

УДК 621.373

Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе составного твердотельного коммутатора

Е. В. Иванов, С. И. Мошкун, В. Ю. Хомич

Центр научного приборостроения Института электрофизики и электроэнергетики РАН,
Москва, Россия

Предложен новый схемный подход создания генераторов наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Разработан твердотельный коммутатор, состоящий из последовательно включенных IGBT-транзисторов. На основе коммутатора разработан и создан полностью твердотельный генератор. На его выходе генерируются импульсы с амплитудой напряжения 10 кВ, током до 300 А, длительностью 100 нс и частотой до 20 кГц. Приведены результаты испытаний генератора при работе в составе системы питания лазера на парах меди и при работе на активную нагрузку.

Традиционно генераторы высоковольтных (10—50 кВ) наносекундных (50—300 нс) импульсов строятся на ламповых или тиратронных коммутаторах. Основным недостатком таких генераторов являются ограниченные сроки их службы, которые составляют в лучшем случае порядка 2 тыс. ч. При использовании тиратронов на частоте следования импульсов более 5 кГц существуют проблемы надежности. Поэтому является актуальной задача разработки долговечных генераторов на основе полупроводниковых коммутаторов. Из твердотельных коммутаторов для таких задач, как правило, используют тиристоры как наиболее сильноточные приборы среди полупроводниковых ключей. Однако в силу ограниченного быстродействия тиристоров трудно объединять их в последовательных и параллельных схемах, что вынуждает применять повышающие трансформаторы, а также большое число звеньев магнитного сжатия [1]. Все это приводит к значительным габаритным размерам и массе, низкому КПД генератора в целом.

В настоящее время происходит быстрый прогресс в области IGBT-приборов (Insulated Gate Bipolar Transistor), представляющих собой комбинацию МДП- и биполярной структур. В результате появляются новые модели, способные конкурировать с лампами и тиратронами по мощности и быстродействию и превышающие их по сроку службы во много раз.

Транзисторы IGBT вытеснили тиристоры во многих областях силовой электроники. Однако предельные рабочие напряжения одиночного IGBT часто оказываются недостаточными, что требует использования совместно нескольких приборов, применяя схемные решения, объединяя достаточное число приборов при разработке коммутаторов для генераторов высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения.

Задача генерирования высоковольтных импульсов с использованием IGBT-транзисторов решается путем параллельного включения нескольких приборов и применения повышающих импульсных трансформаторов [2], которые при работе с импульсами наносекундной длительности характеризуются низкой надежностью в силу явления коронирования.

В работах [3, 4] предложен подход, заключающийся в разработке высоковольтного коммутатора, способного обеспечить требуемые амплитуду и длительность импульса, импульсную и среднюю мощность на нагрузке. Такой подход можно реализовать при последовательном включении нескольких полупроводниковых приборов, что возможно только при синхронном срабатывании каждого транзистора составного коммутатора и схемы управления.

Первостепенной на пути разработки схемы коммутатора стала задача выбора IGBT-транзистора из числа современных, наиболее доступных приборов. Основными требованиями при выборе IGBT являются: электрическая прочность (рабочее напряжение) и величина импульсного тока; время нарастания и спада тока и напряжения; разброс момента срабатывания (включение/выключение); величина энергии, рассеиваемой за один импульс (зависит как от первых двух параметров, так и от падения напряжения на транзисторе в установившемся режиме). Размер кристалла IGBT также является важным параметром, определяющим межэлектродные емкости транзистора, а следовательно, мощность устройства управления прибором (драйвера). Учитывая, что коммутатор должен состоять из десятков отдельных IGBT, размер кристалла может оказаться решающим при выборе транзистора.

