

## МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ

© 2022 г. С. В. Коротков<sup>а,\*</sup>, Ю. В. Аристов<sup>а</sup>, А. Л. Жмодиков<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 21.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Рассмотрены два мощных импульсных устройства, предназначенные для исследования реверсивно включаемых динисторов (р.в.д.) с диаметром структур до 80 мм в сильноточных импульсных режимах. Исследование р.в.д. осуществлялось путем измерения падения напряжения при разных амплитудах и длительностях импульсов силового тока и тока управления. Одно из устройств позволяет исследовать р.в.д. при протекании импульсов силового тока с амплитудой до 20 кА и очень высокой скоростью нарастания (до 20 кА/мкс). Другое устройство предназначено для исследования р.в.д. в режиме коммутации импульсов силового тока с очень большой амплитудой (до 200 кА) и длительностью до 90 мкс. Описаны блоки запуска р.в.д., позволяющие формировать импульсы тока управления с фронтом 1.5 мкс и амплитудой до 1.5 кА.

DOI: 10.31857/S0032816222030090

Реверсивно включаемые динисторы (р.в.д.) были разработаны в ФТИ им. А.Ф. Иоффе специально для использования в мощных силовых цепях с очень высокими скоростями нарастания тока [1, 2]. Основным достоинством р.в.д. является то, что они включаются однородно по всей рабочей площади, что обеспечивает очень малые коммутационные потери энергии. Такое включение достигается благодаря оригинальным конструкциям р.в.д. и способу их включения.

В отличие от тиристоров, в р.в.д. нет электрода управления. Другой отличительной особенностью р.в.д. является то, что их структуры содержат плотную систему узких каналов обратной проводимости, которые распределены равномерно по всей рабочей площади. Включение р.в.д. осуществляется путем реверса блокируемого напряжения и пропускания через каналы обратной проводимости короткого (<2 мкс) и достаточно мощного (>20 А/см<sup>2</sup>) тока управления. В результате в структурах р.в.д. практически однородно накапливается заряд запускающих носителей. При достаточной величине накопленного заряда включение р.в.д. происходит одновременно по всей рабочей площади и без задержки относительно момента окончания тока управления.

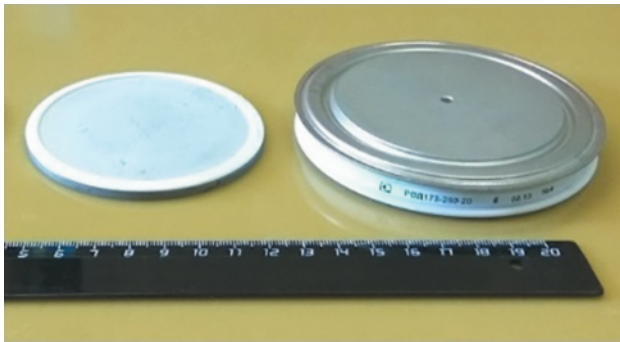
Однородное включение р.в.д. обеспечивает возможность эффективной коммутации мощных, быстро нарастающих импульсов тока [3–7].

Отсутствие задержки включения позволяет синхронно включать большое количество р.в.д. общим импульсом тока управления.

Основным недостатком р.в.д. является то, что на процесс формирования тока управления  $I_y$  существенно влияет силовая цепь. Поскольку ток  $I_y$  представляет собой разность между током блока запуска  $I_{\beta 3}$  и силовым током  $I_0$ , в традиционных силовых цепях он создается только тогда, когда скорость нарастания тока  $I_{\beta 3}$  больше скорости нарастания тока  $I_0$ . Радикальное уменьшение  $dI_{\beta 3}/dt$  достигается путем введения в силовую цепь дросселя с насыщающимся сердечником, который препятствует резкому нарастанию силового тока в процессе управляющего воздействия.

