

Полупроводниковые компоненты

и твердотельные ключи компании АВВ для импульсной техники

В статье рассматриваются полупроводниковые компоненты и твердотельные ключи, применяемые для работы с импульсными системами. Эти ключи спроектированы для использования в областях, связанных с модуляцией энергии.

**A. Welleman
E. Ramezani
J. Waldmeyer**

**Перевод: Инна Корзина,
Алексей Чекмарев**

chekmarev@fmccrustel.ru

В статье будет представлена недавно разработанная коммутационная система, рассчитанная на напряжение 40 кВ постоянного тока и коммутирующая ток порядка нескольких тысяч ампер с высокой скоростью его нарастания (несколько кА/мкс). В этой системе может быть реализована частота следования импульсов до 1 кГц при условии, что устройство оснащено адекватной системой охлаждения. Ключи разработаны как альтернатива решений на базе тиратронов и игнитронов, так как их срок службы в несколько раз больше. Благодаря использованию модульной технологии основания можно создавать устройства на различные уровни мощности. В представленных ключах есть система запуска и, где это требуется, источник питания, а также воздушные или водяные охладители.

Введение

В течение нескольких лет АВВ предлагает заказчикам статические твердотельные ключи, которые базируются на широкой номенклатуре специализированных типов устройств, разработанных для работы с единичными или повторяющимися импульсами. В последнее время потребность в замене тиратронов и игнитронов резко возросла, а технология изготовления статических твердотельных ключей значительно усовершенствована, особенно для среднего диапазона частот. Для этих случаев АВВ создала технологическую платформу и применяет эту концепцию для выпуска ряда ключей, которые могут быть использованы при очень высоком значении di/dt и представляют собой завершённые, готовые к использованию силовые элементы. Твердотельные ключи не имеют экологических ограничений и могут занимать любое положение при установке.

Выбор технологии

В настоящее время доступны две технологии изготовления твердотельных ключей: биполярная и ВІ-MOS. Приборы, построенные по технологии с использованием карбида кремния, пока еще не вышли

на рынок. АВВ имеет производственные линии как для биполярной продукции (тиристоры, GTO, IGBT), так и для ВІ-MOS-приборов (IGBT) на одном предприятии и использует обе эти технологии для импульсных ключей. Опыт использования биполярной технологии охватывает несколько десятков лет, в то время как исследования ВІ-MOS-приборов для импульсной техники с целью использования в тяжелых условиях эксплуатации продолжают активно проводиться в настоящее время. В связи с этим выбор нужной технологии не всегда прост. Для выбора оптимальной технологии необходимо различать разные категории применения, то есть когда ключ должен включать и выключать, либо когда ключ только включает (разрядный ключ). В частности, уровень частоты следования импульсов является одним из важных критериев при выборе. Кроме частоты, критериями при выборе технологии являются величины тока и напряжения, а также конструкция пластины. Биполярные приборы могут быть использованы не всегда. Ограничения на биполярную технологию накладываются, в основном, по частоте, тогда как у IGBT есть собственное основное ограничение по токовой нагрузке.

На рис. 1 изображена пластина большого тиристора (рис. 1а), которая способна выдерживать напряжение



Рис. 1. Пластины биполярных приборов и чипов IGBT



Рис. 2. Биполярный ключ с интегрированным драйвером с пластинами асимметричной и обратной проводимости. $V_{drm} = 4500 \text{ В}$, размер пластины 91 мм



Рис. 3. Прижимной IGBT-модуль с 6 блоками и одним 9-чиповым блоком. $V_{ces} = 2500 \text{ В}$, размер чипа $12 \times 12 \text{ мм}$

до 8 кВ и несколько килоампер, но имеет ограничение по величине di/dt и частоте следования импульсов. Пластина, имеющая высокую степень сегментации (рис. 1 б), выдерживает напряжение до 4,5 кВ и несколько килоампер при высоком значении di/dt и содержит встроенный обратный диод, но ей свойственны ограничения по частоте до нескольких сотен герц (рис. 2). Маленькие IGBT-чипы на пластине (рис. 1 в) могут функционировать при более высоких частотах и способны работать на включение и выключение, но у них есть ограничения по току и напряжению. Для получения необходимого уровня тока часть этих чипов необходимо включать параллельно. Для правильного распределения тока между чипами необходима специальная конструкция модуля. В IGBT-модулях Press Pack производства ABB достаточно просто добиться хорошего распределения тока между отдельными чипами. (рис. 3) Выбор технологии обычно осуществляется опытными специалистами с завода-производителя полупроводниковой техники.

