

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЯТОР МОЩНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРИБОРОВ С СЕТОЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2019 г. Д. А. Комаров^{1,2}, С. П. Масленников², *

¹НПП “Торий”,

Российская Федерация, 117393 Москва, ул. Обручева, 52

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,

Российская Федерация, 115409 Москва, Каширское шос., 31

*E-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 17.03.2017 г.

После доработки 18.12.2017 г.

Принята к публикации 21.12.2017 г.

Разработан и экспериментально исследован твердотельный импульсный модулятор для мощных СВЧ-приборов с сеточным управлением. В выходном каскаде модулятора использован коммутационный блок с двумя переключаемыми в противофазе высоковольтными коммутаторами микросекундного диапазона. Коммутаторы построены на основе последовательно соединенных МОП-транзисторов, обладают наносекундными временами переключения и рассчитаны на рабочие напряжения до 10 кВ. Испытания модулятора в составе стендов НПП “Торий” показали стабильность его работы в условиях управления мощными СВЧ-приборами.

DOI: 10.1134/S0033849419010091

ВВЕДЕНИЕ

В системах питания мощных СВЧ-приборов применяется множество модификаций импульсных модуляторов, различающихся по своему схемному исполнению и построенных на основе разной элементной базы. До настоящего времени для многих практических приложений задачи по генерации импульсов управления в модуляторах решаются с помощью электроразрядных коммутаторов, которые зачастую не удовлетворяют современным требованиям по целому ряду ключевых параметров.

Широкие перспективы в области создания новых типов модуляторов с улучшенными массогабаритными, ресурсными и энергетическими характеристиками, открываются при использовании для их построения современных полупроводниковых приборов. Коммутация высоких напряжений в выходных каскадах импульсных модуляторов может осуществляться твердотельными коммутаторами с составной структурой на основе последовательно и параллельно соединенных транзисторных модулей.

В данной статье представлены результаты работ по созданию твердотельного импульсного модулятора микросекундного диапазона для мощных СВЧ-приборов с сеточным управлением. Разработанный модулятор выполнен по двухтактной

схеме, в которой высоковольтные коммутаторы объединены в единый коммутационный блок и управляются с помощью одноканального блока управления (подмодулятора). В выходном каскаде модулятора используются построенные на основе МОП-транзисторов коммутаторы, обладающие наносекундными временами переключения при рабочих напряжениях до 10 кВ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Широкое распространение в импульсных модуляторах СВЧ-приборов с сеточным управлением получили двухтактные импульсные схемы с частичным разрядом накопителя энергии. Модуляторы такого типа благодаря поочередному срабатыванию двух ключевых элементов обеспечивают условия для формирования коротких фронтов импульсов напряжения на нагрузках емкостного характера, к которым относятся сеточные узлы мощных СВЧ-приборов.

В цепях управления современными сеточными СВЧ-приборами, как правило, требуются импульсы напряжения с амплитудами на уровне до 20 кВ при пиковых токах, не превышающих несколько десятков ампер. В качестве коммутаторов, удовлетворяющих этим условиям переключения, могут рассматриваться твердотельные ключи на ос-

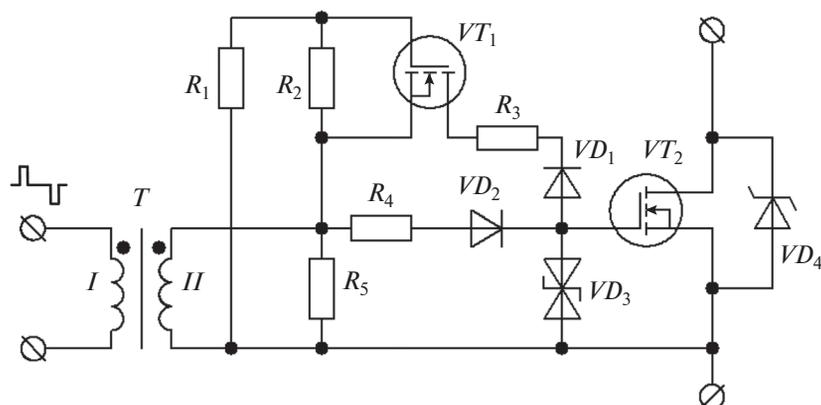


Рис. 1. Схема транзисторного модуля.

