

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ  
В НЕТРАДИЦИОННОМ РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ  
СУБМИКРОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА УПРАВЛЕНИЯ© 2022 г. С. В. Коротков<sup>а,\*</sup>, А. Л. Жмодиков<sup>а</sup>, Д. А. Коротков<sup>а</sup><sup>а</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

\*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 01.03.2022 г.

Принята к публикации 12.03.2022 г.

Приведены результаты оптимизации мощного коммутатора, состоящего из блока реверсивно включаемых динисторов с диаметром структур 50 мм, блока запуска динисторов и дросселя с насыщающимся сердечником, который обеспечивает уменьшение мощности блока запуска путем создания задержки резкого нарастания основного тока при протекании тока управления, имеющего противоположную полярность. Показано, что требуемое для существенного уменьшения габаритов и индуктивности дросселя уменьшение традиционной микросекундной длительности запускающего воздействия до нескольких сотен наносекунд не приводит к увеличению потерь энергии в динисторах, если ток управления имеет достаточно большую амплитуду, и величина запускающего заряда не изменяется. Описана конструкция оптимизированного коммутатора, имеющего индуктивность ~200 нГн и рабочее напряжение 16 кВ. Показана возможность его долговременного использования для коммутации импульсов тока с амплитудой ~100 кА, нарастающих со скоростью ~30 кА/мкс.

DOI: 10.31857/S003281622204022X

В настоящее время в мощных устройствах сильноточной импульсной техники широко используются коммутаторы на основе тиристоров. Основным фактором, ограничивающим коммутационные возможности тиристоров, является то, что их включение осуществляется током, протекающим через электрод управления. В результате сначала включаются узкие участки их полупроводниковых структур, прилегающие к этому электроду. Неоднородное по площади включение определяет большие потери энергии при коммутации мощных, быстро нарастающих импульсов тока. В специальных импульсных тиристорах уменьшение потерь энергии после переключения достигается путем создания в их структурах большого количества специальных ячеек с очень малым размером, которые обеспечивают увеличение суммарной площади первоначального включения. Такая конструкция существенно усложняет технологию изготовления импульсных тиристоров. Поэтому их стоимость значительно превышает стоимость стандартных тиристоров, используемых в преобразовательной технике.

Существенно большие коммутационные возможности имеют двухэлектродные полупроводниковые приборы тиристорного типа – реверсив-

но включаемые динисторы (РВД) [1, 2]. Они не имеют электрода управления и включаются током, который пропускается через всю площадь их структур в результате изменения полярности (реверса) исходного напряжения. Технологии производства РВД и стандартных тиристоров практически одинаковы. Особенностью конструкции РВД является то, что в анодный эмиттер  $p^+$  их четырехслойной  $p^+ - n - p - n^+$ -структуры введены малогабаритные шунты  $n^+$ , которые распределены равномерно по площади эмиттера  $p^+$ .

На рис. 1 приведена упрощенная схема РВД-генератора. В этой схеме при включении блока запуска БЗ к структуре РВД прикладывается небольшое обратное напряжение. В результате происходит пробой низковольтного  $p - n^+$ -перехода, и шунты  $n^+$  инжектируют в  $n$ -базу потоки электронов, которые расширяются к коллекторному  $n - p$ -переходу. Через образовавшиеся каналы обратной проводимости протекает ток управления  $I_y$ . Поскольку шунты  $n^+$  расположены на небольшом расстоянии друг от друга, ток  $I_y$  распределяется достаточно равномерно по всей площади структуры РВД. В процессе протекания тока  $I_y$  вблизи высоковольтного  $n - p$ -перехода образует-