При напряжении до 2 кВ можно применять одиночные стандартные IGBT-модули LoPak и технологию проволочного соединения, а для больших значений напряжения, когда требуется последовательное соединение, целесообразно применять прижимные IGBT-модули, которые не имеют проволочного соединения и в случае неисправности будут просто закорочены, в отличие от модулей, которые в тех же условиях разорвут цепь.

Конструкция ключей

Так как практически не существует стандартов по данному классу приборов, обычно твердотельные ключи проектируются для каждого конкретного случая. ABB обладает технологической платформой для производства

биполярных приборов на трех типоразмерах пластин (51, 68 и 91 мм). Все приборы доступны в следующих исполнениях: симметричные, асимметричные и с обратной проводимостью. Критерием конструкции вентильных сборок является их отличие от просто приборов, что заставляет учитывать некоторые важные параметры. К ним относятся: последовательное соединение, фильтрация, синхронизация и распределение оптических сигналов управления, источник питания, тип охлаждения и др. Классический пример твердотельного ключа показан на рис. 4. Этот ключ используется для замены тириатрона на 40 кВ, 4 кА при $t_r = 10 \text{ мкс}$, $di/dt = 4 \text{ кА/мкс}$ и $f = 25 \text{ Гц}$.

Биполярные приборы, используемые в данной сборке, имеют пластину диаметром 51 мм. Драйвер уже встроен, а для обеспечения изоляции между различными электрическими уровнями устройства используется источник питания замкнутого токового контура (рис. 5).

Для больших токов может быть выбран тот же принцип, но полупроводниковые приборы должны быть большего диаметра. На рис. 6 показан ключ, построенный на основе приборов с диаметром пластины 91 мм, обеспечивающей большую токовую нагрузку и улучшенное тепловое сопротивление. Благодаря использованию большей площади увеличен как предел di/dt , так и максимальная рабочая частота.

Ключ, показанный на рис. 6, рассчитан на длительную работу при 20 кВ, 15 кА, $t_r = 10 \text{ мкс}$, $di/dt = 12 \text{ кА/мкс}$ и $f = 300 \text{ Гц}$, в нем

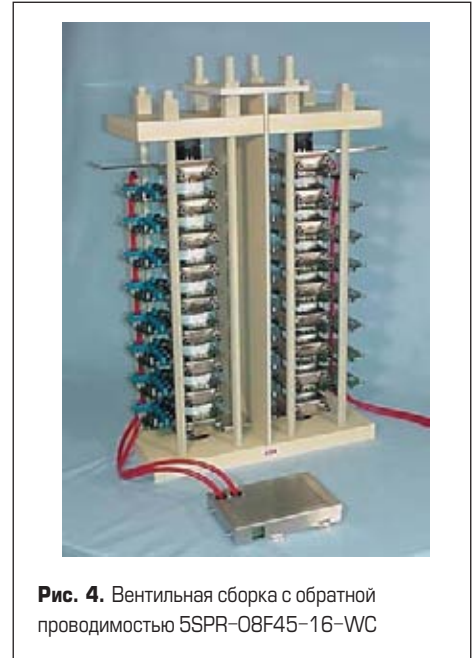


Рис. 4. Вентильная сборка с обратной проводимостью 5SPR-08F45-16-WC

используются водяные теплоотводы для снижения потерь мощности коммутационных устройств. В тех случаях, когда требуется еще и функция отключения, следует применять запираемые тиристоры с интегрированным управлением (IGCT). Благодаря тому, что эти приборы имеют достаточно хорошую отключающую способность, их функция отключения и параметр di/dt лучше, нежели у устройств, упомянутых выше. Технология IGCT может