нове последовательно включенных МОП-транзисторов.

Из общего разнообразия схем двухтактных модуляторов отдельно могут быть выделены традиционные схемы, в которых для управления коммутаторами используются двухканальные подмодуляторы. В таких схемах импульсы управления коммутаторами смещены по времени относительно друг друга с обязательной паузой во времени, что является необходимым условием для предотвращения сквозных токов при одновременном открытии коммутаторов.

В качестве альтернативного варианта исполнения двухтактных модуляторов может рассматриваться схема, основу которой составляет единый коммутационный блок, состоящий из двух однотипных коммутаторов. Коммутаторы переключаются в противофазе по импульсным сигналам одноканального подмодулятора. Предварительные исследования режимов работы экспериментальных образцов двухключевых коммутационных блоков показали стабильность их переключения и высокую помехоустойчивость в условиях, соответствующих режимам управления мощными СВЧ-приборами [1].

Задачи повышения рабочих напряжений и токов твердотельных коммутаторов и коммутационных блоков на их основе могут решаться за счет увеличения числа входящих в их состав транзисторов, что открывает возможности для создания модуляторов с широким диапазоном выходных характеристик.

2. СТРУКТУРА МОДУЛЯТОРА

В разработанном модуляторе выходной каскад построен на основе двухключевого коммутационного блока, который объединяет два поочередно срабатывающих твердотельных высоковольтных коммутатора. Один из них выполняет функцию за-

рядного коммутатора (ЗК): при его включении формируется фронт и вершина импульса на выходе модулятора. При срабатывании второго (разрядного) коммутатора (РК) формируется спад выходного импульса.

Коммутаторы переключаются под управлением последовательности коротких (~0.5 мкс) импульсов напряжения разной полярности, генерируемых одноканальным подмодулятором (ПМ) [2]. При подаче отпирающего импульса на транзисторные модули (ТМ) одного из коммутаторов выполняется синхронная передача запирающего импульса обратной полярности на ТМ второго коммутатора [1]. Импульсы управления поступают на силовые транзисторы в ТМ через импульсные трансформаторы с изоляцией между обмотками на полное рабочее напряжение. Инверсия полярности управляющих импульсов достигается за счет изменения направления включения обмоток в этих трансформаторах.

Цепи управления ТМ высоковольтных коммутаторов построены на основе схемы с униполярным режимом управления (рис. 1). В этой схеме в паузе между импульсами отпирающего и запирающего сохраняется положительный потенциал на затворе силового транзистора VT_2 . Запирание ТМ происходит при поступлении отрицательного импульса управления, под действием которого открывается управляющий транзистор VT_1 и снимается напряжение с затвора VT_2 . Чтобы предотвратить пиковые перенапряжения на силовых транзисторах, параллельно им были установлены защитные диоды VD_4 . Транзисторные модули были изготовлены на отдельных печатных платах, подключаемых последовательно при их монтаже в единую сборку высоковольтного коммутатора.

Импульсный трансформатор (T) в схеме ТМ выполнен на кольцевом ферритовом сердечнике, который одновременно является конструктивной основой для вторичной обмотки. Высоковольтный

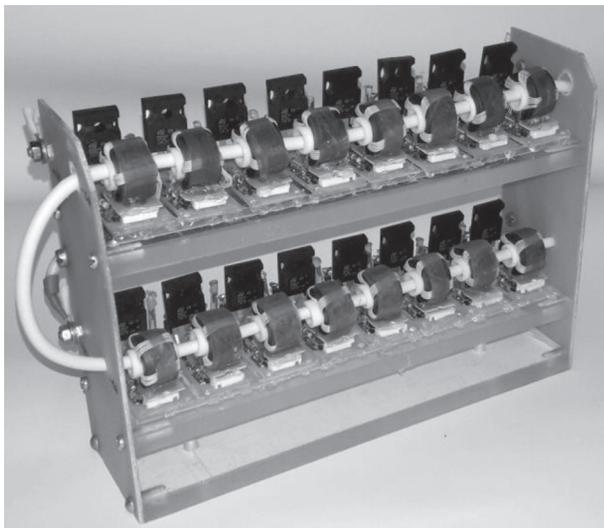


Рис. 2. Двухключевой коммутационный блок.