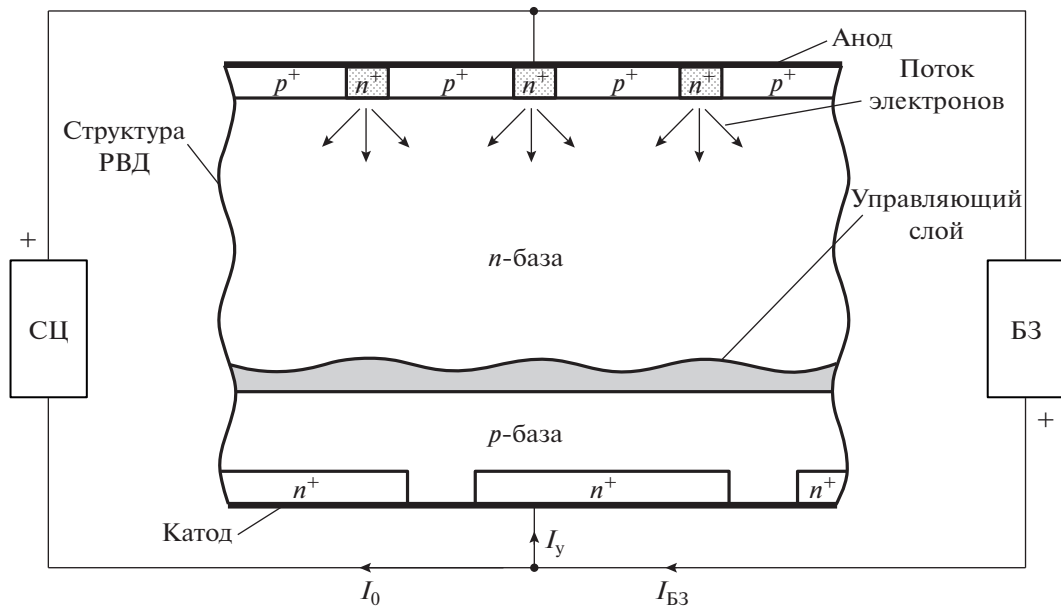


Рис. 1. Структура РВД в схеме импульсного генератора. БЗ – блок запуска; СЦ – силовая цепь.

ся управляющий слой дырок. Этот слой инициирует включение РВД после восстановления исходной полярности напряжения. Равномерность распределения дырок в управляющем слое зависит от расстояния между шунтами  $n^+$ .

После окончания тока управления через РВД протекает основной ток  $I_0$ , который выносит дырки из управляющего слоя. Перемещение дырок в  $p$ -базу обуславливает инжекцию электронов из катодного  $n^+$ -эмиттера, которая происходит одновременно по всей площади РВД-структуры.

Эти электроны, а также дырки, оставшиеся в управляющем слое, определяют начальную проводимость РВД. Если управляющий слой не истощается полностью за время пролета электронов через  $p$ -базу, то начальная проводимость РВД достаточно высока. Модуляция проводимости РВД осуществляется путем заполнения базовых слоев носителями, инжектируемыми из катодного и анодного эмиттеров. Время установления стационарной проводимости РВД зависит от геометрических и электрофизических параметров их структур. Так, в РВД с рабочим напряжением 2–3 кВ оно составляет несколько сотен наносекунд. После окончания основного тока выключение РВД осуществляется в результате рекомбинации накопленной электронно-дырочной плазмы. Поскольку РВД переключается в хорошо проводящее состояние без задержки относительно момента окончания тока управления, при запуске общим током последовательно соединенные динисторы включаются синхронно. В результате обеспечивается высокая надежность высоковольтных блоков РВД.

Фундаментальным недостатком, затрудняющим использование блоков РВД в генераторах, построенных по схеме на рис. 1, является то, что для создания тока управления  $I_y$  выходной ток блока запуска  $I_{БЗ}$  должен нарастать быстрее, чем ток  $I_0$ . Этот недостаток устранен в хорошо известной схеме, показанной на рис. 2, путем подключения последовательно с блоком РВД дросселя  $L_0$  с насыщающимся сердечником.

Схема на рис. 2 работает следующим образом. Изначно к блоку РВД приложено напряжение си-

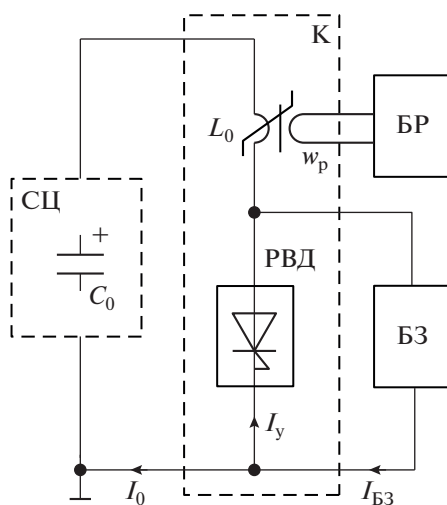


Рис. 2. Схема генератора на основе высоковольтного блока РВД. СЦ – силовая цепь; БЗ – блок запуска; БР – блок размагничивания; К – высоковольтный коммутатор.

ловой цепи СЦ ( $U_0$ ). В момент включения блока запуска БЗ большая индуктивность дросселя  $L_0$  препятствует резкому нарастанию основного тока  $I_0$ . После включения БЗ к блоку РВД прикладывается обратное напряжение и через него протекает ток управления  $I_y$ , примерно равный току  $I_{БЗ}$ . Когда через блок РВД протекает ток  $I_y$ , к дросселю  $L_0$  приложено высокое напряжение  $U_0$ . Поэтому спустя небольшой интервал времени сердечник дросселя насыщается. В результате индуктивность дросселя  $L_0$  резко уменьшается, и ток  $I_0$  быстро нарастает. В процессе нарастания тока  $I_0$  к блоку РВД прикладывается напряжение исходной полярности и он включается.

После коммутации тока  $I_0$  сердечник дросселя  $L_0$  переводится в исходное насыщенное состояние путем пропускания через обмотку  $w_p$  небольшого тока, формируемого низковольтным блоком размагничивания БР. В результате при следующем включении блока РВД достигаются максимальное изменение магнитной индукции в материале сердечника ( $\Delta B = 2B_s$ , где  $B_s$  – индукция насыщения) и максимальная задержка резкого нарастания основного тока ( $\Delta T = 2B_s w S / U_0$ , где  $w$  – число витков рабочей обмотки,  $S$  – площадь сечения сердечника).

