

# 12-кВ твердотельный ключ

с ультравысокими скоростями нарастания тока и высокой плотностью мощности для работы в микросекундном диапазоне

**В статье представлены результаты разработки 12-кВ ключа на основе реверсивно-включаемых динисторов с обратной проводимостью с блоком управления для коммутации импульсов тока амплитудой до 100 кА длительностью 20 мкс со скоростью нарастания прямого тока свыше 25 кА/мкс. Ключ разработан в концепции мультисборки коаксиальной конструкции для достижения минимальных размеров, низкой индуктивности, без критических осцилляций при коммутации мощных импульсов тока с высокими скоростями переключения. В данной конструкции ключа реализована высокая плотность мощности на единицу объема (22,5 МВт/дм<sup>3</sup>) и массы (31 МВт/кг).**

**Алексей Хапугин  
Вячеслав Мускатиньев  
Валентин Мартыненко  
Дмитрий Немаев  
Алексей Гришанин**

nicssp@elvpr.ru

**Вячеслав Елисеев  
Светлана Иванова  
Максим Махаев  
Наталья Мельникова  
Сергей Потапов  
Алексей Сабёшкин**

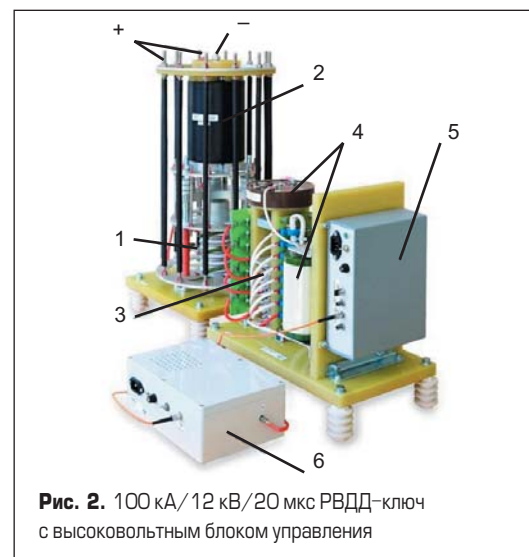
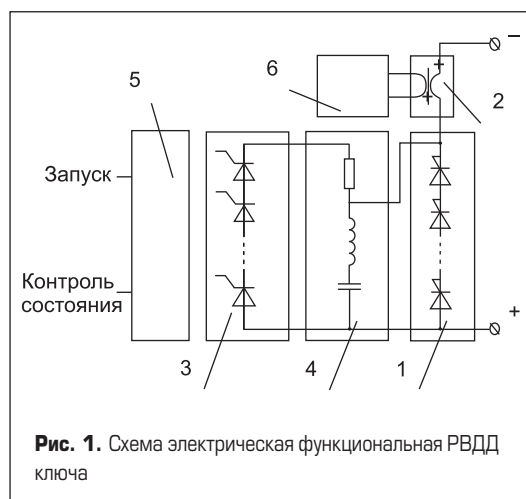
el.press@mail.ru

Высоковольтные твердотельные ключи с высоким быстродействием востребованы в аппаратуре импульсной энергетики большой мощности (до 10<sup>9</sup> Вт) [1]. Они используются в лазерной технике, ускорителях электронов, плазменных генераторах, медицинской технике, оборудовании для очистки воздуха и воды и многих других импульсных применениях. Одним из перспективных силовых полупроводниковых приборов для таких ключей является реверсивно-включаемый динистор с обратной проводимостью (РВДД) [1], который обладает всеми преимуществами реверсивно-инжекционного включения [2] с возможностью коммутации в микросекундном диапазоне больших и коротких импульсов тока прямой и обратной полярности. Обладая квазидиодным характером включения (одновременно по всей площади), РВДД способны коммутировать плотности тока до 10<sup>4</sup> А/см<sup>2</sup> и выдерживать ско-

рости нарастания тока до 10<sup>5</sup> А/мкс, недостижимые для лучших импульсных тиристоров.