В настоящее время в Научно-инженерном центре силовых полупроводниковых приборов (НИЦ СПП) ПАО “Электровыпрямитель” (г. Саранск) освоен выпуск опытных партий р.в.д. с диаметром структур от 16 до 80 мм и предельно допустимым напряжением более 2 кВ. На рис. 1 показаны структура р.в.д. с диаметром 76 мм и металлокерамический корпус с этой структурой.

Основной проблемой при наладке серийного производства р.в.д. является отсутствие оборудования, обеспечивающего проведение выходных испытаний динисторов. Это обусловлено, во-первых, оригинальным способом включения р.в.д., который радикально отличается от спосо-



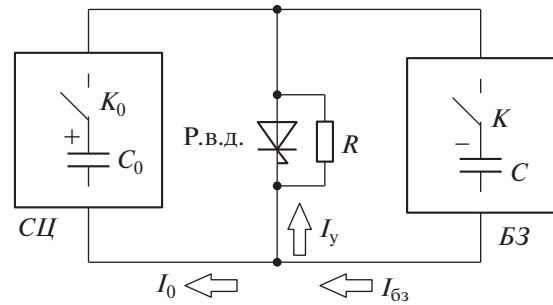
**Рис. 1.** Структура реверсивно включаемого динистора с диаметром 76 мм (слева) и защитный корпус с этой структурой (справа).

бов включения традиционных силовых полупроводниковых приборов, а во-вторых, очень высокими рабочими характеристиками р.в.д. (очень большими амплитудой и скоростью нарастания силового тока), которые должны быть обеспечены при тестировании.

В связи с этим в ФТИ были разработаны мощные импульсные устройства, позволяющие исследовать р.в.д. после их изготовления.

Для исследования в режиме коммутации мощных импульсов тока с очень высокими скоростью нарастания (до 20 кА/мкс) и амплитудой (до 200 кА) были разработаны импульсные устройства ИУ<sub>1</sub> и ИУ<sub>2</sub>. Их основные технические характеристики приведены в табл. 1.

На рис. 2 показана блок-схема разработанных импульсных устройств. В схеме конденсатор *C* блока запуска *БЗ* и конденсатор *C*<sub>0</sub> силовой цепи *СЦ* исходно заряжены до напряжений *U*<sub>с</sub>, *U*<sub>0</sub> в указанной на рисунке полярности. Реверсивно включаемый динистор шунтирован резистором *R* (несколько килоом), поэтому исходное напряжение на нем невелико (много меньше *U*<sub>с</sub>, *U*<sub>0</sub>). В этом случае при измерении небольшого падения напряжения на р.в.д. после его переключения



**Рис. 2.** Упрощенная схема импульсных устройств для исследования р.в.д. *СЦ* – силовая цепь; *БЗ* – блок запуска.

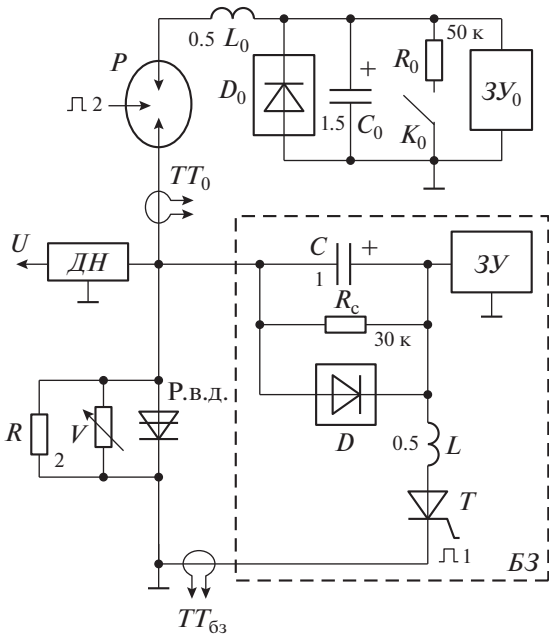
не надо ограничивать сигнал на входе осциллографа. После включения ключа *K* в цепи *БЗ* формируется ток *I*<sub>63</sub>. В результате через р.в.д. в обратном направлении будет протекать ток управления *I*<sub>у</sub>, который равен току *I*<sub>63</sub>. После включения ключа *K*<sub>0</sub> в цепи *СЦ* формируется мощный быстро нарастающий импульс тока *I*<sub>0</sub>. Поскольку *I*<sub>0</sub> ≫ *I*<sub>63</sub>, полярность тока через р.в.д. изменяется. В результате р.в.д. без задержки включается и коммутирует импульс силового тока.