Авторами статьи были проведены измерения коммутационных характеристик ряда IGBT-транзисторов при напряжении 1000 В и амплитуде тока до 100 А в цепи резонансного заряда конденсатора (форма тока через транзистор имеет форму половины синусоиды). Такой режим работы транзистора наиболее эффективный, поскольку позволяет значительно снизить потери при включении и выключении (выключение производится принудительно при токе, близком к нулю), обусловленные скоростью изменения тока и напряжения для транзистора. В результате измерений удалось установить, что наиболее подходящим по характеристикам является прибор IRGPS40B120UD компании International Rectifier. Для определения оптимального режима работы транзистора с точки зрения потерь прибор был испытан при различных амплитудах и длительностях импульса тока, в результате чего были получены зависимости энергии потерь от длительности и энергии импульса (рис. 1). Из графиков следует, что энергия потерь при длительностях импульсов, меньших определенных значений, резко возрастает, что связано с высоким уровнем потерь при скорости нарастания тока в цепи заряда, близкой к собственной максимальной скорости нарастания тока через транзистор. Исходя из допустимой энергии потерь и требуемой коммутируемой энергии, которую можно рассеивать, был сделан выбор длительности импульса тока через IGBT.

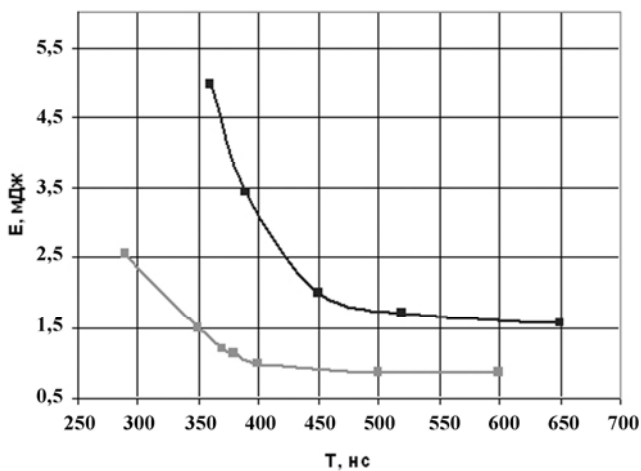


Рис. 1. Зависимость энергии потерь в транзисторе IRGPS40B120UD от длительности импульса при различных значениях коммутируемой энергии. Напряжение на коллекторе транзистора 1000 В. Для верхней кривой $E = 26$ мДж, для нижней — 18 мДж

Испытания нескольких IGBT в схеме с последовательным включением показали, что такая составная структура надежно работает без цепей выравнивания напряжения для каждого отдельного транзистора. Выравнивание напряжения на каждой структуре предположительно происходит автоматически из-за малого разброса величин емкостей коллектор—эмиттер и коллектор—затвор для различных экземпляров. Надежная работа транзисторов в момент коммутации обеспечивается запасом по допустимому напряжению коллектор—эмиттер, низким разбросом момента включения и выключения, а также способностью выдерживать большие перегрузки по прямому напряжению коллектор—

эмиттер в течение требуемого интервала времени без возникновения теплового пробоя, что проверено на практике.

По экспериментальным данным были разработаны схема (рис. 2) и конструкция высоковольтного составного коммутатора на основе последовательно включенных IGBT-транзисторов [3, 4]. Импульсы включения IGBT обеспечивает силовоточный быстродействующий драйвер. Гальваническую развязку в цепи управления транзисторами обеспечивают трансформаторы T1–T10. Первичная обмотка выполнена высоковольтным кабелем и является общей для всех трансформаторов. Выключение IGBT осуществляется резисторами R1–R10. Такой принцип управления транзисторами автоматически обеспечивает синхронность переключения всех IGBT и защиту цепей затворов транзисторов от наводок.