## Схема и конструкция ключа

Для одного из перечисленных применений (плазмотроны), где требуются короткие мощные импульсы тока с длительностью фронтов до 1 мкс, разработан 12-кВ твердотельный ключ на основе РВДД с высоковольтным блоком управления для коммутации импульсов тока в импульсно-периодическом режиме амплитудой до 100 кА длительностью импульса тока до 20 мкс, скоростью нарастания прямого тока свыше 25 кА/мкс. На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема, а на рис. 2 — фотография прототипа этого ключа.



Состав твердотельного РВДД-ключа:

**1. Высоковольтный силовой блок 1** (рис. 2). Он состоит из семи последовательно соединенных 2-дюймовых 2,4-кВ реверсивно-включаемых динисторов с обратной проводимостью таблеточной конструкции и дросселя магнитной задержки (2). Между динисторами расположены медные пластины, служащие для монтажа выравнивающих напряжение резисторов и отвода тепла. Блок крепится на основание из диэлектрика и устанавливается в аппаратуре с помощью ребристых изоляторов.

Для минимизации паразитной индуктивности взаимное расположение катодного и анодного выводов силового блока выполнено коаксиально. Блок может работать в режимах коммутации одиночных и повторяющихся одно- и двуполярных импульсов тока. Поэтому конструкция силового блока выполнена максимально открытой для доступа охлаждающего воздуха, что позволяет эффективно реализовывать как конвекционное, так и принудительное охлаждение. В последнем случае принудительный поток воздуха от небольшого вентилятора, охлаждающий таблетки РВДД и медные шины между ними, может увеличить количество рассеиваемого тепла на 50%.

**2. Генератор запуска.** В состав генератора входят высоковольтный тиристорный ключ (3), RLC-контур (4) и блок управления (5) с оптическим интерфейсом. Параметры оптического входного запускающего импульса: длительность 20 мкс, длина волны 820 нм, диапазон оптической мощности 3–120 мВт. При поступлении сигнала запуска на оптический вход и наличии напряжения питания ключа генератор формирует импульс управления амплитудой 2 кА, длительностью 1,5 мкс для включения сборки РВДД.

**3. Блок размагничивания 6.** Данное устройство предназначено для восстановления магнитных свойств дросселя насыщения после коммутации предыдущего импульса силового тока. Для этого блок поддерживает в высоковольтном кабеле размагничивания средний ток около 2 А.

### Результаты расчетов

Критерием выбора силовых полупроводниковых приборов для твердотельного ключа является величина максимальной температуры в момент протекания импульсного тока. Расчеты максимальной температуры *p-n*-переходов РВДД-ключа были проведены с помощью программного комплекса TCAD Synopsys. На рис. 3 представлены результаты моделирования работы РВДД при разряде накопительной емкости 80 мкФ на коаксиальный кабель длиной 1,5 м с волновым сопротивлением 50 Ом. Нагрузкой на выходе коаксиального кабеля являлось активное сопротивление 10 мОм. Напряжение заряда емкости 12 кВ. В результате моделирования разряда емкости с помощью РВДД-ключа на нагрузку были получены синусоидальные затухающие колебания тока с периодом около 40 мкс. Амплитуда тока первой положительной полуволны составила 135 кА, первой отрицательной полуволны 70 кА. Максимальная температура полупроводниковой структуры РВДД в момент прохождения положительной полуволны составила +110 °С, в момент прохождения отрицательной полуволны тока +160 °С. В обоих случаях она ниже предельно допустимой температуры перехода для данного типа прибора ( $T_{jmax} = +200$  °С), что обеспечит надежную работу при эксплуатации в импульсном режиме.

Увеличение плотности электронных компонентов и их коммутируемой мощности приводит к росту тепловыделения, что значительно повышает вероятность сбоя электронных устройств и систем. Поэтому для анализа эффективности выбранной конструкции выполнен тепловой расчет РВДД-ключа в программном комплексе ANSYS. Расчет проводился с учетом длительного режима работы ключа при условии естественного конвекционного охлаждения. В качестве исходных данных задавалась средняя мощность тепловыделения на полупроводниковой структуре, соответствующая амплитуде импульса тока 100 кА, длительностью 20 мкс и частотой коммутации 1 Гц. Температура окружающего воздуха равна +40 °С.