Электрическая схема устройства ИУ<sub>1</sub> показана на рис. 3. В этой схеме переключение исследуемого р.в.д. осуществляется блоком запуска *БЗ*, содержащим конденсатор *C*, индуктивность *L* и ключ *T*, в качестве которого использован тиристор ТБ133-250-24. Силовая цепь состоит из последовательно соединенных конденсатора *C*<sub>0</sub>, индуктивности *L*<sub>0</sub> и малогабаритного вакуумного разрядника *P*. В качестве разрядника *P* используется РВУ-73С, способный эффективно включаться при изменении силового напряжения от 100 В до 16 кВ. Принципиальной особенностью РВУ-73С является то, что его анодные и катодные электроды выполнены в виде параллельных близкорасположенных стержней. В результате достигается эффективное использование всего рабочего объема и обеспечивается возможность быстрой коммутации больших импульсных токов.

Принцип действия ИУ<sub>1</sub> заключается в следующем. После включения тиристора *T* через р.в.д. в обратном направлении протекает ток управления. Его амплитуда и скорость нарастания определяются параметрами элементов блока запуска *БЗ*, а также напряжением зарядки конденсатора *C* (до 2300 В). После включения разрядника *P* через р.в.д. в прямом направлении протекает силовой ток, амплитуда и скорость нарастания которого определяются напряжением зарядки *C*<sub>0</sub> (до 10 кВ), а также величинами емкости *C*<sub>0</sub> и индуктивности монтажных проводов *L*<sub>0</sub>. Блоки последовательно соединенных диодов *D*<sub>0</sub>, *D* препятствуют переза-

**Таблица 1.** Основные технические характеристики импульсных устройств для исследования р.в.д.

Технические характеристики	Импульсное устройство	
	ИУ <sub>1</sub>	ИУ <sub>2</sub>
Силовой ток через р.в.д., кА	до 20	до 200
Длительность фронта силового тока, мкс	≤2	≤30
Амплитуда тока управления р.в.д., кА	до 1.5	до 1.5
Длительность фронта тока управления, мкс	≤1.5	≤1.5

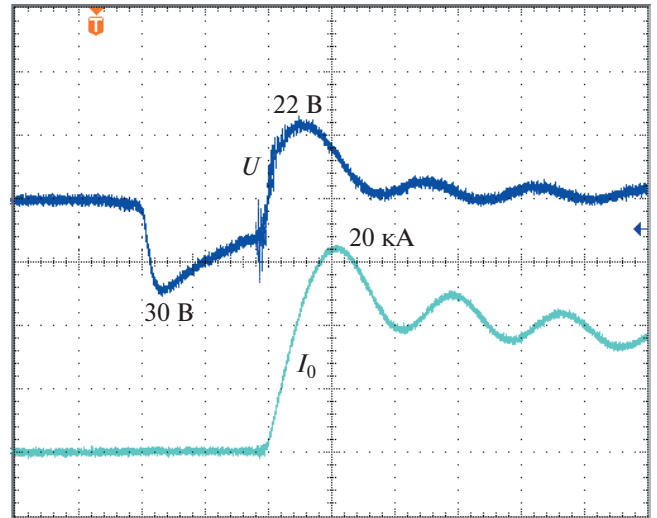


**Рис. 3.** Электрическая схема ИУ<sub>1</sub>. БЗ – блок запуска; ЗУ – зарядные устройства; ТТ – трансформаторы тока; ДН – датчик напряжения; V – СН2-2А-560 (8 параллельно); D – 80ЕРF12 (2 последовательно); D<sub>0</sub> – ДЛ123-320-18 (6 последовательно); P – РВУ-73С; T – ТБ133-250-24; K<sub>0</sub> – А1317-Л2800.65.11.100.

