

УДК 621.387.35

Новое поколение сильноточных вакуумных управляемых разрядников

Д. Ф. Алферов, В. П. Иванов, В. А. Сидоров, В. В. Федоров
ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Представлены основные результаты исследований импульсного сильноточного вакуумного разряда в стержневой электродной системе. Разработаны, изготовлены и испытаны новые типы управляемых вакуумных коммутирующих устройств РВУ-47, РВУ-45 и высоковольтный вакуумный коммутатор на базе двух последовательно соединенных РВУ-43, перекрывающих широкий диапазон рабочих токов 5—500 кА и напряжений 1—80 кВ.

Вакуумные управляемые разрядники (РВУ) отпаянной конструкции обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с другими известными типами коммутирующих устройств. К числу таких преимуществ относятся высокая скорость восстановления электрической прочности и широкий диапазон рабочих токов $I = 0,1\text{--}200$ кА и напряжений $U = 1\text{--}50$ кВ. Кроме того, РВУ характеризуются высокой стойкостью к аварийным перегрузкам, низким уровнем акустических шумов и экологической чистотой в производстве и эксплуатации.

Для многократных сильноточных коммутаций все более широкое применение в мощных электрофизических установках и электроразрядных технологиях находят вакуумные разрядники с электродной системой в виде пространственно чередующихся по окружности стержней противоположной полярности типа РВУ-43 [1, 2]. Представляется также перспективным использование сильноточных РВУ в качестве быстродействующих короткозамыкателей [3, 4]. В настоящее время в различных научных центрах ведутся работы по совершенствованию конструкции сильноточных РВУ и повышению их предельных характеристик [5, 6].

В данной работе приводятся результаты исследований развития сильно-точной импульсной вакуумной дуги в стержневой электродной системе. На основе анализа этих результатов разработаны и испытаны новые типы сильно-точных РВУ, отличающиеся предельными параметрами и массогабаритными характеристиками. Представлены результаты испытаний высоковольтного вакуумного коммутатора на напряжение до 80 кВ, состоящего из двух последовательно соединенных РВУ-43.

Развитие сильноточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе

В целях изучения физических процессов, определяющих инициацию и развитие сильноточного импульсного вакуумного разряда в стержневой электродной системе, были проведены исследования динамики свечения плазмы в разрядных промежутках и пятен на электродах с помощью высокоскоростного фоторегистратора СФР [7, 8]. Исследуемая электродная система с медными стержневыми электродами размещалась в разборном макете вакуумной камеры под постоянной откачкой. Одновременно с регистрацией СФР-грамм измерялись ток разряда и напряжение на камере. Исследования проводились на сильноточном стенде в диапазоне токов 10—100 кА [7].

На рис. 1 представлены фотографии свечения разрядной плазмы, полученные при экспозиции кадра в течение всего импульса тока, который имел униполярную форму с длительностью фронта ~ 140 мкс и спадом ~ 1 мс. Здесь вверху расположен анодный, а внизу катодный узел электродной системы. Отметим, что при малых амплитудах тока $I_m \approx 5$ кА (см. рис. 1, а) основная часть свечения сосредоточена вблизи основания катода (в основном между узлом поджига в центре катода и торцом анодного стержня). При увеличении амплитуды тока до $I_m \approx 15$ кА значительная часть свечения наблюдается уже в видимом межстержневом зазоре (см. рис. 1, б). В случае $I_m \approx 27$ кА свечение заполняет практически весь видимый межстержневой зазор (см. рис. 1, в), а возможно, и соседние межстержневые зазоры. При этом свечение вблизи узла поджига становится малозаметным.

