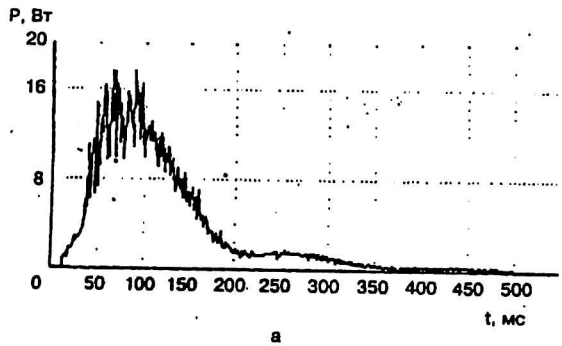


Рис. 4. Изменение рассеиваемой в разряднике мощности и энергии в течение импульса тока в случае трапецидальных медных электродов с  $d = 8$  мм при  $U_0 = 1$  кВ

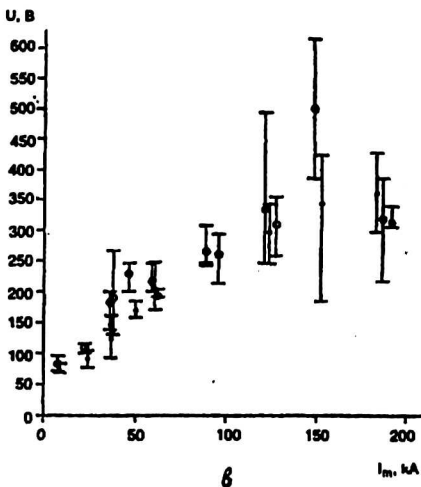
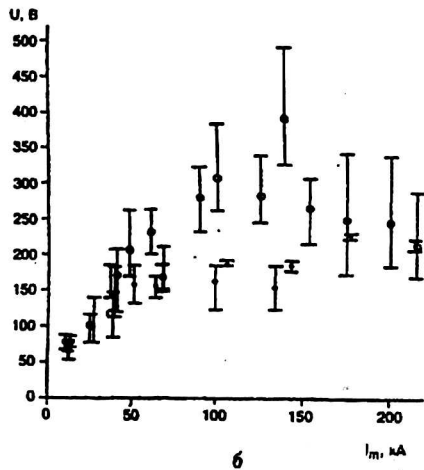
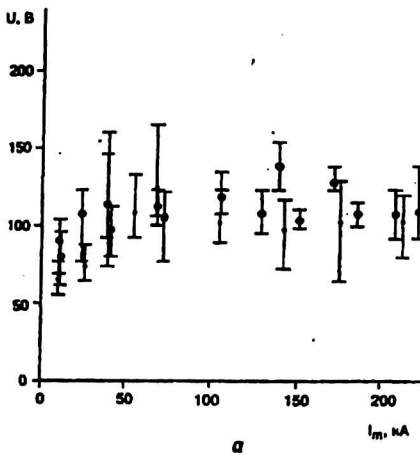
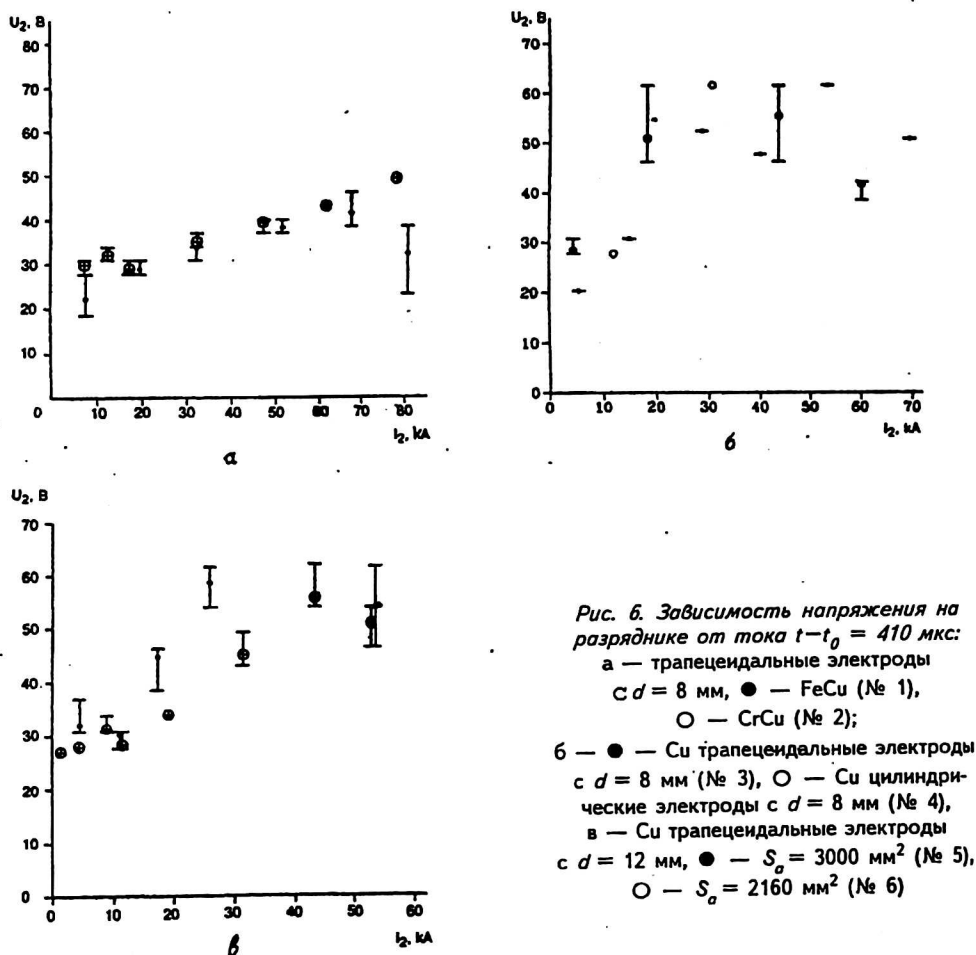