рядке конденсаторов C<sub>0</sub>, C. Длительность тока управления р.в.д. составляет примерно 2 мкс. Она определяется величиной задержки момента включения разрядника P относительно момента включения тиристора T.

Для запуска тиристора T и разрядника P используются цепи управления, которые построены на основе малогабаритных тиристоров 40TPS16 и выходных импульсных трансформаторов. Цепь управления разрядника P формирует мощные сигналы с фронтом < 300 нс, которые обеспечивают малый разброс моментов срабатывания РВУ-73С (< 150 нс). Цепь управления тиристора T формирует импульсы тока управления с амплитудой ~5 А и фронтом ~0.5 мкс, обеспечивающие малые коммутационные потери в тиристоре.

Резистор R определяет малое напряжение на р.в.д. в исходном состоянии. Варистор V защищает р.в.д. от перенапряжения при несанкционированном включении разрядника P. Если исследуемый р.в.д. не включается после пропускания тока управления (брак в изготовлении), то конденсатор C<sub>0</sub> разряжается через резистор R. В этом режиме варистор V ограничивает напряжение на конденсаторе C. Для штатного (аварийного) разряда конденсатора C<sub>0</sub> используется механический коммутатор K<sub>0</sub>. После его включения конденса-

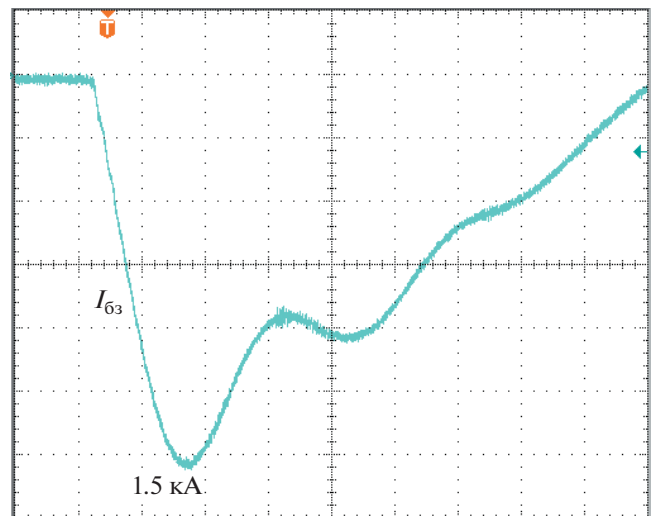


**Рис. 4.** Осциллограммы силового тока  $I_0$  и напряжения  $U$  на РВД173-250-20. Масштаб по вертикали: тока – 6 кА/деление, напряжения – 20 В/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление.