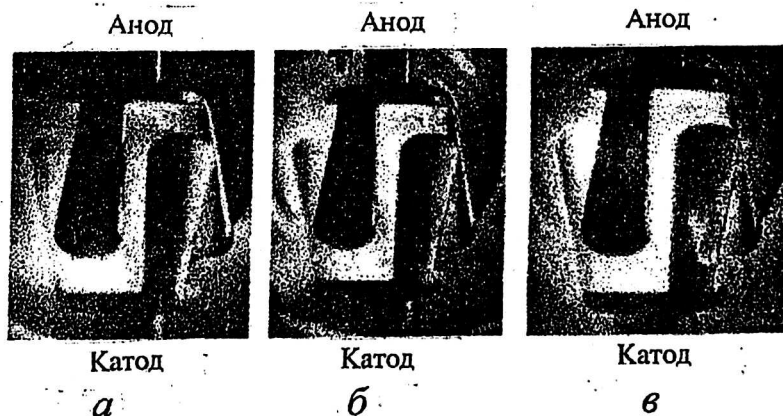


Рис. 1. Фотографии свечения плазмы вакуумной дуги в стержневой электродной системе:
а — $I_m = 5$ кА; б — $I_m = 15$ кА; в — $I_m = 27$ кА

В результате высокоскоростной фоторегистрации (длительность экспозиции каждого кадра ~ 16 мкс) было обнаружено явление быстрого перехода разряда от узла поджига в межстержневые промежутки. Это явление наблю-

дается в фиксированном диапазоне мгновенных значений токов разряда $I \sim (5-9)$ кА и практически не зависит от скорости его нарастания. В процессе измерений установлена четкая корреляция между моментом появления резкого спада напряжения на вакуумной дуге и моментом образования нового разрядного канала в межстержневом промежутке (рис. 2) [7].

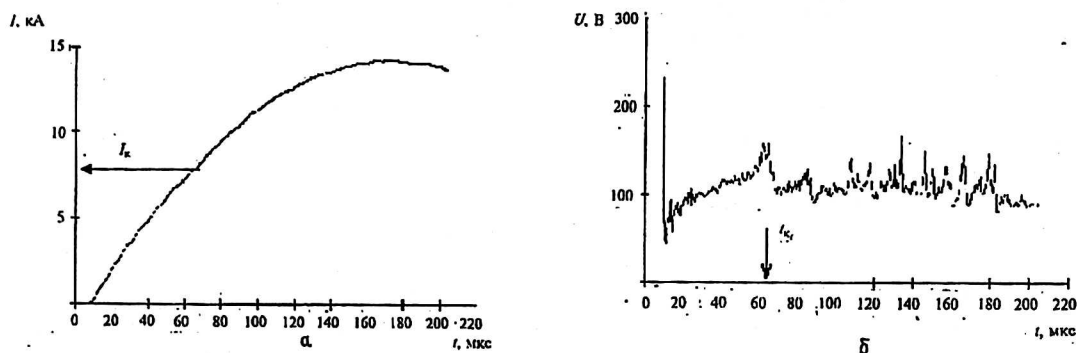


Рис. 2. Осциллограммы тока I (а) и напряжения U (б):

I_k — ток, при котором образуется новый разрядный канал в межстержневом промежутке

С ростом тока, после перехода разряда в межстержневой промежуток, наблюдаются размножение катодных пятен вдоль линии, параллельной оси электродной системы, размножение разрядных каналов в соседние межстержневые промежутки и циклическое образование и погасание анодных пятен, которое приводит к расширению занятой катодными пятнами области на поверхности катодного стержня напротив анодного пятна. Все эти процессы сопровождаются характерными изменениями напряжения на дуге, что позволяет предсказывать поведение вакуумной дуги по характеру изменения напряжения. Образование анодных пятен происходило на фронте импульса при мгновенных значениях тока $I \sim 25-50$ кА [8]. Мгновенное значение тока, при котором наблюдалось появление анодных пятен, практически не зависит от начальной скорости нарастания тока $dI/dt \sim 10^7-10^9$ А/с и имеет статистический характер.

Наблюдаемые особенности поведения сильноточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе могут быть обусловлены влиянием магнитного поля, формируемого протекающим по стержневым электродам током [9]. Так, динамика катодных пятен в межстержневом зазоре в значительной степени определяется поперечной составляющей магнитного поля, влияние которой максимально при протекании основной части тока в одном межстержневом зазоре. Продольная составляющая магнитного поля становится существенной, когда ток начинает протекать по всем стержневым электродам. По-видимому, именно влиянием продольной составляющей магнитного поля можно объяснить увеличение однородности заполнения пятнами рабочей поверхности катодных стержней с ростом тока и сравнительно большие пороговые токи образования анодного пятна.

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 позволяет повысить коммутируемые токи в такой системе до 500 кА.