Величина запускающего заряда, вводимого в структуры РВД при управляющем воздействии, определяется амплитудой тока управления и его длительностью ( $T_y$ ). В схеме на рис. 2 величина  $T_y$  фактически равна величине  $\Delta T$ . Поскольку индуктивность дросселя после насыщения сердечника пропорциональна произведению  $w^2 S$ , а скорость нарастания основного тока обратно пропорциональна этой индуктивности, высокое значение  $dI_0/dt$  может быть достигнуто только при малой индуктивности дросселя и, соответственно, малой величине  $\Delta T$ , которая определяет малую длительность тока управления.

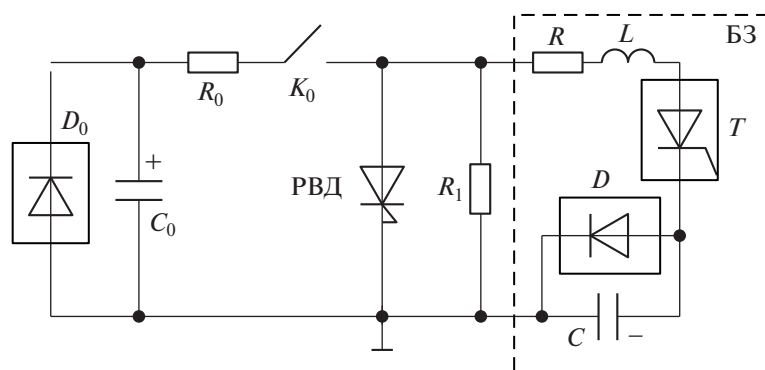
Поскольку при малой длительности запускающего воздействия малые потери энергии при включении РВД с большим диаметром структур обеспечиваются при большой амплитуде тока управления, возникает проблема разработки мощных устройств, способных коммутировать такой ток. По этой причине, а также в связи с неисследованной возможностью негативного влияния скин-эффекта на равномерность распределения тока управления по площади РВД запуск высоковольтных блоков РВД традиционно осуществлялся сравнительно маломощными импульсами с длительностью более 1.5 мкс. В результате в известных высоковольтных РВД-генераторах [3–10] разделительные дроссели  $L_0$  имели большую индуктивность в насыщенном состоянии и не позволяли обеспечить предельно допустимую для одиночных динисторов скорость нарастания основного тока.

Наши исследования [11] показали, что малогабаритные стандартные тиристоры могут эффективно коммутировать мощные импульсы тока с длительностью менее 1 мкс, если амплитуда и скорость нарастания тока через электроды управления будут существенно выше паспортных значений. В данной статье приведены результаты исследования возможности использования полученных ранее результатов для радикального уменьшения длительности запускающего воздействия при переключении высоковольтных блоков РВД.

Для оценки перспектив использования РВД в нетрадиционном режиме, с очень малой длительностью импульсов тока управления, были выбраны мощные РВД с диаметром структур 50 мм и рабочим напряжением 2 кВ, изготовленные в Научно-инженерном центре силовых полупроводниковых приборов (НИЦ СПП) ПАО “Электровыпрямитель” (г. Саранск).

Исследования проводились на стенде, построенном по схеме на рис. 3. При включении блока запуска БЗ в исследуемый РВД коммутируется импульс тока управления  $I_y$  с фронтом длительностью менее 1 мкс. После включения ключа  $K_0$  через РВД протекает основной ток  $I_0 \gg I_y$ , который является током разряда конденсатора  $C_0$ . Длительность тока  $I_y$  определяется задержкой момента включения  $K_0$  относительно момента включения блока БЗ. Амплитуда и скорость нарастания тока  $I_0$  определяются емкостью и напряжением зарядки конденсатора  $C_0$ , а также сопротивлением резистора  $R_0$  и величиной монтажной индуктивности цепи разряда  $C_0$ .

В качестве ключа  $K_0$  использовался игнитрон ИРТ6. Диодный блок  $D_0$  (3 последовательно соединенных ДЛ123-320-18) обеспечивал униполярную форму основного тока. Блок запуска БЗ содержал конденсатор  $C$ , заряженный до напряжения  $U_C$ , индуктивность  $L$ , резистор  $R$ , блок тиристоров  $T$  и диодный блок  $D$ . Резистор  $R$  имел сопротивление, существенно большее, чем сопротивление РВД во включенном состоянии, и препятствовал ответвлению основного тока в блок БЗ. Блок  $D$  (4 последовательно соединенных ДЛ123-320-18) обеспечивал медленный спад выходного тока блока БЗ после достижения максимального значения. В результате обеспечивалась большая длительность этого тока при малом фронте и создавалась возможность эффективно повышать величину пропускаемого через РВД запускающего заряда путем увеличения задержки между включением ключа  $K_0$  и блока тиристоров  $T$ . Блок  $T$  состоял из трех последовательно соединенных тиристоров ТБ133-250-24, которые включались с помощью мощной цепи запуска, описанной в работе [11]. Эта цепь содержала транзистор, запускающий конденсатор, заряженный до



**Рис. 3.** Электрическая схема стенда для исследований РВД.  $K_0$  – игнитрон ИРТ6;  $D_0$  – ДЛ123-320-18 (3 последовательно соединенных);  $D$  – ДЛ123-320-18 (4 последовательно соединенных);  $T$  – ТБ133-250-24 (3 последовательно соединенных).