На рис. 4 представлены результаты расчета конвекционного потока охлаждающего воздуха и температуры всех греющихся деталей и узлов силового блока РВДД-ключа. Как видно из рисунка, линии конвекционного потока воздуха беспрепятственно огибают стягивающие

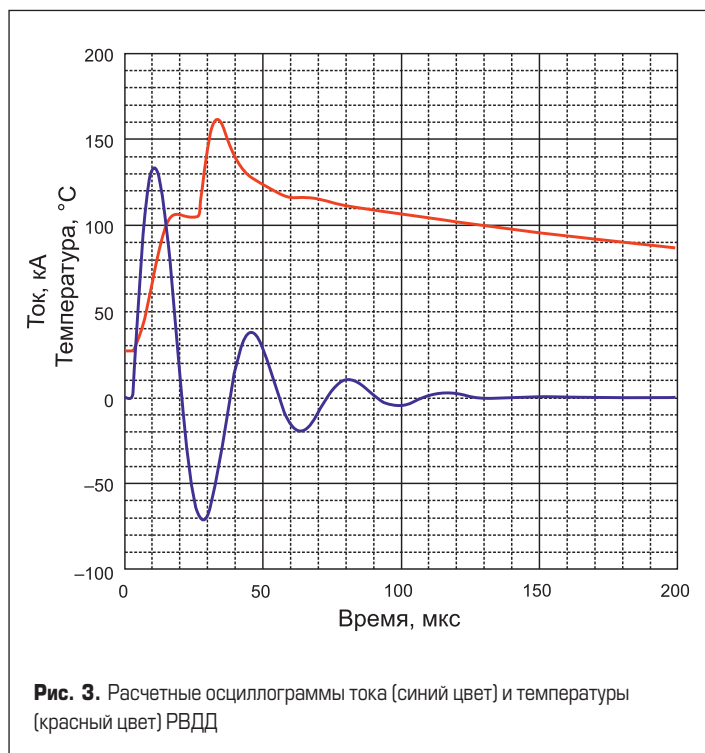


Рис. 3. Расчетные осциллограммы тока (синий цвет) и температуры (красный цвет) РВДД

шпильки блока и обеспечивают эффективный отвод тепла от медных пластин и динисторной сборки в целом. При этом средняя температура корпуса каждого из семи последовательно соединенных полупроводниковых приборов составляет около +70 °С, что не превышает предельно допустимое значение температуры приборов в длительном режиме работы.

На рис. 5 представлены результаты расчета потока охлаждающего воздуха и температуры деталей и узлов силового блока РВДД-ключа при принудительной конвекции. Здесь охлаждение улучшается за счет использования вентилятора, расположенного перед блоком (для приведенного рисунка — вентилятор расположен справа от блока). Скорость