Рис. 5. Зависимость напряжения на разряднике от амплитуды тока:  
 а — трапецидальные электроды с  $d = 8$  мм  
 ● — FeCu (№ 1), ○ — CrCu (№ 2);  
 б — ● — Si трапецидальные электроды с  $d = 8$  мм (№ 3); ○ — Si цилиндрические электроды с  $d = 8$  мм (№ 4), в — Si трапецидальные электроды с  $d = 12$  мм,  
 ● —  $S_a = 3000$  мм<sup>2</sup> (№ 5),  
 ○ —  $S_a = 2160$  мм<sup>2</sup> (№ 6)

Видно, что при одинаковых условиях падение напряжения для FeCu (№ 1) и CrCu (№ 2) электродов примерно на 30 % меньше (а), чем для Si (№ 3) электродов (б). С ростом межстержневого зазора (№ 5 и № 6) (в) и в случае цилиндрических электродов (№ 4) падение напряжения  $U$  существенно увеличивается, особенно в интервале токов  $I_m = 70\text{--}150$  кА. Это обусловлено влиянием шума напряжения, который в этих разрядниках затухает только на спаде тока. При  $I_m > 150$  кА неустойчивая фаза в разряднике № 4 заканчивается при достижении током амплитудного значения, и, как следствие, падение напряжения уменьшается. Из рис. 5 следует, что характер изменения напряжения с увеличением  $I_m$  для всех вариантов разрядников примерно сохраняется. На начальном участке ВАХ с ростом  $I_m$  напряжение растет практически линейно вплоть до  $I_m \cong 50\text{--}60$  кА,  $(dI/dt)_m \sim 10^9$  А/с. При  $I_m > 60$  кА увеличение напряжения с ростом тока становится более плавным или практически прекращается, как в случае FeCu и CrCu электродов. Похожее поведение ВАХ сильноточного импульсного разряда в плоской электродной системе с межэлектродным зазором 10 мм наблюдалось в [7].



Нами были также измерены ВАХ на спаде тока вблизи последующих его экстремумов. В этом случае отмеченное выше различие ВАХ для разных вариантов разрядников уменьшается с увеличением времени измерения  $t$  относительно начала тока  $t_0$ . На рис. 6, а, б, в представлены ВАХ, измеренные при  $t - t_0 = 410$  мкс ( $dI/dt = 0$ ). Видно, что напряжение на всех исследуемых разрядниках при мгновенном значении тока  $I(t)$  в несколько раз меньше напряжения, измеренного при амплитуде тока  $I_m = I(t)$  (см. рис. 5), и не превышает 60 В.