напряжения 800 В, и блок малогабаритных импульсных трансформаторов, обеспечивающих протекание через электроды управления тиристоров импульсов тока с амплитудой  $\sim 6$  А, фронтом  $\sim 0.3$  мкс и длительностью  $\sim 3$  мкс, которые обеспечивали их синхронное включение с малыми коммутационными потерями энергии.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы падения напряжения  $U$  на РВД при протекании тока  $I$  с амплитудой  $\sim 10$  кА, нарастающего со скоростью  $\sim 7$  кА/мкс. Они получены при включении РВД импульсами тока управления, имеющими примерно одинаковую длительность ( $\sim 0.6$  мкс) и разную амплитуду ( $\sim 1200$  А на рис. 4а и  $\sim 600$  А на рис. 4б).

Поскольку РВД был зашунтирован резистором  $R_1$ , в исходном состоянии напряжение на нем очень мало. В результате достигалась высокая точность измерения небольшого напряжения  $U$ , так как до момента включения РВД не требовалось ограничивать входное напряжение электронного осциллографа. Напряжение  $U$  измерялось щупом Tektronix P5100А. Для измерения тока использовался датчик тока Pearson current monitor 410. Полупроводниковые структуры РВД были помещены в защитные металлокерамические корпуса таблеточного типа с диаметром около 75 мм и высотой около 15 мм. Падение напряжения на собственной индуктивности этих корпусов составляло существенную часть измеряемого напряжения  $U$ .

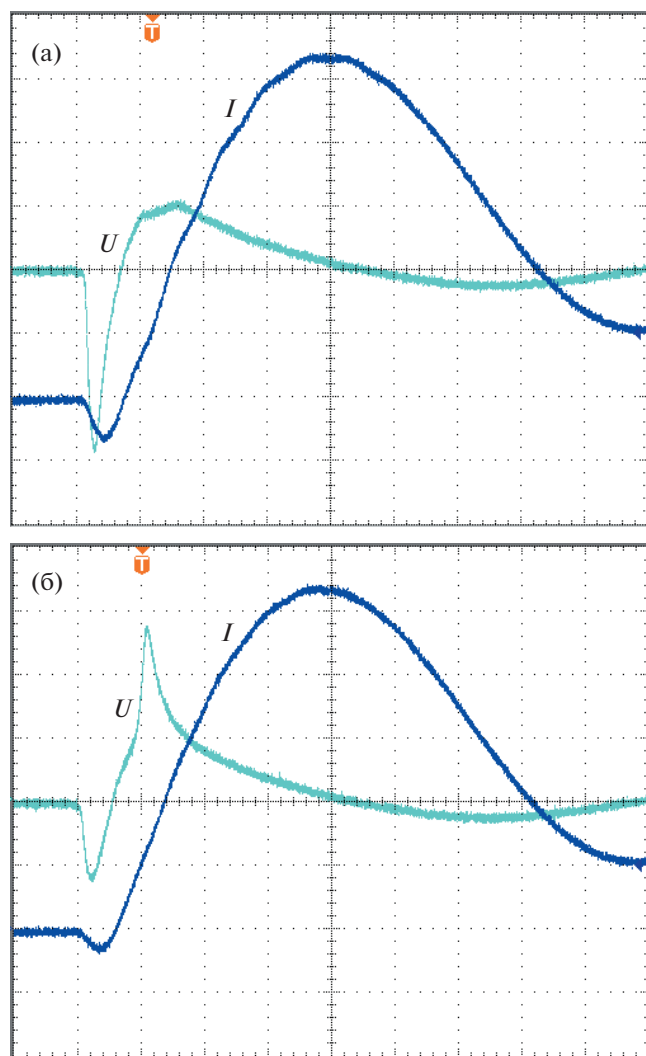
Как видно из осциллограмм, в процессе нарастания основного тока на РВД возникает пик напряжения, амплитуда которого существенно зависит от величины заряда, пропущенного через его структуру при протекании тока управления. Этот пик определяет потери энергии в РВД после включения и характеризует эффективность запускающего воздействия. Если амплитуда и длительность тока управления не изменялись, то коммутационный пик напряжения уменьшался

при снижении скорости нарастания тока  $I$ . Так, например, амплитуда показанного на рис. 4б пика напряжения становилась примерно равной амплитуде пика напряжения на рис. 4а, когда скорость нарастания тока  $I$  была уменьшена в 1.5 раза.