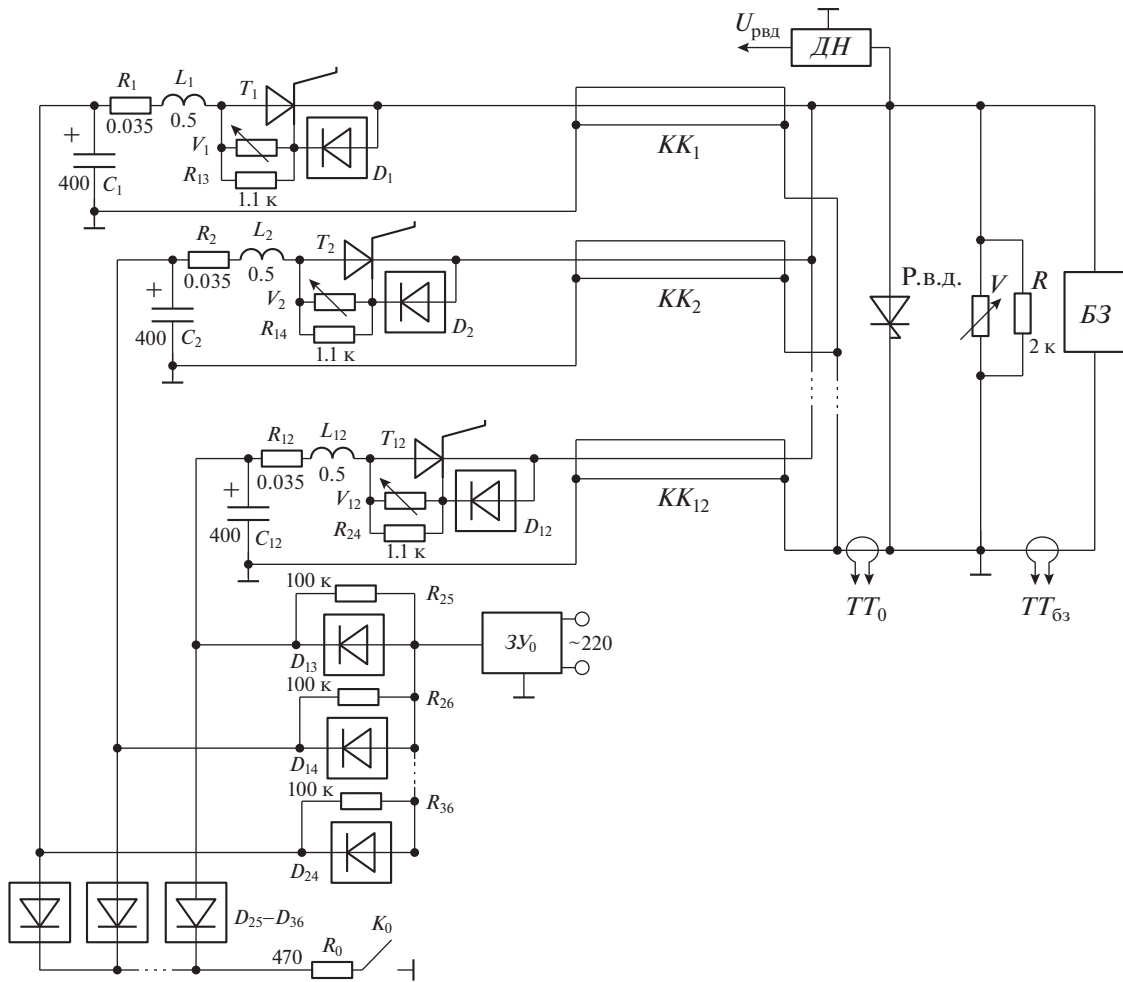
тор C<sub>0</sub> быстро разряжается через резистор R<sub>0</sub>. Разряд конденсатора C осуществляется через резистор R<sub>C</sub>.

Измерение силового тока  $I_0$  и тока блока запуска  $I_{63}$  осуществляется трансформаторами тока ТТ<sub>0</sub>, ТТ<sub>63</sub> (Pearson current monitor 410). Падение напряжения на р.в.д. измеряется датчиком напряжения ДН (Tektronix Н5100А).

Зарядка конденсаторов C<sub>0</sub> и C осуществляется с помощью зарядных устройств ЗУ<sub>0</sub> и ЗУ с входным напряжением +24 В. Они разработаны по



**Рис. 5.** Осциллограмма тока блока запуска. Масштаб: по вертикали – 250 А/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление.