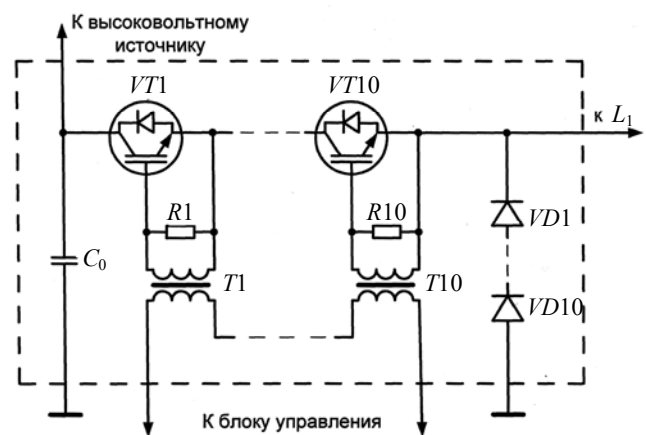


Рис. 2. Схема высоковольтного коммутатора: VT1–VT10 – IRGPS40B120UD; VD1–VD10 – HFA08TB120; C₀ – K74-14-0.1 мкФ||КВИ-3-14 нФ; R1–R10 – 2,35 Ом; T1–T10 – 3 кольца 2000 нм 20×10×5 (обе обмотки по одному витку)

На основе предложенной конструкции был собран высоковольтный коммутатор, состоящий из 10 IGBT-транзисторов, элементов защиты и управления транзисторами и рассчитанный на номинальное рабочее напряжение 10 кВ. Конструктивно коммутатор состоит из пяти плат (рис. 3), каждая из которых содержит две ячейки; диоды VD1–VD10 защищают коммутатор от превышения прямого напряжения при отрицательном напряжении на его выходе. Одна ячейка включает в себя транзистор, одновитковый трансформатор тока для включения транзистора и резистор, обеспечивающий выключение IGBT. Габаритные размеры коммутатора 200×100×120 мм.

На базе коммутатора собран генератор, включающий в себя высоковольтный источник постоянного напряжения, коммутатор и блок управления им. Высоковольтный источник питания выполнен по схеме полного моста с последовательным резонансным контуром и работает на частоте 50 Гц. Он рассчитан на мощность 2,5 кВт и напряжение 10 кВ, имеет защиту от токов к.з. и перенапряжения при х.х. Блок управления включает в себя схему формирования постоянного напряжения, генератор опорной частоты и схему формирования импульса управления коммутатором, выполненную на полевых транзисторах и обеспечивающую

времена нарастания и спада напряжения на затворах IGBT-транзисторов коммутатора не более 20 нс.

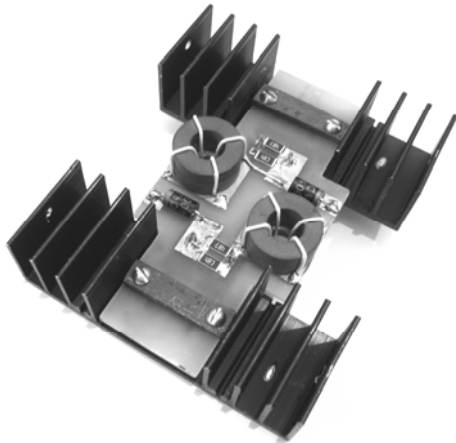


Рис. 3. Одна плата коммутатора с номинальным рабочим напряжением 2 кВ.

Габаритные размеры платы — 100×85×30 мм

Испытания генератора проводились на активной нагрузке 100 Ом, собранной из малоиндуктивных резисторов ТВО (рис. 4). Величина емкости накопительного конденсатора в цепи коммутатора составила 0,1 мкФ и состояла из параллельно включенных конденсаторов марки К73-14, зашунтированных конденсаторами КВИ-3.

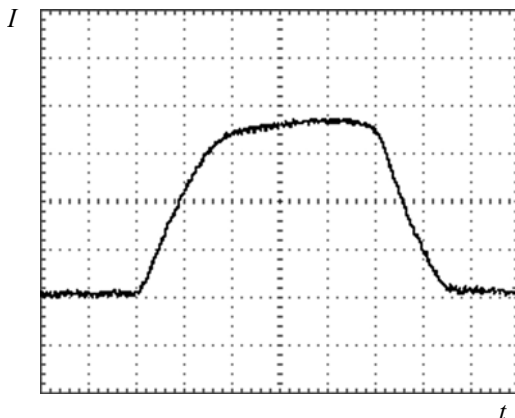


Рис. 4. Осциллограмма тока через коммутатор при работе на активную нагрузку 100 Ом.