Сильноточные РВУ

Из многолетнего опыта эксплуатации разрядников типа РВУ-40 и РВУ-43 у различных потребителей следует, что они успешно используются в широком диапазоне импульсных токов от 50 до 200 кА. Однако применение данного типа РВУ для коммутации импульсных токов с передаваемым зарядом в импульсе более 40 Кл представляется нам нерациональным. Для этого режима целесообразно разработать более компактный разрядник меньшей стоимости. С другой стороны, ощущается потребность в разработке РВУ на более высокие предельные токи до 500 кА.

Выполненный цикл исследований поведения сильноточной импульсной вакуумной дуги в стержневой электродной системе позволил определить требования к конструкции электродов в зависимости от режимов их использования и послужил основой для проектирования новых типов разрядников РВУ-47 и РВУ-45. Эти разрядники отличаются конструктивным исполнением стержневой электродной системы и своими предельными параметрами. Электродная система разрядников выполнена из композиции CuCr (50/50).

Технические характеристики новых РВУ

Показатели	РВУ-43	РВУ-45	РВУ-47
Максимальное напряжение, кВ	30	25	25
Рабочее напряжение, кВ	0,5—30	0,5—25	0,5—25
Рабочий ток, кА	10—300	500	10—200
Максимальное количество электричества в импульсе, Кл	120	300	40
Время восстановления электрической прочности, мкс	100	100	100
Ресурс (число включений)	10 ⁴	—	10 ⁴
Напряжение поджига, кВ	5	5	5
Ток поджига, А, не менее	1000	1000	1000
Длительность тока поджига, мкс, не менее	5,0	5,0	5,0
Частота, Гц, не более	0,02	0,02	0,02
Габаритные размеры, мм:			
диаметр	144	162	122
высота	195	225	193
Масса, кг	7,0	10	5

Каждый РВУ представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточного газа, не превышающим 10^{-4} Па [1]. Включение РВУ осуществляется с помощью блока запуска, который формирует импульс напряжения на управляющем электроде и обеспечивает требуемые параметры тока поджига. Импульс напряжения вызывает пробой поджигающего промежутка, а ток поджига поддерживает горение инициирующего разряда. В результате в вакуумном промежутке между основными электродами загорается вакуумный дуговой разряд, который сам себя поддерживает и существует до окончания импульса основного тока или до его перехода через нуль.

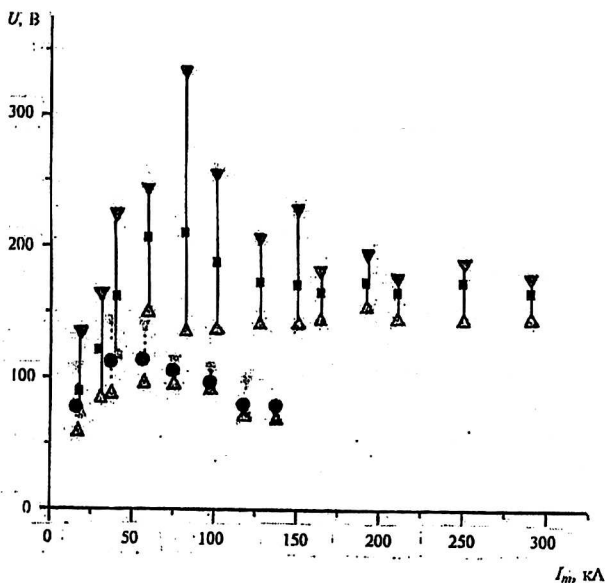
Для всех представленных РВУ требуется напряжение поджига не менее 5 кВ. Ток поджига должен иметь форму затухающей синусоиды с амплитудой первой полуволны не менее 1 кА. Максимальный ресурс РВУ обеспечивается при определенном выборе длительности тока поджига в зависимости от формы импульса основного тока. Минимальная длительность тока поджига ~5 мкс при длительности фронта основного тока более 10 мкс.