На рис. 5 в другом масштабе показаны осциллограммы процесса коммутации импульсов тока  $I$ , которые были получены при пропускании через РВД одинакового запускающего заряда ( $\sim 250$  мкКл) при разной длительности импульсов тока управления: 2 мкс (кривые  $I_1$ ,  $U_1$ ) и 0.8 мкс (кривые  $I_2$ ,  $U_2$ ). Согласно осциллограммам, при одинаковом запускающем заряде падение напряжения на РВД при коммутации одинаковых, быстро нарастающих импульсов тока практически не меняется при уменьшении длительности тока управления от традиционного микросекундного уровня до нескольких сотен наносекунд.

Исследования РВД были продолжены при использовании ранее разработанного тестирующего устройства [12], которое было построено аналогично стенду на рис. 3, но обеспечивало существенно большую амплитуду и скорость нарастания основного тока. При проведении экспериментов в этом устройстве блок запуска РВД с микросекундной длительностью импульсов был заменен на блок запуска, схема которого показана на рис. 3.

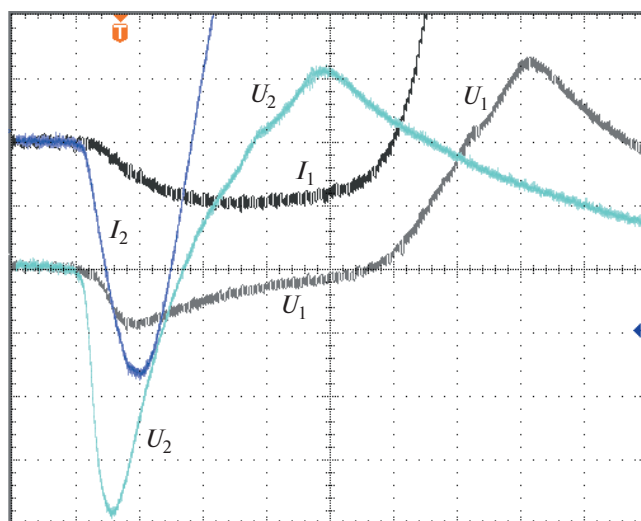
Результаты исследований иллюстрируют осциллограммы на рис. 6, полученные при запуске РВД импульсами тока управления с амплитудой  $\sim 1.5$  кА и длительностью  $\sim 700$  нс. Согласно осциллограммам, при коммутации тока  $I$  с амплитудой  $\sim 22$  кА, нарастающего со скоростью  $\sim 30$  кА/мкс, падение напряжения на РВД невелико, что предполагает возможность долговременной работы. Для подтверждения этой возможности было проведено по 1000 включений десяти произвольно выбранных РВД. Через несколько минут после окончания цикла испытаний измерялся ток, протекающий через диносторы при приложении постоянного напряжения 2 кВ. В результате было



**Рис. 4.** Осциллограммы падения напряжения  $U$  на РВД при протекании тока  $I$ , полученные при включении РВД импульсами тока управления примерно одинаковой длительности ( $\sim 0.6$  мкс), но разной амплитуды:  $\sim 1200$  А (а) и  $\sim 600$  А (б). Масштаб по вертикали: тока – 2 кА/деление, напряжения – 50 В/деление; по горизонтали – 1 мкс/деление.

установлено, что величина этого тока практически не отличается от исходной величины, измененной до проведения испытаний, что, как известно, определяет отсутствие деградации РВД-структур.

Для определения возможности эффективного переключения высоковольтных блоков РВД субмикросекундными импульсами тока управления по схеме на рис. 2 был разработан опытный генератор. Силовая цепь СЦ содержала 4 конденсатора ИК-25-30-УХЛ4 емкостью 25 мкФ и демпфирующий резистор сопротивлением  $\sim 50$  МОм. Параллельно каждому конденсатору был подключен диодный блок (9 последовательно соединенных



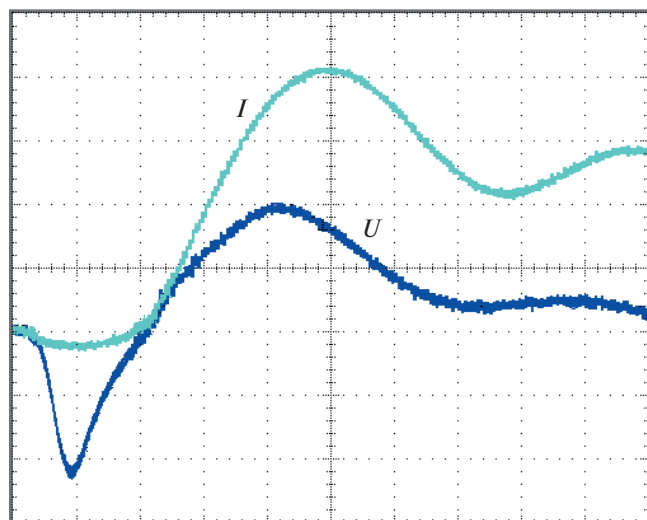
**Рис. 5.** Осциллограммы тока через РВД и напряжения на РВД при одинаковом запускающем заряде ( $\sim 250$  мкКл) и разных длительностях тока управления: 2 мкс ( $I_1$ ,  $U_1$ ) и 0.8 мкс ( $I_2$ ,  $U_2$ ). Масштаб по вертикали: тока – 200 А/деление, напряжения – 20 В/деление; по горизонтали – 400 нс/деление.