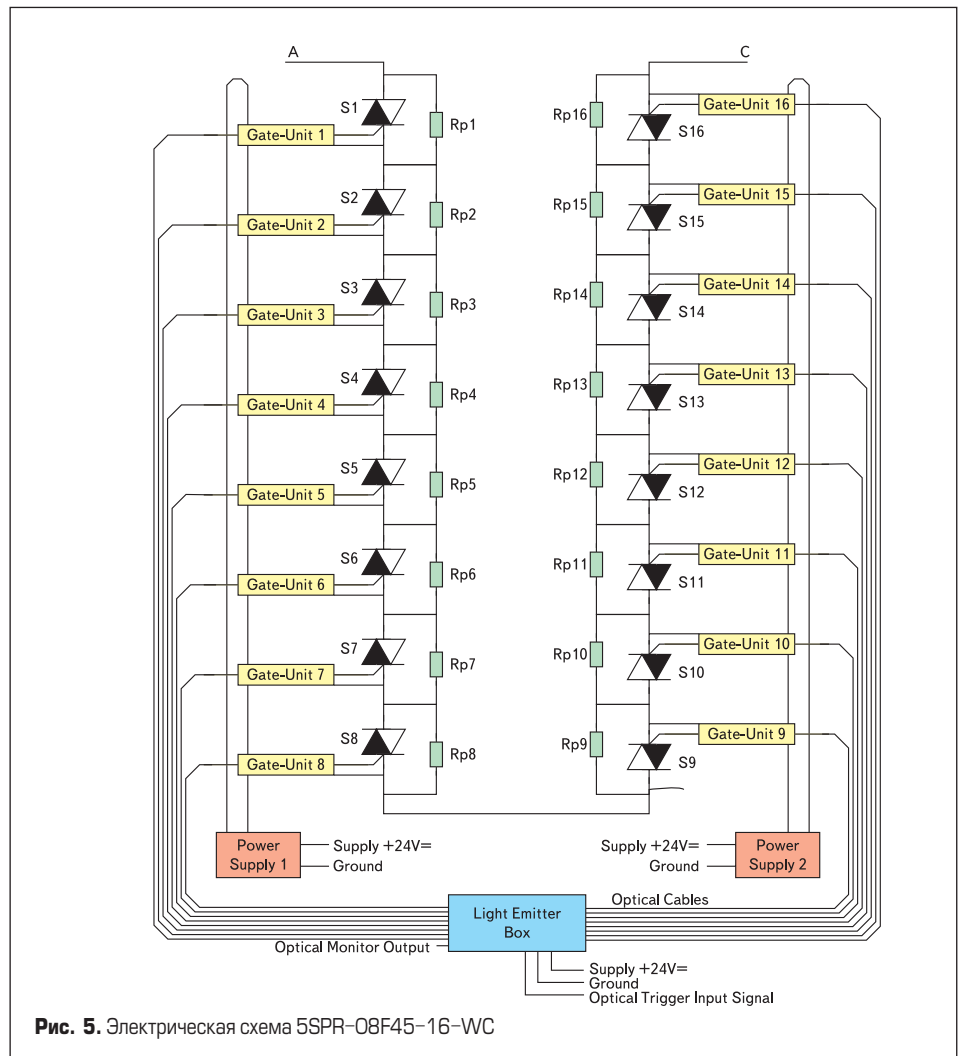


Рис. 5. Электрическая схема 5SPR-08F45-16-WC



Рис. 6. Ключ с обратной проводимостью 5SPR 26L45-8-WC

конкурировать с IGBT-технологией в средне- и низкочастотном диапазоне, в особенности в области низких частот, где IGCT демонстрирует более надежные характеристики при мощной нагрузке по сравнению с IGBT.

ABB производит большое количество IGCT для работы в условиях многократных коммутаций, используемых для источников питания клистрона. Один из примеров ключа на базе IGCT показан на рис. 7. Ключ создан на основе симметричных IGCT с пластинами 91 мм. Напряжение в закрытом состоянии прибора составляет 4500 В. Напряжение в закрытом состоянии ключа — 45 кВ. Так как для работы всегда нужен определенный запас, установленное рабочее напряжение составляет только 18 кВ. Переключающая способность составляет 3,5 кА при $t_p = 200$ мкс, частота — 10 Гц. Ключ оборудован креплением для устройства защитного отключения (УЗО), а также дополнительной защитой в виде металллоксидного варистора.



Рис. 7. Симметричный ключ с УЗО / МОВ 5SHV 35L45-10-CC

Если необходимо наличие включения и выключения, а также если частота следования импульсов равна 500–600 Гц, наиболее целесообразно применять приборы BIMOS (IGBT), потому что традиционные IGCT при таких же условиях отличаются увеличением потребления мощности в драйвере. Ввиду того, что блокирующая способность IGBT в настоящее время хуже, чем у биполярных приборов, зачастую приходится использовать последовательное соединение. При использовании типовых IGBT-модулей последовательного соединения для импульсных схем нужно учитывать несовершенство динамического распределения тока между чипами. Соединительные провода между чипами, получающие наибольший ток, отрываются от чипа, и прибор даже может взорваться, при этом в обоих случаях формируется разомкнутый контур.