Испытания РВУ проводились на сильноточном импульсном стенде, состоящем из батареи конденсаторов емкостью 12,4 мФ на максимальное на-

пряжение 3 кВ. Конденсаторная батарея включает в себя восемь параллельных практически идентичных секций, шунтированных диодными блоками для формирования униполярного импульса тока. Каждая секция подсоединялась к испытуемому РВУ с помощью сильноточного малоиндуктивного кабеля. Результирующая индуктивность разрядного контура составляла $\sim 1,5$ мкГн. При включении РВУ через него протекал ток с фронтом ~ 130 мкс, длительностью спада ~ 1 мс и максимальной амплитудой до 300 кА. В этом режиме испытаний длительность тока поджига составляла ~ 15 мкс.

Вольт-амперные характеристики РВУ, измеренные при амплитудном значении тока I_m , представлены на рис. 3. В каждом цикле измерений при заданном напряжении на конденсаторной батарее производилось пять коммутаций и определялись среднее значение напряжения U и максимальный разброс данных измерений. Из рис. 3 следует, что падение напряжения и, соответственно, рассеиваемая в РВУ энергия меньше в РВУ-47 по сравнению с РВУ-45. Данный результат может быть обусловлен более высокой индукцией продольного магнитного поля в РВУ-47, чем в РВУ-45. При токах 150—300 кА среднее падение напряжения в РВУ-45 практически не меняется с ростом тока и составляет ~ 170 В. Следует отметить, что вольт-амперные характеристики разрядников РВУ-45 и РВУ-43 с CuCr электродами в диапазоне токов 20—200 кА примерно совпадают [1, 2].

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики РВУ-45 (■) и РВУ-47 (•)



Испытания РВУ-45 в режиме высоковольтных коммутаций импульсных токов с амплитудой до 500 кА были проведены на высоковольтном стенде, содержащем конденсаторную батарею емкостью 145 мкФ на максимальное напряжение 40 кВ. Батарея состоит из шести параллельных секций, подсоединенных к испытуемому РВУ с помощью высоковольтных кабелей. Это позволило уменьшить индуктивность разрядного контура до $\sim 0,4$ мкГн. При включении РВУ через него протекал затухающий синусоидальный импульс тока с периодом ~ 48 —50 мкс. Испытания проводились при напряжении ~ 25 кВ, что соответствует амплитуде тока 450—500 кА. Было выполнено ~ 1000 коммутаций без заметного изменения электрических характеристик РВУ.

Электрическая прочность внутренней изоляции разрядников измерялась после пропускания через РВУ тока с амплитудой $I_m \sim 150$ кА. Измерения

проводились при приложении напряжения частотой 50 Гц после каждых 25 коммутаций [10]. Экспериментальные данные для разрядников РВУ-45 и РВУ-47 представлены на вероятностной координатной сетке для вейбулловского закона распределения (рис. 4) [11]. Видно, что эмпирическое распределение вероятности напряжения пробоя разрядников РВУ-45 и РВУ-47 удовлетворительно аппроксимируется вейбулловским законом распределения. Аналогичная зависимость была получена ранее [1, 2, 10] и для РВУ-43.

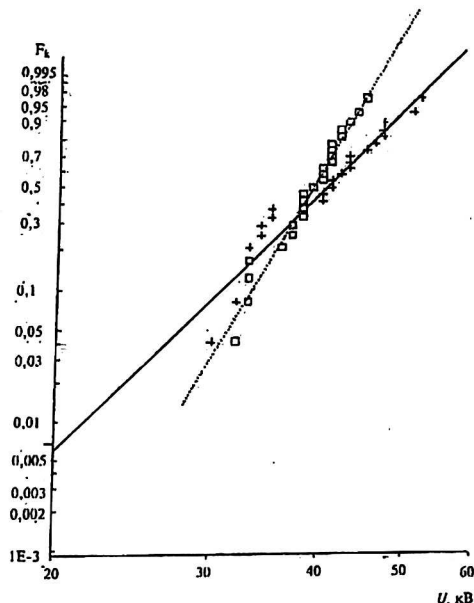


Рис. 4. Электрическая прочность РВУ-45 (+) и РВУ-47 (□)