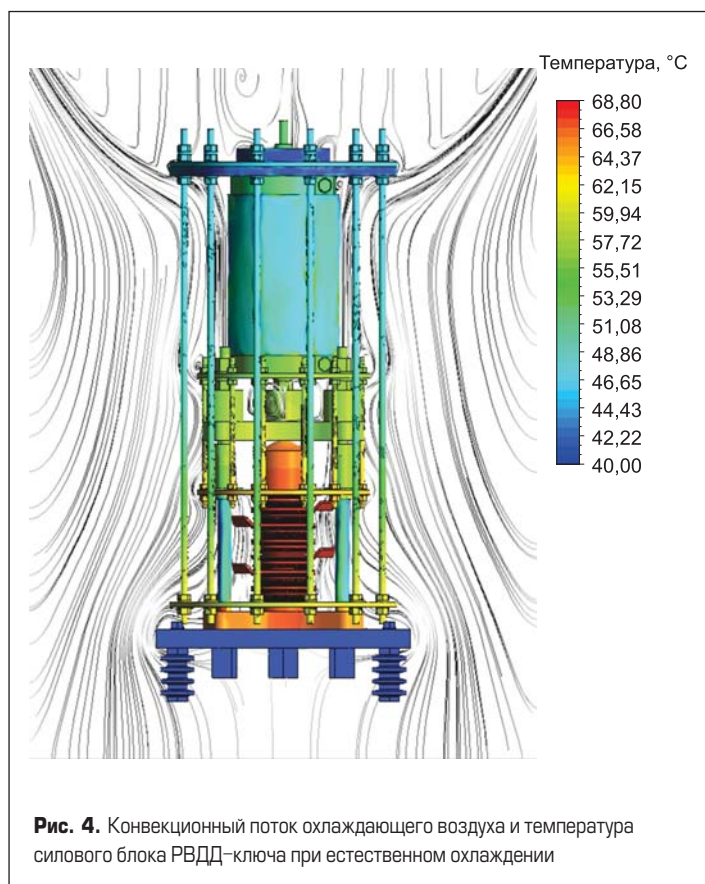
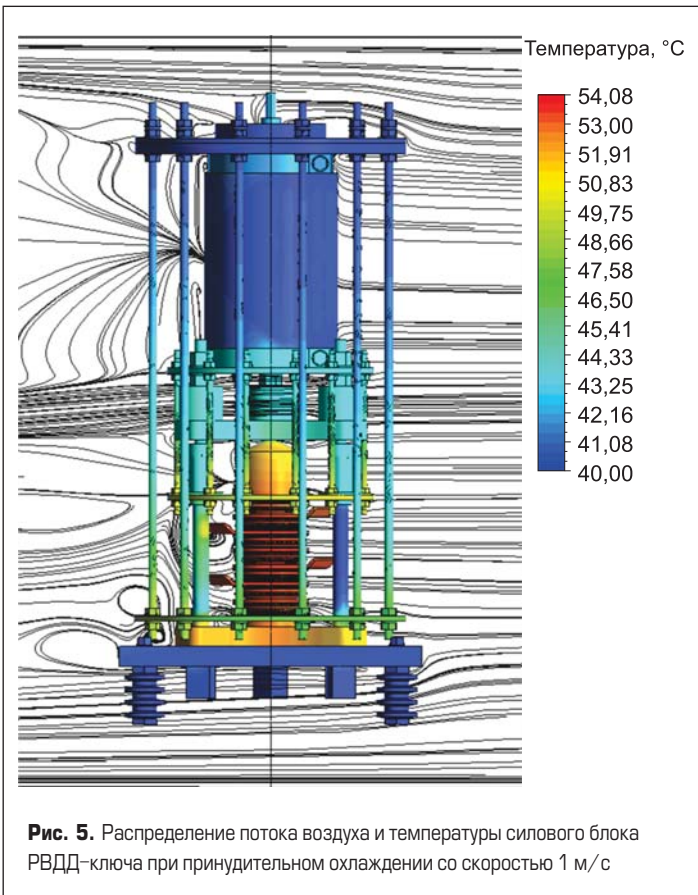


Рис. 4. Конвекционный поток охлаждающего воздуха и температура силового блока РВДД-ключа при естественном охлаждении

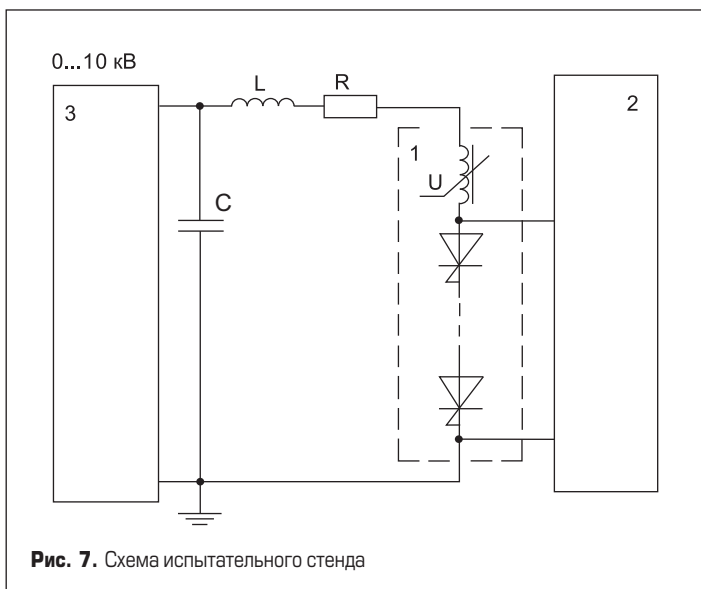


**Рис. 5.** Распределение потока воздуха и температуры силового блока РВДД-ключа при принудительном охлаждении со скоростью 1 м/с

