

УДК 621.373

ВАКУУМНЫЙ РАЗРЯДНИК РВУ-73С С ЦЕПЬЮ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

© 2011 г. С. В. Коротков, А. Л. Жмодиков, В. А. Сидоров*, Д. Ф. Алфёров*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26

*Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12

Поступила в редакцию 04.02.2011 г.

Описаны конструкция и принцип действия малогабаритного (диаметр 50 мм, высота 100 мм) вакуумного разрядника РВУ-73С. Показана возможность его эффективного переключения с помощью цепи управления с малым (~900 В) напряжением питания, выполненной на основе индуктивного накопителя энергии и диодного прерывателя тока, формирующего высоковольтный импульс поджига с наносекундным фронтом нарастания. Исследован процесс переключения РВУ-73С при разной скорости нарастания поджигающего импульса напряжения и разной амплитуде тока поджига. Приведены результаты испытаний разрядника в режимах коммутации импульсов тока с амплитудой 12 кА и с фронтом нарастания 800 нс.

Известные достоинства вакуумных управляемых разрядников — широкий диапазон рабочих напряжений и токов, бесшумность, компактность, сравнительно невысокая стоимость — определяют хорошие перспективы для их использования в мощной импульсной технике.

В статье исследуется недавно разработанный в Всероссийском электротехническом институте им. В.И. Ленина вакуумный разрядник РВУ-73С, предназначенный для коммутации мощных импульсов тока с микро- и субмикросекундной длительностью.

Его особенность заключается в том, что анодные и катодные электроды выполнены в виде нескольких близкорасположенных стержней. При этом обеспечивается высокоэффективное использование рабочего объема и достигается более высокая коммутационная способность на единицу объема по сравнению с традиционной [1] электродной системой.

Конструкцию электродной системы РВУ-73С иллюстрирует рис. 1. Она состоит из трех катодных (1) и трех анодных (2) стержневых электродов, расположенных по окружности радиусом 28 мм. Форма поперечного сечения электродов близка к трапецеидальной.

В местах перекрытия анодные и катодные электроды образуют плоскопараллельные промежутки шириной $d = 3$ мм. В основании катодных электродов расположен узел поджига, состоящий из поджигающего электрода 3 и диэлектрической втулки 4, отделяющей катодный электрод от поджигающего. Разряд между силовыми электродами 1 и 2 инициируется электрическим пробоем по рабочей поверхности диэлектрической втулки.

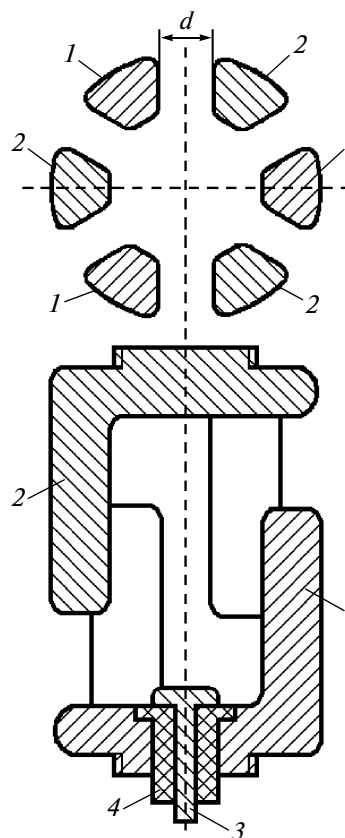


Рис. 1. Конструкция электродной системы разрядника РВУ-73С. 1 — катодные электроды; 2 — анодные электроды; 3 — поджигающий электрод; 4 — диэлектрическая втулка.