**Рис. 6.** Электрическая схема импульсного устройства ИУ<sub>2</sub>. БЗ – блок запуска; ЗУ – зарядные устройства; ТТ – трансформаторы тока; ДН – датчик напряжения; КК – коаксиальные кабели; V – СН2-2А –560 (8 параллельно); V<sub>1</sub>–V<sub>12</sub> – VSR20D561K; D<sub>1</sub>–D<sub>36</sub> – HER 608 (3 последовательно).

схеме обратного инвертора и способны стабилизировать заданную величину выходного напряжения с точностью 5%. Формирование высокого выходного напряжения осуществляется с помощью повышающего трансформатора и низковольтной высокочастотной цепи на основе полевого транзистора С2М0160120D. Обмотки трансформатора намотаны на фторопластовые катушки, расположенные на разных ядрах П-образного ферритового сердечника. В результате электрическая прочность межобмоточной изоляции составляет >15 кВ.

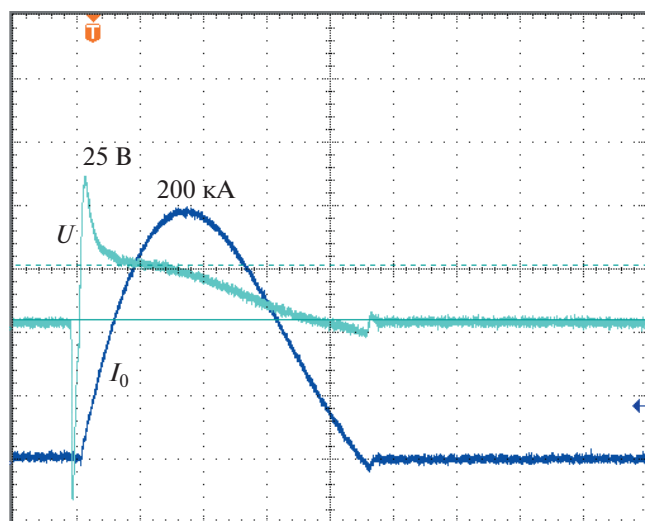
Когда процессы зарядки конденсаторов C<sub>0</sub> и C заканчиваются, зарядные устройства ЗУ<sub>0</sub> и ЗУ формируют сигналы готовности. После генерации этих сигналов включается блок управления ИУ<sub>1</sub>, который вырабатывает два, сдвинутых по времени, оптических сигнала. Эти сигналы поступают в цепи управления тиристора T и разряд-

ника P и обеспечивают их включение с заданной задержкой.

В качестве примера на рис. 4 приведены осциллограммы силового тока I<sub>0</sub> и падения напряжения U на типичном РВД173–250–20 с диаметром структуры 76 мм и рабочим напряжением 2 кВ. Осциллограммы получены при максимальных напряжениях зарядки конденсаторов C<sub>0</sub> и C (U<sub>0</sub> = 10 кВ и U<sub>C</sub> = 2.3 кВ).

На рис. 5 показана осциллограмма выходного тока блока запуска БЗ, соответствующая U<sub>C</sub> = 2.3 кВ, которая была получена при отключенной силовой цепи устройства ИУ<sub>1</sub>.

Согласно осциллограммам на рис. 4, 5, при максимальном напряжении зарядки конденсаторов C<sub>0</sub>, C силовой ток и ток блока запуска соответственно имеют амплитуды ~20 кА и ~1.5 кА. Максимальная скорость нарастания силового тока составляет ~25 кА/мкс. В этом режиме падение