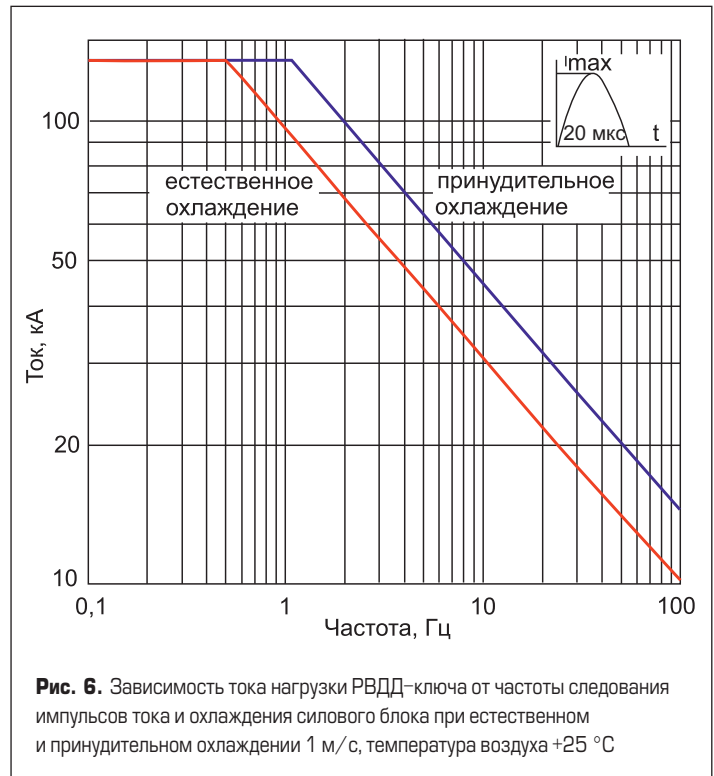
потока воздуха около 1 м/с, температура охлаждающего воздуха +40 °С. В расчетах температуры средняя мощность тепловыделения в ключе принималась той же, что и при естественном охлаждении.

На рис. 5 видно, что средняя температура корпуса каждого из семи последовательно соединенных полупроводниковых приборов при принудительном охлаждении составляет около +54 °С, что примерно на 15 °С меньше по сравнению с естественным охлаждением. Это позволяет значительно увеличить коммутационную способность РВДД-ключа. Расчетные тепловые сопротивления «переход — окружающая среда  $R_{th(j-a)}$ » диносторней сборки силового блока для естественного и принудительного охлаждения равны 0,43 °С/Вт и 0,20 °С/Вт соответственно.

На основании полученных значений  $R_{th(j-a)}$  построены максимальные нагрузочные характеристики РВДД-ключа в зависимости от частоты коммутации полусинусоидального импульса тока длительностью 20 мкс (рис. 6).



**Рис. 7.** Схема испытательного стенда



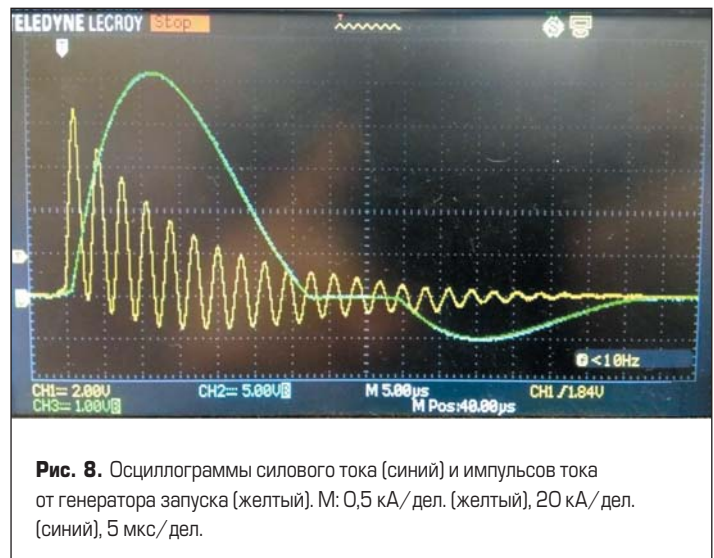
**Рис. 6.** Зависимость тока нагрузки РВДД-ключа от частоты следования импульсов тока и охлаждения силового блока при естественном и принудительном охлаждении 1 м/с, температура воздуха +25 °С