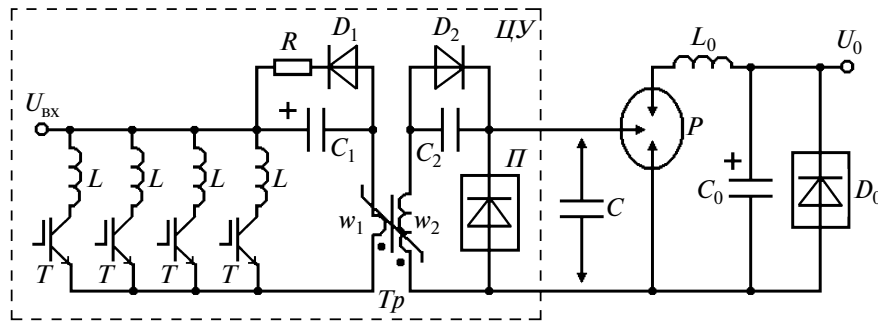


Рис. 2. Электрическая схема испытательного стенда. T – IRG4PF50WD; D_1, D_2 – HER608, D_0 – 10 последовательно соединенных диодных структур с диаметром 24 мм и рабочим напряжением 2200 В; Tr – $w_1 = 1, w_2 = 4$, сердечник феррит № 87 (EPCOS AG), кольцо $25.3 \times 14.8 \times 120$ мм; $L = 0.7$ мкГн, $L_0 = 0.5$ мкГн; $C_1 = 150$ нФ, $C_2 = 33$ нФ, $C_0 = 1$ мкФ, C – шунтирующий конденсатор; $R = 2.4$ Ом.

Электродная система разрядника размещена в герметичном корпусе, выполненном в виде стеклянного цилиндра, закрепленного между двумя медными фланцами (анод, катод). Поверхность стеклянного цилиндра защищена от продуктов эрозии электродов медным цилиндрическим экраном.

Рассмотренные конструктивные особенности РВУ-73С обеспечивают ему высокие коммутационные возможности, малые габариты и большой срок службы в сильноточных импульсных режимах.

Основные технические характеристики разрядника РВУ-73С: рабочее напряжение 0.1–16 кВ; рабочий ток не более 30 кА; время восстановления электрической прочности 10 мкс; максимальный заряд в импульсе 4 Кл; срок службы при токе 15 кА и переносимом заряде 0.1 Кл не менее 500000 импульсов; напряжение поджигающего импульса не менее 5 кВ; ток поджигающего импульса не менее 500 А; длительность поджигающего импульса 1 мкс; диапазон рабочих температур –20...+40°С; габаритные размеры (диаметр × высота) 50 × 100 мм; масса 400 г.

Требуемые для эффективной работы РВУ-73С параметры поджигающего импульса определяют необходимость использования высоковольтных (~5 кВ) и сильноточных (~500 А) цепей управления (ЦУ). Традиционно они строятся на основе емкостного накопителя энергии и быстродействующего переключателя в виде менее мощного управляемого разрядника. Основным недостатком таких цепей является высокое входное напряжение, необходимое для зарядки емкостного накопителя.

В данной работе приведены результаты испытаний РВУ-73С с ЦУ на основе индуктивного накопителя энергии и прерывателя тока, осуществляющего быструю коммутацию энергии индуктивного накопителя в цепь поджига разрядника. При таком построении цепи управления ампли-

туда поджигающих импульсов напряжения может значительно превышать величину входного напряжения ЦУ.

Электрическая схема испытательного стенда приведена на рис. 2.

В исходном состоянии вакуумный разрядник P блокирует напряжение зарядки силового конденсатора C_0 . Включение разрядника осуществляется с помощью цепи управления ЦУ, содержащей прерыватель тока Π , конденсаторы C_1, C_2 , транзисторы T и трансформатор с насыщающимся сердечником Tr .

Прерыватель тока выполнен в виде сборки последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением (д.д.р.в.) [2].

При включении транзисторов T происходит разряд конденсатора C_1 через первичную обмотку w_1 трансформатора Tr . В результате осуществляется зарядка конденсатора C_2 и через прерыватель Π пропускается короткий (~800 нс) импульс прямого тока, обеспечивающий накопление в полупроводниковых структурах д.д.р.в. электронов и дырок.

В момент окончания процесса зарядки сердечник трансформатора Tr насыщается, индуктивность вторичной обмотки w_2 резко уменьшается и по цепи $\Pi-w_2$ протекает короткий (~300 нс) ток разряда конденсатора C_2 , являющийся обратным для д.д.р.в. При этом в индуктивности обмотки w_2 накапливается энергия, используемая для поджига разрядника после выключения прерывателя.

Быстрое (~3 нс) выключение прерывателя Π происходит вблизи максимума обратного тока, когда достигается примерное равенство зарядов, пропускаемых через д.д.р.в. в прямом и обратном направлении.