ДЛ123-320-18), который обеспечивал униполярную форму основного тока.

Высоковольтный коммутатор  $K$  состоял из блока последовательно соединенных РВД и одновиткового дросселя  $L_0$ . Сердечник дросселя  $L_0$  был выполнен из десяти тороидальных магнитопроводов из сплава 9КСР и имел размеры  $75 \times 25 \times 200$  мм. После коммутации основного тока он перемагничивался до состояния насыщения путем пропускания выходного тока низковольтного блока размагничивания БР (3 А) через одновитковую обмотку размагничивания  $w_p$ . В блоке РВД использовались 9 динисторов с диаметром структур 50 мм и рабочим напряжением 2 кВ. Включение динисторов осуществлялось блоком запуска БЗ, который был выполнен так же, как и блок запуска в схеме на рис. 3. Поскольку в опытном генераторе, построенном по схеме на рис. 2, к блоку  $T$  в исходном состоянии прикладывается суммарное напряжение зарядки конденсаторов  $C_0$  и  $C$ , количество тиристоров в этом блоке было увеличено до 10.

Малую индуктивность коммутатора  $K$ , необходимую для создания высокой скорости нарастания основного тока, обеспечивала коаксиальная конструкция блоков РВД и  $L_0$ , показанная на рис. 7.

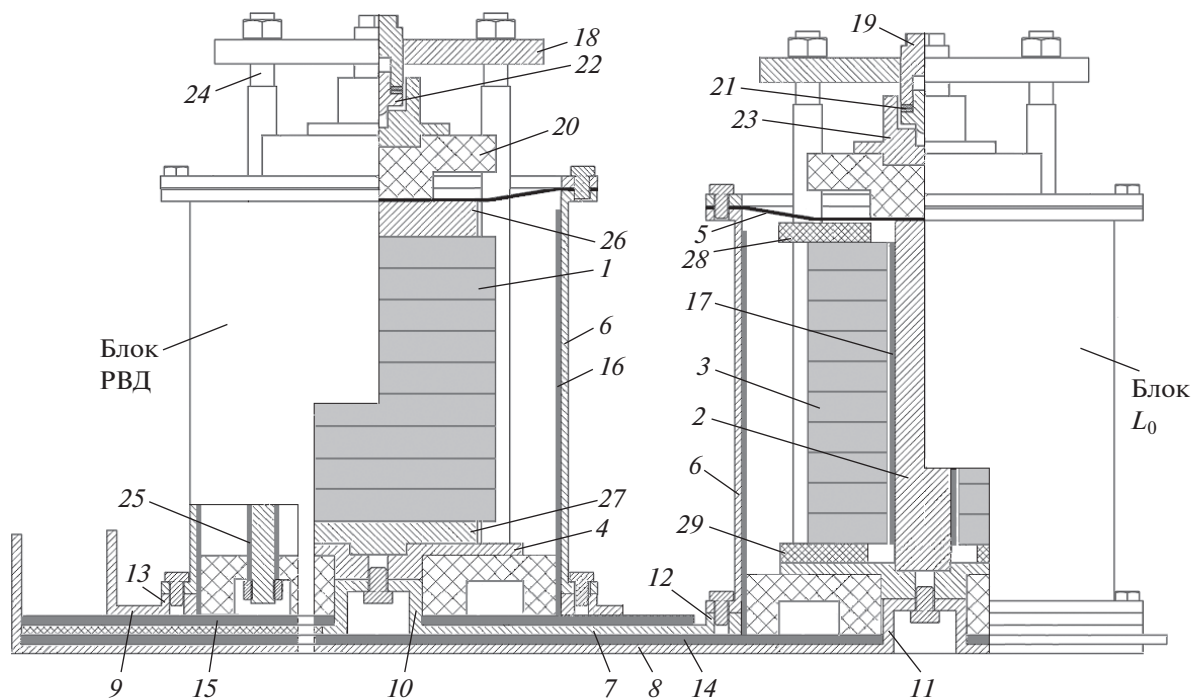
В блоке РВД внутренний токопровод содержит сборку динисторов  $I$ , а в блоке  $L_0$  – цилиндрический электрод 2, который является витком рабочей обмотки дросселя. На электроде 2 размещена сборка тороидальных магнитопроводов 3.



**Рис. 6.** Осциллограммы падения напряжения  $U$  на РВД в процессе коммутации мощного, быстро нарастающего импульса тока с амплитудой  $\sim 1.5$  кА и длительностью  $\sim 700$  нс. Масштаб по вертикали: тока – 5 кА/деление, напряжения – 100 В/деление; по горизонтали – 400 нс/деление.