Для сравнения нами были измерены ВАХ в разрядниках № 2 и № 3 при синусоидальном токе с частотой 50 Гц и амплитудой  $I_m = 20-90$  кА. В этом случае падение напряжения на разряднике с ростом  $I_m$  слабо нарастает от 30 до 60 В. Шум напряжения в этом режиме наблюдался только на начальном участке роста тока, и его амплитуда не превышала 150 В.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отмеченные выше особенности поведения напряжения в течение импульса тока качественно можно объяснить следующим образом. На начальном этапе, отсчитываемом от начала протекания тока поджига, межэлектродный промежуток заполняется расширяющейся в вакуум катодной плазмой. После заполнения вакуумного зазора плазмой между основанием катода (вблизи поджига) и торцевой поверхностью анодного стержня образуется токовый канал. В наших условиях его длина составляет 15—20 мм. Образование токового канала приводит к резкому спаду напряжения на разряднике. При дальнейшем росте тока происходит сжатие разрядного канала под действием собственного магнитного поля. С увеличением скорости нарастания тока в таком разрядном канале возможно образование пространственной неоднородности плазмы в прианодной области [8] и подвижных пятен на аноде [4]. Все эти процессы приводят к возбуждению первой неустойчивой фазы, характеризуемой увеличением интегрального сопротивления плазменного столба и высокочастотными осцилляциями напряжения. Развитие такой неустойчивой фазы при сравнимых параметрах тока и межэлектродного зазора исследовано в [9]. В этой работе обсуждается возможность развития в плазменном столбе ионно-звуковой турбулентности, которая приводит к возбуждению наблюдаемой неустойчивой фазы. Основная часть тока на этой стадии развития разряда протекает по анодному стержню; катодные стержни в переносе тока практически не участвуют. При этом часть катодной плазмы будет распространяться и в межстержневом зазоре ( $d = 8; 12$  мм) вдоль поверхностей анодного и катодного стержней в направлении основания анода.

Течение такого направленного потока катодной плазмы с начальной скоростью  $\sim 10^6$  см/с происходит в квазистационарном и пространственно неоднородном скрещенном электромагнитном поле, формируемом током анодного стержня. При  $I_m \gtrsim 10$  кА электронная компонента плазмы сильно замагничена. В этих условиях ток  $j_{\perp}$ , протекающий поперек межстержневого зазора на катодный стержень, определяется ионной составляющей. В прианодной области вектор плотности электронного тока будет ориентирован практически параллельно поверхности анодного стержня. Такое "скольжение" тока вдоль анода в межстержневом зазоре продолжается до некоторой области, где происходит резкое увеличение плотности тока на анод и интенсивное испарение материала анода — анодный взрыв [10].

В результате взаимодействия тока  $j_{\perp}$  с поперечным полем  $B_{\perp}$  средняя скорость течения плазменного потока в условиях наших экспериментов должна уменьшаться пропорционально  $j_{\perp} \times B_{\perp}$ . При этом концентрация ионов на фронте плазменного потока будет возрастать. С увеличением скорости нарастания тока такое торможение плазменного потока должно уменьшаться. Эти эффекты наблюдались нами при измерении скорости распространения свечения плазмы в межстержневом зазоре [2].

В дальнейшем возможны несколько вариантов развития разряда.

1. Всплески напряжения приводят к образованию спонтанных катодных пятен и нового токового канала в межстержневом зазоре  $d$ , размер которого примерно в два раза меньше, чем длина первоначального токового канала.
2. В результате анодного взрыва образуется пятно на анодном стержне. Это пятно также приводит к образованию нового разрядного канала, закорачивающего межстержневой зазор.

3. При  $I_m \ll 10$  кА и  $dI/dt \leq 10^8$  А/с новые катодные пятна образуются только в окрестности первоначальных катодных пятен на основании катода. В этом случае разряд горит неустойчиво в течение всей длительности импульса тока.

Образование нового разрядного канала в межстержневом зазоре вблизи границы расширяющегося светящегося облака плазмы наблюдалось нами в [2]. Новый канал формировался как из пятен на катодном, так и на анодном стержнях при пороговом токе  $I \cong 6$  кА, что согласуется с данными табл. 1 для CrCu электродов. Мы полагаем, что ступенчатообразный спад напряжения на рис. 2 обусловлен образованием нового разрядного канала в межстержневом зазоре.