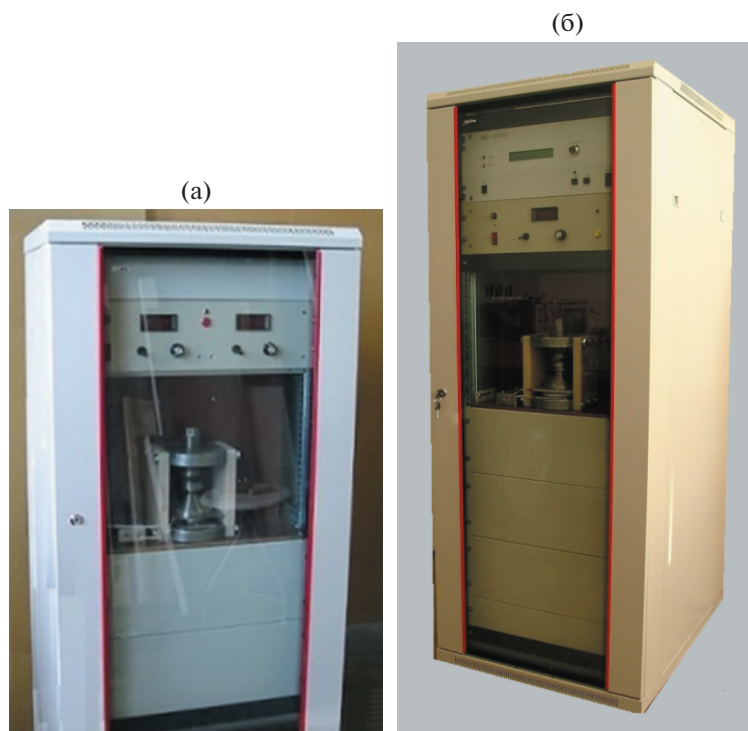
**Рис. 7.** Осциллограммы силового тока  $I_0$  и падения напряжения  $U$  на р.в.д. Масштаб по вертикали: тока — 50 кА/деление, напряжения — 10 В/деление; по горизонтали — 20 мкс/деление.

напряжения на использованном динисторе мало и может быть выбрано в качестве базового при сравнительном тестировании динисторов этого типа.

На рис. 6 приведена электрическая схема импульсного устройства  $ИУ_2$ . Силовой ток в  $ИУ_2$

формируется с помощью двенадцати ячеек на основе силовых конденсаторов  $C_1-C_{12}$ , тиристоров  $T_1-T_{12}$ , демпфирующих резисторов  $R_1-R_{12}$  и монтажных индуктивностей  $L_1-L_{12}$ . К ячейкам подключены коаксиальные кабели  $КК_1-КК_{12}$  длиной 2 м. Они обеспечивают симметричное подключение ячеек к исследуемому р.в.д. Амплитуда и скорость нарастания выходных токов ячеек определяются сопротивлением демпфирующих резисторов, напряжением зарядки силовых конденсаторов (от 200 до 1800 В), емкостью этих конденсаторов, а также индуктивностями цепей их разряда, включающими в себя индуктивности кабелей и монтажные индуктивности  $L_1-L_{12}$ . Элементы ячеек выбраны так, чтобы после включения тиристоров обеспечивалось малое напряжение перезарядки силовых конденсаторов. Амплитуда и длительность протекающего через исследуемый р.в.д. силового тока могут регулироваться путем изменения числа одновременно включаемых ячеек. При синхронном включении всех ячеек и максимальном напряжении зарядки силовых конденсаторов силовой ток имеет амплитуду  $\sim 200$  кА и длительность  $\sim 90$  мкс.

В качестве тиристоров  $T_1-T_{12}$  используются мощные импульсные тиристоры ТБИ543-400-24. Малые коммутационные потери энергии в тиристорах достигаются путем создания импульсов тока управления с амплитудой  $\sim 10$  А и фронтом 0.5 мкс.



**Рис. 8.** Внешний вид: а —  $ИУ_1$ ; б —  $ИУ_2$ .

Ток управления каждого тиристора формируется цепью запуска с выходным импульсным трансформатором. Вторичная обмотка трансформатора подключена к цепи электрода управления тиристора коаксиальным кабелем длиной 2 м. В цепи запуска используются последовательно соединенные тиристор 40TPS12, токоформирующий резистор с сопротивлением 30 Ом и конденсатор, который исходно заряжен до напряжения питания 300 В.