Подвод тока к сборкам  $1, 3$  осуществляется через дисковые электроды  $5$ , цилиндрические электроды  $4, 26, 27$  и коаксиально расположенные наружные электроды  $6$ . Последовательное соединение блоков РВД и  $L_0$ , а также подключение их к силовой цепи осуществляются широкими шинами  $7-9$ , расположенными бифилярно. Электрический контакт обеспечивается с помощью втулок  $10, 11$  и дисков  $12, 13$ , приваренных к этим шинам.

Требуемая электрическая прочность блоков РВД и  $L_0$  достигается при использовании слоев лавсановой пленки  $14-17$ . Электрический контакт между внутренними частями блоков РВД и  $L_0$  осуществляется с помощью прижимных узлов, которые состоят из элементов  $18-23$ . Для крепления опорных пластин  $18$  используются стальные шпильки  $24$ , изолированные с помощью силиконовых трубок  $25$ . Прижимное усилие создается болтом  $19$  и передается на диэлектрические пластины  $20$  с помощью пружинных шайб  $21$ , подвижных наконечников  $22$  и втулок  $23$ . Массивные электроды  $26, 27$  обеспечивают равномерное распределение прижимного усилия. Диэлектрические диски  $28, 29$  устраняют возможность перемещения магнитопроводов  $3$  вдоль цилиндра  $2$ .



**Рис. 7.** Конструкция высоковольтного коммутатора. Блок РВД – коаксиальный блок на основе последовательно соединенных РВД с диаметром структур 50 мм; блок  $L_0$  – коаксиальный блок на основе тороидальных магнитопроводов из сплава 9КСР;  $1$  – сборка РВД;  $2, 4-6, 10-13$  – токоподводящие электроды;  $3$  – сборка магнитопроводов;  $7-9$  – шины;  $14-17$  – слой лавсановой пленки;  $18$  – опорные пластины;  $24$  – шпильки;  $25$  – силиконовые трубки;  $19$  – прижимные болты;  $20$  – диэлектрические пластины;  $21$  – пружинные шайбы;  $22$  – наконечники;  $23$  – втулки;  $26, 27$  – массивные электроды;  $28, 29$  – диэлектрические диски.

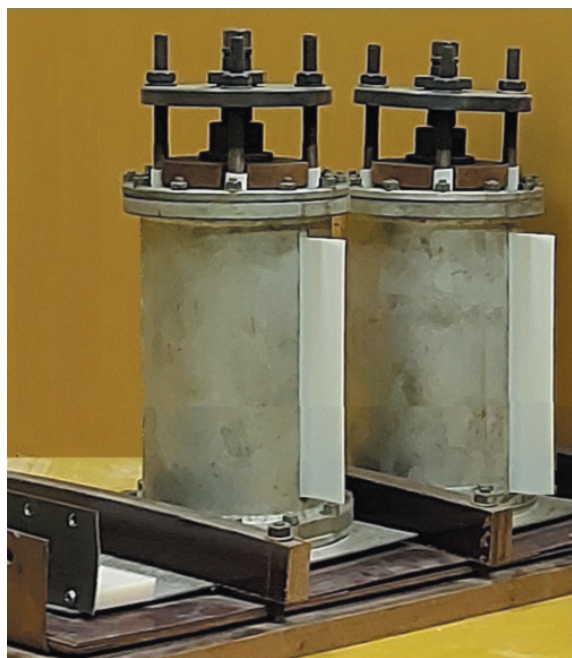


Рис. 8. Внешний вид высоковольтного коммутатора.

Для перемагничивания магнитопроводов  $3$  использовался высоковольтный провод, который был помещен в паз, выполненный в цилиндре  $2$ , и выводился из блока  $L_0$  через разрезы в элементах  $6, 28, 29$ .

На рис. 8 показана фотография высоковольтного коммутатора. Разрез в расположенном на переднем плане блоке РВД обеспечивает возможность подключения блока запуска БЗ. Аналогичный разрез в блоке  $L_0$  позволяет соединить провод обмотки размагничивания с блоком размагничивания БР. Выступающая из разрезов лавсановая пленка является частью изоляционных слоев  $16$  на рис. 7. Массивные текстолитовые планки позволяют фиксировать токоподводящие бифилярные шины в процессе протекания силового тока.

На рис. 9 приведены осциллограммы основного тока  $I_0$  и тока блока запуска  $I_{БЗ}$ , полученные при испытаниях коммутатора в ранее описанном опытном генераторе. Они соответствуют эксперименту, в котором конденсаторы основной цепи и цепи блока запуска были заряжены до напряжений  $U_0 = 16$  кВ и  $U_C = 6$  кВ.