Дальнейшее развитие разряда в межстержневом зазоре сопровождается возбуждением второй неустойчивой фазы. При  $10^8$  А/с  $< dI/dt \lesssim 10^9$  А/с осцилляции напряжения появляются перед максимумом тока и затухают на спаде тока во всех вариантах электродной системы. Амплитуда шума напряжения в этом режиме сравнительно мала, а следы эрозии на поверхности электродов незначительны. Естественно предположить, что развитие неустойчивости в этом случае сопровождается формированием подвижных анодных пятен (foot points) [4—6]. По нашему мнению, в этом режиме разряд горит, в основном, в одном из межстержневых зазоров, там где образовался разрядный канал. С ростом тока разрядный канал расширяется по всей активной поверхности стержневых электродов, что приводит к затуханию шума напряжения. Такому режиму соответствует практически линейный начальный участок ВАХ на рис. 5.

С ростом скорости нарастания тока  $dI/dt < 10^9$  А/с возрастает влияние эффектов, наблюдаемых в [10]: снос тока вдоль поверхности анодного стержня в сторону анода, образование вихревых течений в точках привязки к аноду и выбросы плазмы наружу из межстержневого зазора. В этом режиме образуются большие области расплавленного металла на электродах, из которых происходит интенсивная эрозия материала электрода [4]. Косвенным подтверждением такого характера развития разряда может служить сложная конфигурация расплавов на поверхности стержневых медных электродов после горения сильноточной вакуумной дуги [3]. Такое развитие разряда сопровождается наиболее интенсивными флюктуациями напряжения. Интенсивные всплески напряжения и концентрированный разлет плазмы в объеме электродной системы создают условия для образования новых разрядных каналов в других межстержневых зазорах. Развитие новых токовых каналов приводит к постепенному уменьшению флюктуаций напряжения. Разряд плавно переходит к заключительному этапу, когда все стержни включаются в перенос разрядного тока. В случае трапецидальных электродов с зазором 8 мм такой этап может наступить и на стадии нарастания тока. Эффективное размножение разрядных каналов обуславливает более пологий участок ВАХ на рис. 5. При спаде тока шум напряжения, как правило, успокаивается, среднее значение напряжения уменьшается до 50—60 В, и разряд переходит в диффузную фазу во всем объеме электродной системы.

Рассмотренный качественный сценарий развития в многозазорной стержневой электродной системе не позволяет в полной мере определить влияние формы и материала электродов на коммутационные характеристики разрядника. Однако из общих соображений следует, что стержневые электроды трапецидальной формы (особенно CrCu и FeCu) должны способствовать более эффективному расширению разрядного канала и, соответственно, более быстрому затуханию неустойчивости по сравнению с цилиндрическими стержнями. Этим объясняется сравнительно небольшое падение напряжения на таких разрядниках при фиксированных значениях  $I_m$  и величине зазора. Очевидно, что увеличение межстержневого зазора должно приводить к усилению неустойчивости.

## Заключение

В ходе выполненных исследований получены следующие результаты.

Обнаружено возбуждение двух неустойчивых стадий развития разряда на фронте тока, сопровождаемых ростом напряжения с наложением значительных высокочас-

тотных осцилляций. Первая неустойчивая фаза, как правило, завершается ступенчатобразным спадом напряжения и увеличением скорости нарастания тока при определенном для данного типа разрядника пороговом токе. Вслед за первой возбуждается вторая неустойчивая фаза, характеристики которой зависят от амплитуды тока, формы и материала стержневых электродов.

Измерены ВАХ разрядников при амплитуде тока. Установлено, что использование композиционных материалов  $\text{CrCu}$  и  $\text{FeCu}$  позволяет более чем на 30 % снизить напряжение и уровень рассеиваемой в разряднике энергии при том же значении коммутируемого тока ( $I_m \sim 200$  кА) по сравнению с медью вакуумной плавки. Увеличение межстержневого зазора в 1,5 раза приводит при одинаковой форме стержневых электродов к увеличению рассеиваемой энергии почти на 20 %. Примерно к такому же росту рассеиваемой энергии приводит использование цилиндрических стержней вместо трапецеидальных при одинаковом межстержневом зазоре.