Напряжение на входе коммутатора 10 кВ. Масштаб: ток — 25 А/деление; время — 50 нс/деление

Испытания показали, что время задержки включения и выключения коммутатора и скорость нарастания тока сохранились такими же по значению, как и для одиночного прибора. Из осциллограммы видно, что падение напряжения на коммутаторе достаточно велико и составляет ~750 В к концу импульса. Однако падение напряжения в течение импульса уменьшается, что вызвано дозарядом емкости Миллера затворов транзисторов коммутатора. Также необходимо учесть разряд накопительного конденсатора.

Учитывая характеристики генератора, было решено провести его испытание в системе питания газоразрядного лазера на парах меди. Однако требования к параметрам импульсов накачки (фронт, длительность и амплитуда тока) выше, чем способен обеспечить

генератор, поэтому в составе последнего для накачки лазера использовалась система компрессии импульсов на основе двух звеньев магнитного сжатия $C1, L_2, C2, L_3$ (рис. 5). Источник тока в схеме служит для питания обмотки перемагничивания сердечников дросселей L_2, L_3 , что позволило повысить коэффициент сжатия за счет снижения их остаточной индуктивности. В генераторе применена схема с неполным разрядом. В качестве материала дросселей магнитных звеньев использовался феррит марки 2000НМ. Дроссели с сердечниками из пермаллоя имеют лучший коэффициент сжатия, однако их использование неоправданно в связи со значительным уровнем потерь при высоких эффективных частотах следования импульсов [1].

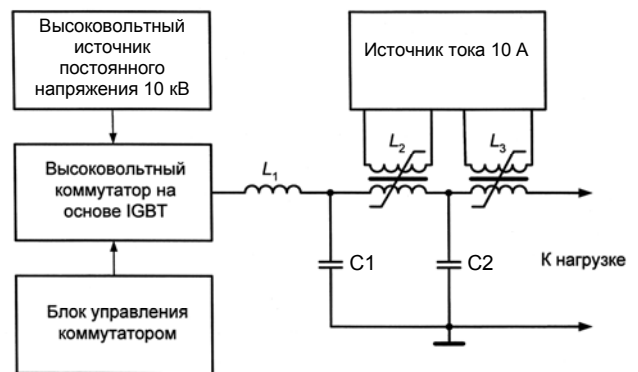


Рис. 5. Функциональная схема генератора высоковольтных наносекундных импульсов:

$C1, C2$ — КВИ-3-470 пФ; L_1 — соленоид 15 мкГн; L_2 — 4 кольца 40×25×11 по 12 витков; L_3 — 3 кольца 40×25×11 по 5 витков, обмотки перемагничивания по одному витку

Расчет дросселей звеньев магнитного сжатия показал, что объем сердечника можно оценить из соотношения

$$A_e l = \frac{C V_m^2 / 2}{\mu_s \mu_0 H_m^2},$$

где A_e — площадь сечения сердечника;

l — средняя длина магнитной линии;

$C V_m^2 / 2$ — энергия, запасенная в конденсаторе звена сжатия;

H_m — максимальное значение напряженности магнитного поля в сердечнике;

μ_0 — магнитная постоянная;

μ_s — проницаемость сердечника в насыщенном состоянии, зависящая от H_m .

Экспериментально установлено, что максимальный коэффициент сжатия достигается при $H_m \approx 15$ кА/м и его значение слабо зависит от H_m в пределах ± 10 –15 кА/м [5]. Работа с более высокими значениями H_m позволяет снизить объем дросселя, однако в нашем случае эксперимент показал, что при $H_m = 30$ –40 кА/м и частоте следования импульсов 15–18 кГц температура сердечников достигала критического значения, и они теряли свои ферромагнитные свойства.

Количество витков дросселя оценивалось выражением

$$N = \frac{\tau_1 V_m}{2\Delta B A_e},$$

где ΔB — максимальное изменение индукции в сердечнике;

V_m — амплитуда напряжения на конденсаторе звена сжатия;

$\tau_1 = \pi\sqrt{LC}$ — время заряда конденсатора звена.