Как видно из осциллограмм, очень малая собственная индуктивность высоковольтного коммутатора (не более 200 нГн) и малые потери энергии в блоке РВД обеспечивают возможность коммутации тока  $I_0$  с амплитудой 115 кА и скоростью нарастания 30 кА/мкс. Задержка импульса тока  $I_0$  относительно импульса тока  $I_{БЗ}$  составляет  $\sim 700$  нс. В течение этого времени через блок РВД протекает ток управления. Амплитуда тока управления

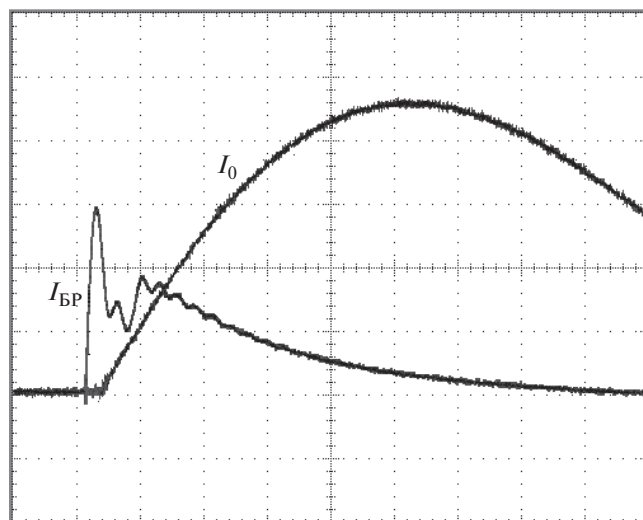


Рис. 9. Осциллограммы силового тока  $I_0$  (25 кА/деление) и тока блока запуска  $I_{БЗ}$  (500 А/деление). Масштаб по горизонтали 2 мкс/деление.

примерно равна амплитуде тока  $I_{БЗ}$  (1500 А). Увеличение тока  $I_{БЗ}$  в процессе нарастания тока  $I_0$  свидетельствует о том, что после включения блока РВД в блок запуска БЗ ответвляется небольшой ток силовой цепи. Величина этого тока определяется соотношением между сопротивлением резистора  $R$  в блоке запуска БЗ и сопротивлением блока РВД при протекании основного тока.

В рассмотренном режиме высоковольтный РВД-коммутатор был успешно испытан при проведении 5 циклов коммутаций тока  $I_0$ . Цикл состоял из 50-ти включений с интервалом в несколько минут. После каждого цикла измерялся ток через блок РВД при приложении к нему постоянного напряжения 16 кВ. Величина этого тока практически не изменялась, что свидетельствовало о долговременной надежности блока РВД в рассмотренных условиях эксплуатации.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при субмикросекундной длительности управляющего воздействия РВД с диаметром структур 50 мм способны эффективно коммутировать мощные импульсы тока, нарастающие со скоростью 30 кА/мкс. Высоковольтный коммутатор на их основе позволяет за время менее 10 мкс коммутировать мощность более 1 ГВт.

Разработанная конструкция РВД-коммутатора позволяет изменять размер сердечника дросселя и диаметр динисторных структур. Рабочее напряжение коммутатора может быть радикально увеличено путем подключения дополнительных коаксиальных блоков с помощью дополнительных бифилярных шин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grekhov I.V., Gorbatyuk A.V., Kostina L.S., Korotkov S.V., Yakovthuk N.S. // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. № 11. P. 1132.
2. Коротков С.В. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 5.
3. Грехов И.В., Коротков С.В., Андреев А.Г., Козлов А.К., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 51.
4. Schneider S., Podlesak T.F. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 28. № 5. P. 1520. <https://doi.org/10.1109/27.901225>
5. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 53.
6. Фридман Б.Э., Коротков С.В., Мартыненко В.А., Еникеев Р.Ш., Коврижных Н.А., Аристов Ю.В., Беляков В.А., Бондарчук Э.Н., Дроздов А.А., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Муратов В.П., Прокопенко В.Ф., Рошаль А.Г., Фролов О.В., Ханугин А.А., Чегодаев А.Т., Чумаков Г.Д. // ПТЭ. 2008. № 6. С. 51.
7. He X., Wang H., Xie B., Chen W., Zhou J., Tang J. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. V. 39. № 1. P. 285. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2047870>
8. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 58. <https://doi.org/10.7868/S0032816214020281>
9. Wang H., Zeng Z., He X., Chen W., Xie L., Guo F., Li J., Zhang G. // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. V. 29. № 12. P. 6245. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.232705>
10. Арзев А.Г., Галахов И.В., Ганин Л.С., Гришанин А.В., Елисеев В.В., Картаев В.Н., Коженков Е.В., Креков А.В., Мартыненко В.А., Мускатыньев В.Г., Наумов Д.А., Немаев Д.Ю., Осин В.А., Свиридов В.В., Фролов О.В., Ханугин А.А. // ПТЭ. 2021. № 4. С. 33. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040133>
11. Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2021. № 3. С. 55. <https://doi.org/10.1134/S0020441221030295>
12. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л. // ПТЭ. 2022. № 3. С. 34. doi 10.31857/S0032816222030090