Рассмотрен качественный сценарий развития разряда в нестационарном пространственно-неоднородном скрещенном электромагнитном поле, который не противоречит результатам экспериментального исследования.

На основе проведенных исследований разработаны, изготовлены и испытаны опытные образцы сильноточного управляемого вакуумного разрядника РВУ-43 [11]. Разрядник способен коммутировать импульсы тока до 200 кА при рабочем напряжении до 25 кВ и величине коммутируемого заряда до 120 Кл (см. табл. 3). Новый разрядник характеризуется более высоким сроком службы при токах  $> 100$  кА и меньшей металлоемкостью по сравнению с РВУ-40. Разработано несколько модификаций РВУ-43, предназначенных для различных режимов его применения, отличающихся стоимостью разрядника.

Разработанные сильноточные РВУ предназначены для коммутации мощных импульсных высоковольтных источников энергии. Большой диапазон и низкий порог срабатывания по напряжению позволяют использовать РВУ в режиме кроубара для получения однополярных импульсов в индуктивной нагрузке и защиты электрооборудования в аварийных режимах [11]. Малый разброс времени запаздывания включения допускает синхронное параллельное включение большого количества разрядников на нагрузку [12], имеется положительный опыт последовательного включения разрядников. Все это позволяет существенно расширить диапазон рабочих токов и напряжений.

Мы не видим, сейчас, принципиальных ограничений для повышения предельных значений коммутируемого тока до 500 кА с передаваемым зарядом в импульсе более 100 Кл.

## Л и т е р а т у р а

1. Rich J. A., Farral G. A., Imami, Sofianek J. EPRI Report, EL — 1895, Project 754 — 1. 1981.
2. Алферов Д. Ф., Воздвиженский В. А., Сибиряк И. О., Сидоров В. А. // ПТЭ, 1990. № 5. С. 139—142.
3. Алферов Д. Ф., Сидоров В. А. // Там же. 1996. № 3. С. 80—86.
4. Miller H. C. // IEEE Trans. Plasma Sci. PS-11, 76. 1983.
5. Delmas A., Lequitte P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1993. V. 21. № 5. P. 501—505.
6. Zalucki Z. Proc. XVII ISDEIV, Berkeley, 1996. P. 204.
7. Сысун В. И., Хромой Ю. Д. // ТБТ, 1984, т. 22, № 3. С. 457—462.
8. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. — Новосибирск: Наука, 1984.
9. Алферов Д. Ф., Коробова Н. И., Сибиряк И. О. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. Вып. 3. С. 339—410.
10. Брушлинский К. В., Морозов А. И. Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. Атомиздат. 1974. № 8. С. 88.
11. Алферов Д. Ф., Воздвиженский В. А., Сидоров В. А. // Электротехника. 1996. № 8. С. 45—49.
12. Dethlefsen R. D., Sidorov V., Vozdvijenskii V. Proc. 8-th International Pulsed Power Conference. San Diego, California USA, June 1991. P. 511.

## THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF A HIGH CURRENT TRIGGERED VACUUM SWITCH WITH A SIX-GAP ROD ELECTRODE SYSTEM

*D. F. Alferov, N. I. Korobova, V. A. Sidorov*

All Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*The high current triggered vacuum switch with a six-gap rod electrode system has ever increasing utilization for pulse power switching in high-voltage circuits at currents to hundered kiloamperes and pulse duration of several milliseconds. The paper studies current-voltage characteristics of such electrode system versus scape and material of the electrodes and inter-electrode gap value. The investigation were carried out at a current amplitude up to 200 kA with the rate of its rise up to  $\sim 5 \cdot 10^9$  A/c. A number of features were observed concerning arc burning voltage dynamics depending on value and rate of the arc current and namely, a step-like voltage change at an initial discharge burning stage and exitation of high frequency voltage oscillations in a discharge current wave front. The duration and intensity of the unstable discharge burning phase accompanied by high frequency voltage oscillations depend strongly on electrode system parameters. Dynamics of power dissipated in the vacuum gaps and full dissipated energy were calculated in terms of the swiching current amplitude. Results of the investigation gave possibility to design a sealed-off triggered vacuum switch having minimum power losses and prolonged servise life evaluated by a transferred charge value  $> 10^6$  C.*