На рис. 6 видно, что при принудительном охлаждении силового блока ток нагрузки РВДД-ключа возрастает примерно на 40% по сравнению с естественным охлаждением во всем указанном диапазоне частот. Положительные результаты получены за счет максимально открытой конструкции ключа и низкой энергии потерь в РВДД, поэтому он может работать в режимах коммутации одиночных и повторяющихся одно- и двуполярных импульсов тока.

### Результаты испытаний

На рис. 7 представлена схема испытательного стенда, на котором проводилась проверка работоспособности РВДД-ключа. Ключ подсоединен между емкостным накопителем и нагрузкой.

Находясь в исходном запертом состоянии в силовом контуре (цепи) с емкостным накопителем С, заряженным от источника напряжения (3), силовой блок (1) блокирует разрядный ток. Для включения силового блока к диносторней сборке от генератора запуска (2) подается короткий управляющий импульс обратного тока. Электрическая развязка управляющей и силовой цепей во время протекания тока управления осуществляется за счет дросселя насыщения, имеющего большую начальную индуктивность. За время развязки (1–1,5 мкс) к ненасыщенному



**Рис. 8.** Осциллограммы силового тока (синий) и импульсов тока от генератора запуска (желтый). М: 0,5 кА/дел. (желтый), 20 кА/дел. (синий), 5 мкс/дел.

дросселем приложено все напряжение. Ток через дроссель нарастает медленно и линейно, а после достижения определенного значения переводит дроссель в состояние с низкой индуктивностью. После этого к силовому блоку вновь прикладывается напряжение накопителя  $C$ , динисторы переключаются и ключ коммутирует в нагрузку  $R$  мощный импульс тока.

Проведенные испытания на стенде (рис. 7) подтвердили работоспособность макета РВДД-ключа с его расчетными параметрами. На рис. 8 представлены осциллограммы тока генератора запуска и коммутируемого тока (разряд емкостного накопителя на резистивный эквивалент при напряжении 10 кВ) амплитудой около 100 кА,  $t_p \approx 30$  мкс,  $di/dt$  на начальном участке фронта около 20 кА/мкс.

### Заключение

В статье представлен прототип высоковольтного твердотельного ключа с драйвером управления, способного переключать импульсы тока микросекундной длительности амплитудой до 100 кА с ультра-высокими скоростями включения. Разработанное устройство имеет исключительно высокую плотность мощности 22,5 МВт/дм<sup>3</sup> (или

31 МВт/кг), которая значительно превосходит современное состояние. Это достигнуто за счет использования в силовом блоке инновационного реверсивно-включаемого динистора с обратной проводимостью, имеющего рекордно низкие потери мощности при коммутации больших и коротких импульсов тока; компактного дизайна силового блока и эффективного отвода тепла от полупроводниковых элементов. Полученные результаты являются платформой для создания 5–30-кВ высокомоощных и надежных твердотельных импульсных энергетических систем мегаамперного диапазона.

### Литература

1. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
2. Grishanin A., Khapugin A., Martynenko V., Muskatinev V., Eliseev V., Korotkov S., Galakhov I., Osin V. High Voltage Semiconductor Switch on the Base of RCRSD for Bipolar Power Current Pulse Commutation. PCIM Europe 2018, 5–7 June 2018, Nuremberg, Germany.
3. Тучкевич В. М., Грехов И. В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988.