В момент выключения прерывателя ток обмотки w_2 коммутируется в цепь поджига разрядника. При этом к поджигающему межэлектродному промежутку прикладывается быстронарастающий им-

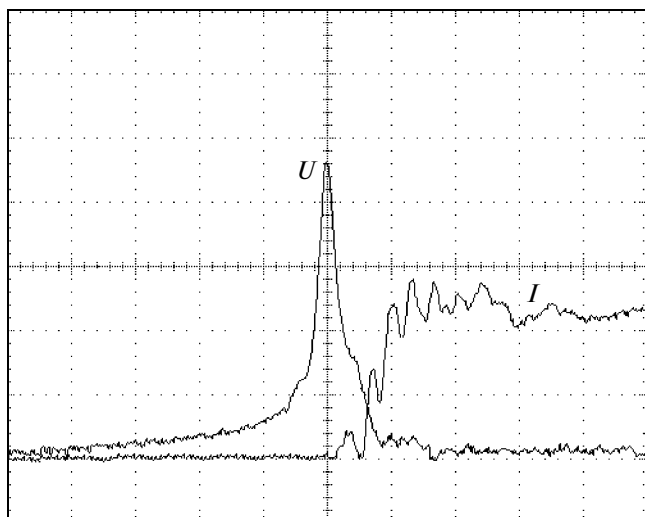


Рис. 3. Осциллограммы напряжения поджига U (4 кВ/деление) и тока поджига I (250 А/деление). Масштаб по горизонтали 10 нс/деление.

пульс напряжения. После пробоя промежутка через цепь поджига протекает ток обмотки w_2 , медленно спадающий с постоянной времени L_{w_2}/R_{Π} , где L_{w_2} — индуктивность вторичной обмотки трансформатора Tr после насыщения сердечника, R_{Π} — сопротивление цепи поджига.

При включении разрядника через него протекает ток разряда силового конденсатора C_0 . Индуктивность L_0 ограничивает амплитуду и скорость нарастания силового тока. Диодный блок D_0 исключает возможность перезарядки C_0 . При этом обеспечивается высокая надежность работы силового конденсатора.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока поджига I и напряжения поджига U , соответствующие входному напряжению цепи управления $U_{вх} = 850$ В.

На рис. 4 представлены типичные для этих экспериментов осциллограммы силового тока I_0 (~9 кА), полученные при запуске осциллографа от поджигающего импульса U . Разброс моментов срабатывания разрядника не превышает 200 нс, что соответствует штатному уровню.

На рис. 5 приведен график, характеризующий зависимость времени включения РВУ-73С от амплитуды тока поджига, усредненный по результатам 50 коммутаций при напряжении силовой цепи 10 кВ. Время включения измерялось от начала импульса тока поджига до момента, когда скорость нарастания силового тока достигала максимальной величины. Амплитуда тока поджига регулировалась изменением входного напряжения цепи управления.

При фиксированном токе поджига время включения разрядника практически не изменя-

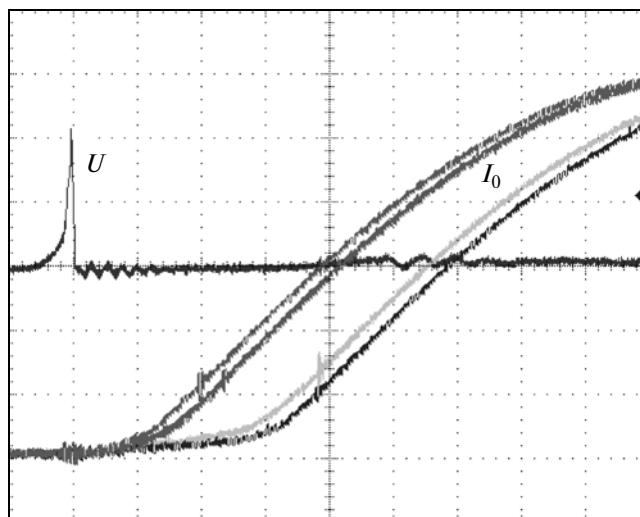


Рис. 4. Осциллограммы напряжения поджига U (8 кВ/деление) и силового тока I_0 (1.5 кА/деление). Масштаб по горизонтали 100 нс/деление.

лось при регулировании силового напряжения U_0 в диапазоне 5–15 кВ.

Недостатком рассмотренной цепи управления является большая амплитуда выходного напряжения U , необходимая для поджига разрядника. Она обусловлена большой скоростью нарастания поджигающего напряжения, определяемой высоким быстродействием прерывателя Π .

При большой скорости dU/dt за время развития пробоя поджигающего межэлектродного промежутка выходное напряжение цепи управления успевает нарасти до значительной величины (~18 кВ), что снижает ее надежность и повышает стоимость прерывателя Π , в котором необходимо использовать большое количество последовательно соединенных д.д.р.в.