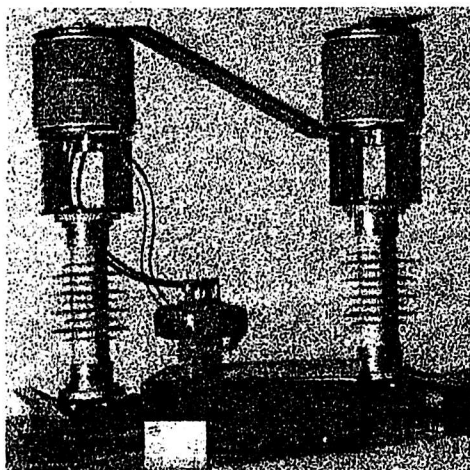
Надежность отключения РВУ при первом переходе тока через нулевое значение слабо зависит от типа РВУ и определяется в основном скоростью подхода тока к нулю и скоростью роста восстанавливающегося напряжения. Из анализа результатов испытаний следует, что для обеспечения вентильных свойств РВУ скорость подхода тока к нулю не должна существенно превышать 100 А/мкс [12]. Одним из способов уменьшения скорости подхода тока к нулю является подключение последовательно с РВУ нелинейного резистора, сопротивление которого должно увеличиваться на спаде тока.

Высоковольтный сильноточный коммутатор

Рабочее напряжение сильноточных РВУ не превышает 25–30 кВ. Однако часто возникает потребность в сильноточных коммутирующих устройствах на более высокие напряжения, например в электроэнергетике [3, 4]. Существенно повысить рабочее напряжение можно путем последовательного соединения нескольких РВУ [3, 4]. Для реализации этого предложения был спроектирован и изготовлен высоковольтный сильноточный коммутатор, состоящий из двух последовательно соединенных вакуумных разрядников типа РВУ-43 с CuCr электродами (рис. 5).

Коммутатор предназначен для коммутации сравнительно длинных (~1,5 мс) импульсов тока при напряжении до 80 кВ. В блоке запуска предусмотрена возможность повторной генерации импульса поджига при переходе основного тока через нулевое значение, чтобы обеспечить надежное пропускание второй полуволны тока.

Рис. 5. Фотография высоковольтного вакуумного коммутатора



Электрическая прочность коммутатора измерялась по описанной выше методике. После пяти коммутаций тока ~ 20 кА измерялось напряжение пробоя коммутатора и напряжение на одном из разрядников в момент пробоя. Деление напряжения по разрядникам, вследствие присоединения статического киловольтметра к одному из РВУ, было неравномерным и составляло примерно $1/3$ к одному РВУ и $2/3$ — к другому.

Результаты измерений представлены на вейбулловской координатной сетке (рис. 6). Здесь совокупности точек 1 и 2 представляют эмпирические функции распределения напряжения пробоя каждого РВУ, а совокупность точек 3 — эмпирическую функцию распределения напряжения пробоя коммутатора. Там же построены аппроксимирующие экспериментальные данные — прямые 1 и 2, изображающие вейбулловские функции распределения с параметром сдвига 30 кВ.

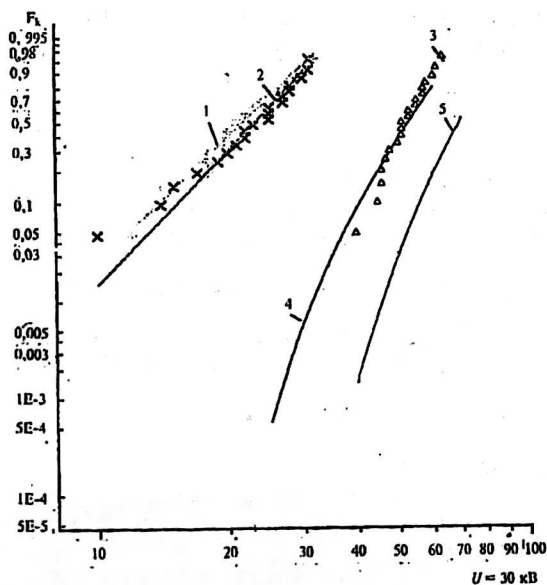


Рис. 6. Электрическая прочность коммутатора:

- 1 — совокупность экспериментальных точек первого РВУ-43; 2 — совокупность экспериментальных точек второго РВУ-43; 3 — совокупность экспериментальных точек коммутатора при неравномерном делении напряжения;
- 4 — расчет для неравномерного деления напряжения; 5 — расчет для равномерного деления напряжения