Таким образом, для IGBT предпочтительней использовать прижимное устройство, не имеющее соединительных проводов между чипами. При неисправности кристалл расплавится, и чип замкнет накоротко. Последовательное соединение устройств позволяет обеспечивать безопасное управление ключом и дальше, до мо-

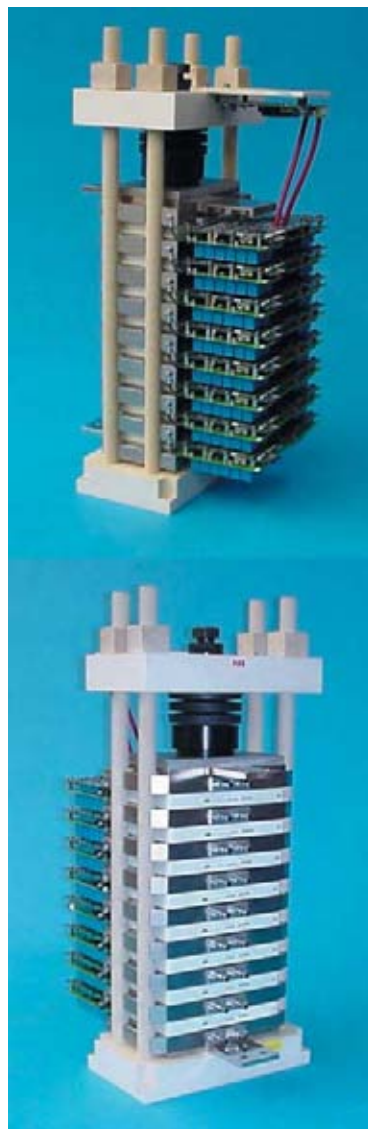


Рис. 8. Ключ на прижимных IGBT-модулях с водяным охлаждением (12 кВ, 2 кА, 100 мкс, 330 Гц)

мента замены неисправного прибора. Специалисты ABB проводили серьезные проектно-конструкторские работы по выполнению требований к режиму короткого замыкания. Они обладают почти десятилетним опытом по работе с прижимными модулями IGBT в последовательном соединении, например для высоковольтных линий электропередач постоянного тока (HVDC). Кроме того, эти приборы могут использоваться на высоких частотах в импульсных схемах, особенно при работе с модуляторами. Современные технологии позволяют достичь напряжений Vces величиной 2500 В и Ic до 2500 А на каждом приборе. Для достижения более высоких значений тока применяется параллельное соединение нескольких чипов. Для снижения количества чипов, соединенных в параллель, в одном модуле используется решение с шестью блоками, каждый из которых содержит шесть штук IGBT и три диода (рис. 3).

Первые ключи на 12 кВ уже поставляются на рынок для накопления опыта. В этих ключах используется последовательное соединение восьми приборов на 2500 В, что дает возможность коммутировать эксплуатационное напряжение 1750 В для каждого приборного уровня. Ключ разработан для импульсного тока на 2 кА с частотой импульсов 330 Гц и может выключать токи до 3 кА в случае неисправности.

Компоновка IGBT-ключа включает блок драйвера, снабберную группу и компоненты, сжатые между водяными теплоотводами с силой 70 кН (рис. 8). Коммутация осуществляется при помощи оптического сигнала, подводимого к каждому драйверу. Для обеспечения высоковольтной изоляции между блоками управления используется источник питания с источником тока замкнутого контура 25 кГц / 4 А. С целью снижения стоимости путем включения большого количества элементов последовательно ABB в настоящее время разрабатывает чип на 4,5 или 5,2 кВ, для которого требуется корпус, несколько отличающийся от существующего. Внедрение высоковольтных приборов способствует развитию более экономичных и компактных преобразовательных систем.

Заключение

Компания ABB Switzerland производит широкий спектр специализированных компонентов и ключей, отвечающих требованиям для импульсных модуляторов. Требования, предъявляемые к схемам и надежности устройства, позволяют успешно реализовать тесное взаимодействие между силовым прибором, драйвером, источником питания, монтажной сборкой и техническими требованиями на проведение испытаний. Предлагаемая модульная технология делает использование твердотельных ключей обоснованным и рассматривается в качестве интересной альтернативы тиратронам и игнитронам. Решения на базе твердотельных ключей обладают более высокими показателями надежности, требуют минимального ухода за оборудованием и становятся все более и более признанными в импульсной технике.

Статья подготовлена с разрешения и по материалам компании ABB Switzerland Ltd., Semiconductors.