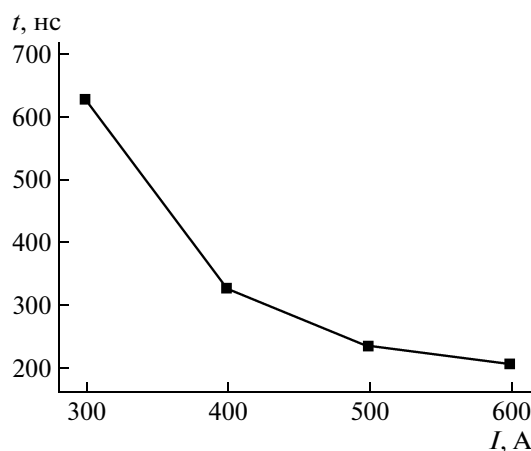


Рис. 5. Зависимость времени включения РВУ-73С от амплитуды тока поджига.

Радикальное уменьшение выходного напряжения цепи управления было получено при уменьшении скорости его нарастания путем подключения параллельно прерывателю Π шунтирующего конденсатора C (см. рис. 2).

При $C = 150$ пФ напряжение поджига U снизилось до 7 кВ. При $C = 1$ нФ включение разрядника происходило при $U < 4$ кВ.

Несмотря на существенное уменьшение амплитуды напряжения поджига, время включения РВУ-73С практически не изменилось по сравнению с режимом без шунтирующего конденсатора.

В режиме поджига РВУ-73С с помощью рассмотренной цепи управления и шунтирующего конденсатора $C = 1$ мкФ было осуществлено более 5 тысяч коммутаций импульсов силового тока с амплитудой ~ 12 кА без изменения технических характеристик разрядника и ЦУ.

На рис. 6 приведены типичные для проведенных испытаний осциллограммы выходного тока цепи управления I , напряжения поджига разрядника U и силового тока I_0 . Они получены при входном напряжении цепи управления ~ 900 В и напряжении зарядки силового конденсатора $C_0 \sim 12$ кВ.

Так как энергоемкость рассмотренной ЦУ не позволяет зарядить шунтирующий конденсатор $C = 1$ нФ до напряжения выше 12 кВ даже при отключенном разряднике, то в прерывателе Π использовалось 12 последовательно соединенных д.д.р.в с рабочим напряжением 1100 В. Кремниевые структуры диодов были напаяны друг на друга и помещены в изолирующий керамический корпус. Диаметр структур д.д.р.в. 16 мм, высота корпуса 15 мм.

Небольшие габариты разработанной цепи управления ($200 \times 100 \times 50$ мм), низкий уровень входного

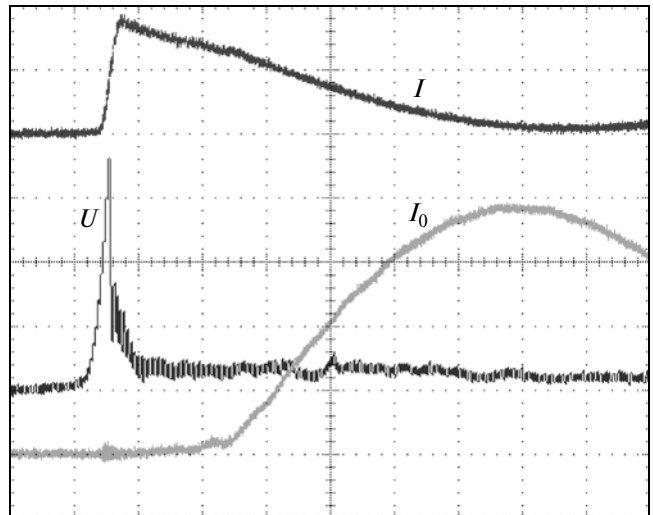


Рис. 6. Осциллограммы выходного тока цепи управления I (250 А/деление), напряжения поджига U (1 кВ/деление) и силового тока I_0 (3 кА/деление). Масштаб по горизонтали 200 нс/деление.

напряжения, а также малый (не более 2 нс) разброс моментов срабатывания и высокая (до 10 кГц) допустимая частота срабатывания определяют возможность ее широкого использования в цепях поджига вакуумных разрядников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. // ПТЭ. 1995. № 1. С. 98.
2. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 7. С. 435.