Пробой коммутатора происходит в результате пробоя одного из РВУ и последующего пробоя другого РВУ или в результате одновременного пробоя

двух РВУ. Из этого условия можно представить вероятность пробоя коммутатора F_k при напряжении $U = U_1 + U_2$ в виде

$$F_k(U) = F_1(U_1) F_2(U) + F_1(U) F_2(U_2) - F_1(U_1) F_2(U_2),$$

где $F_1(U)$ — вероятность пробоя первого РВУ;

$F_2(U)$ — вероятность пробоя второго РВУ;

U_1 и U_2 — напряжения на первом и втором РВУ в момент пробоя, соответственно.

Рассчитанная таким образом вероятность $F_k(U)$ при $U_1 = 1/3U$ и $U_2 = 2/3U$ показана на рис. 6 (кривая 4). Видно, что расчетная кривая удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. На рис. 6 приведена также зависимость $F_k(U)$, рассчитанная при равномерном делении напряжения ($U_1 = U_2$) — кривая 5. Из данных, приведенных на рис. 6, следует, что даже в случае неравномерного деления напряжения пробой коммутатора с вероятностью менее 1 % происходит при напряжении ~ 60 кВ. В случае равномерного деления напряжения электрическая прочность коммутатора при той же вероятности пробоя увеличивается примерно на 20 кВ. Более детальный анализ зависимости электрической прочности коммутатора от неравномерности деления напряжения на разрядниках является предметом дальнейших исследований.

Заключение

Выполненный цикл исследований развития сильноточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе позволил определить условия перехода разряда в межстержневые промежутки и размножения разрядных каналов во всем объеме электродной системы. На основе результатов этих исследований разработаны и изготовлены новые типы управляемых вакуумных коммутирующих устройств, конструкция которых оптимизирована под предполагаемые режимы их использования. Новые коммутирующие устройства предназначены для сильноточных коммутаций в широком диапазоне рабочих токов $I = 0,5\text{—}500$ кА и напряжений $U = 0,5\text{—}80$ кВ.

Литература

1. Алферов Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А. // ПТЭ. 1998. № 5. С. 83—90.
2. Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A. // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. № 1. P. 323—327.
3. Alferov D. F., Belkin G. S., Budovsky A. I., Dorf G. A., Ivanov V. P., Sidorov V. A. // Proc. of CIGRE Symp., Paris, Aug. 1998. P. 13—108.
4. Алферов Д. Ф., Белкин Г. С., Будовский А. И., Иванов В. П., Сидоров В. А., Дорф Г. А. // Электричество, 1998. № 7. С. 2—8.
5. McNab I. R. // Proc. 12th Intern. Pulsed Power Conf., Monterey, USA, June 1999. P. 359—363.
6. Bower S., Cook K. G., Jones F. J., Pirrie C. A. // Proc. 12th Intern. Pulsed Power Conf., Monterey, USA, June 1999. P. 1141—1144.
7. Alferov D. F., Sidorov V. A. // Pros. XIX-th Intern. Symp. ISDEIV, Xi'an, China, Sept. 2000. P. 319—322.
8. Alferov D. F., Nevrovsky V. A., Sidorov V. A. // Ibid. P. 515—518.
9. Алферов Д. Ф., Лукацкая И. А., Селикатова С. М., Сидоров В. А. Исследование распределения магнитного поля в вакуумных управляемых разрядниках // Прикладная физика. 2001. № 4. С. 35—40.
10. Сидоров В. А., Алферов Д. Ф. // ПТЭ. 2001. № 1. С. 92—100.
11. Хаушид В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. — Л.: Энергоатомиздат, 1989.
12. Pappas J. A., Pish S. P., Salimas M. J. // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. № 1. P. 367—371.

New generation of high current triggered vacuum switches

D. F. Alferov, V. P. Ivanov, V. A. Sidorov, V. V. Fedorov
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The main results of researches of pulse high current vacuum discharge in a rod electrode system are presented. New types of triggered vacuum switching devices RVU-47, RVU-45 and the high-voltage vacuum commutator consisting of two series connected switches RVU-43 are developed, manufactured and tested. These switching devices cover a range of working currents from 5 up to 500 kA and a voltage range from 1 up to 80 kV.