Сравнительно большое напряжение питания запускающих цепей обеспечивает высокую скорость нарастания токов управления силовых тиристоров. Использование в запускающих цепях токоформирующих резисторов с большим сопротивлением позволяет считать эти цепи источниками тока. В результате токи управления тиристоров практически одинаковы.

Для формирования тока управления р.в.д. используется такой же блок запуска БЗ, как в устройстве ИУ<sub>1</sub>. Зарядка конденсаторов C<sub>1</sub>–C<sub>12</sub> осуществляется с помощью зарядного устройства ЗУ<sub>0</sub> (701С-020-220-10-р).

Принцип действия ИУ<sub>2</sub> заключается в следующем. После включения блока запуска БЗ через р.в.д. в обратном направлении протекает ток управления I<sub>γ</sub>. После последующего включения силовых тиристоров через р.в.д. в прямом направлении протекает силовой ток. Величина задержки между моментами включения силовых тиристоров и блока БЗ определяет длительность тока управления р.в.д.

В аварийных режимах (пробой кабеля, пробой демпфирующего резистора и т.д.) силовые конденсаторы могут перезарядиться до существенного обратного напряжения. Защитные цепи, состоящие из диодов D<sub>1</sub>–D<sub>12</sub> и варисторов V<sub>1</sub>–V<sub>12</sub>, ограничивают обратное напряжение на тиристорах T<sub>1</sub>–T<sub>12</sub> на безопасном уровне. В этом режиме резисторы R<sub>13</sub>–R<sub>24</sub> обеспечивают полный разряд силовых конденсаторов. Резистор R создает возможность разряда конденсаторов C<sub>1</sub>–C<sub>12</sub>, если р.в.д. не включается после пропускания тока управления. В этих условиях варистор V защищает блок БЗ от перенапряжения. Если произойдет несанкционированное включение силовых тири-

сторов, то варистор V ограничивает напряжение на р.в.д. Диоды D<sub>13</sub>–D<sub>24</sub> разделяют силовые конденсаторы в процессе их зарядки, а диоды D<sub>25</sub>–D<sub>36</sub> обеспечивают разряд силовых конденсаторов после включения ключа K<sub>0</sub>.

В процессе исследования р.в.д. выходной ток блока БЗ измерялся датчиком тока Pearson current monitor 410. Для измерения силового тока использовался пояс SWT 600R фирмы РЕМ. Падение напряжения на р.в.д. измерялось высоковольтным пробником Tektronix H5100A.

В качестве примера на рис. 7 показаны осциллограммы силового тока I<sub>0</sub> = 200 кА и падения напряжения U на типичном РВД173-250-20. Они соответствуют эксперименту, когда амплитуда и длительность выходного тока блока запуска были равны соответственно 1500 А и 2 мкс.

На рис. 8 приведены фотографии ИУ<sub>1</sub> и ИУ<sub>2</sub>.

Таким образом, описанные мощные импульсные устройства позволяют тестировать реверсивно включаемые динисторы в условиях промышленного производства и проводить исследования, направленные на оптимизацию их конструкции. Они могут быть также использованы для практического обучения студентов и молодых специалистов, окончивших высшие учебные заведения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grekhov I.V., Gorbatyuk A.V., Kostina L.S., Korotkov S.V., Iakovtchuk N.S. // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. № 11. P. 1132.
2. Коротков С.В. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 5.
3. Schneider S., Podlesak T.F. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 28. № 5. P. 1520. <https://doi.org/10.1109/27.901225>
4. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Рольник И.А., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 102.
5. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 53.
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 172.
7. Korotkov S.V., Lyublinsky A.G., Aristov Y.V., Zhmodikov A.L., Kozlov A.K. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. Issue 10. Part 1. P. 2879. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2267555>