Для обеспечения электрической прочности дросселя каждого звена и улучшения его охлаждения намотка витков проводилась отдельно на каждое кольцо, после чего катушки каждого дросселя соединялись последовательно между собой.

Высоковольтный источник питания поддерживает на накопительном конденсаторе C_0 (см. рис. 2) напряжение 10 кВ. В блоке управления коммутатором формируется управляющий импульс, который обеспечивает синхронный старт включения всех IGBT-транзисторов коммутатора. Последний замыкает накопительный конденсатор C_0 на последовательный контур $L_1 C_1$ (см. рис. 2). Поскольку емкость накопительного конденсатора C_0 (К73-14-0.1 мкФ||КВИ-3-14 нФ) значительно больше емкости конденсатора C_1 (КВИ-3-470 пФ), последний через дроссель L_1 (15 мкГн) за 250 нс заряжается до удвоенного напряжения питания, т. е. ~20 кВ.

Звенья магнитного сжатия C_1, C_2, L_2, L_3 построены по традиционной схеме. Все элементы генератора размещены в корпусе размерами 480×400×260 мм и имеют воздушное охлаждение. Мощность, потребляемая генератором при работе на активный элемент Kulon LT-10Cu (ФГУП «НПП "ИСТОК"», г. Фрязино), составила 1,7 кВт. Мощность излучения составила 13 Вт при частоте следования импульсов накачки 15 кГц.

Наиболее важной особенностью разработанного генератора наносекундных мощных импульсов стало применение высоковольтного твердотельного коммута-

тора, построенного на основе современных IGBT-транзисторов. Это позволило повысить ресурс работы генератора, который на порядки превысил данный показатель для аналогичных конструкций на основе тиратронов и модуляторных ламп. Достоинствами разработанной конструкции коммутатора стали надежность, компактность и простота управления транзисторами. Такая конструкция имеет модульную структуру, что позволяет легко увеличивать рабочее напряжение коммутатора за счет увеличения количества независимых ячеек.

Схемотехнические решения, принятые при разработке генератора, а также достижения полупроводниковой базы позволили повысить КПД генератора по сравнению с аналогичными разработками на основе вакуумных ламп, тиратронов [6] и тиристоров [1].

Работа частично поддержана грантами РФФИ
№ 0,5-02-17725-А и 05-08-33655-А.

Л и т е р а т у р а

1. Шубкин Н. Г., Сычев С. П., Визирь В. А.// ПТЭ. 1990. № 3. С. 96—98.
2. Визирь В. А., Иванов С. В., Ковальчук Б. М. и др.// Там же. 2004. № 4. С. 53—56.
3. Иванов Е. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю.: Препринт "Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором"/ ИПЭФ РАН. — М., 2004.
4. Иванов Е. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. Разработка генератора высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором: Отчет: ИПЭФ РАН. — М., 2004.
5. Мешиков А. Н., Скворцов А. Ф., Шишко В. И., Еремин С. Н.// ПТЭ. 1990. № 3. С. 103—105.
6. Колоколов И. С., Лябин Н. А., Казарян М. А. и др.// Прикладная физика. 2003. № 3.

Статья поступила в редакцию 6 октября 2005 г.

High voltage nanosecond pulse generator basing on combined solid state switch

E. V. Ivanov, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich

Center of Scientific Instrumentation of Institute for Electrophysics and Electropower RAS,
Moscow, Russia

A new circuit approach was proposed for the designing of high voltage nanosecond pulse generators basing on insulated gate bipolar transistors. A solid state switch consisting of multiple IGBT connected in series was developed. Basing on the switch, the all solid state pulse generator was developed with the output pulse voltage of 10 kV current of 300 A pulse width of 100 ns and repetition rate up to 20 kHz. The results of the generator testing when working as a pumping source of copper vapor laser as well as when working with a resistive load are presented.