провод, последовательно пропускаемый вдоль оси импульсных трансформаторов всех ТМ, образует петлю одновитковой первичной обмотки. Такая структура коммутатора обеспечивает синхронность передачи импульсов управления на его ТМ, а также гальваническую развязку между ПМ и силовой частью ТМ.

В коммутационном блоке модулятора использованы коммутаторы, построенные на основе восьми последовательно включенных ТМ с силовыми транзисторами типа STW4N150. Испытания коммутаторов показали, что каждый из них способен за время < 50 нс переключать напряжения до 10 кВ при импульсном токе до 12 А [1, 2]. Внешний вид двухключевого коммутационного блока представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлена структурная схема импульсного модулятора с одноканальным ПМ и

коммутационным блоком с переключающимися в противофазе ЗК и РК. Срабатывание модулятора происходит под управлением внешнего синхроимпульса (СИ), подаваемого на ПМ, где формируются два коротких импульса управления синхронизированных с фронтом и спадом СИ.

Зарядка емкостного накопителя энергии ($C_{\text{нак}}$) производится от источника питания с максимальным уровнем выходного напряжения $U_0 = 10$ кВ. Сопротивления R_1 и R_2 (0.5...2 кОм) предназначены для ограничения амплитуды импульсных токов при перезарядке емкости нагрузки и несинхронном переключении коммутаторов. Для регистрации и контроля параметров импульсов тока через РК ($I_{\text{РК}}$) использован резистивный шунт R_3 .

В модуляторе предусмотрены две схемы аварийного отключения, осуществляющие контроль амплитуды импульса тока через ЗК ($I_{\text{ав}}$) и длительности импульса напряжения на выходе модулятора ($t_{\text{ав}}$). Кроме аварийных режимов во внешних цепях защитные цепи отслеживают внутренние сбои в работе модулятора.

Аварийный режим по току фиксируется при одновременном открытии ЗК и РК, а также при пробое одного из коммутаторов. В качестве датчика токовой защиты используется трансформатор тока (ТТ), который установлен в ветви между $C_{\text{нак}}$ и ЗК. Схема защиты по длительности импульса отслеживает возникновение нештатных режимов, связанных со сбоями в работе РК. Сигнал на вход этой схемы защиты поступает со встроенного делителя напряжения (ДН), который одновременно используется для контроля параметров выходного импульса напряжения ($U_{\text{вых}}$).

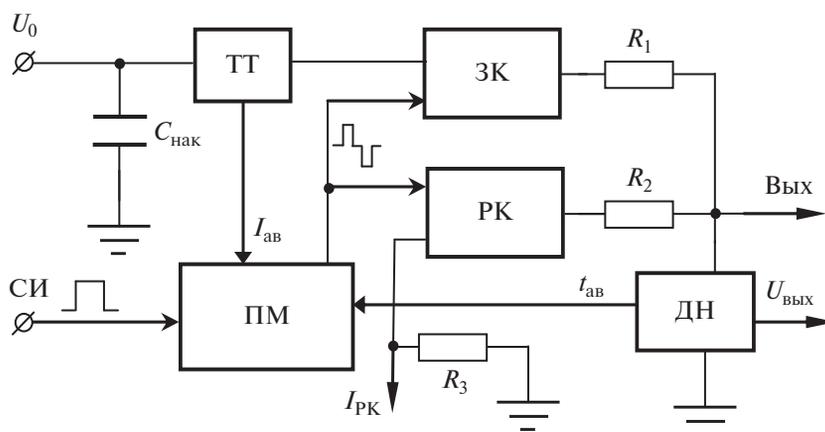


Рис. 3. Структурная схема модулятора.

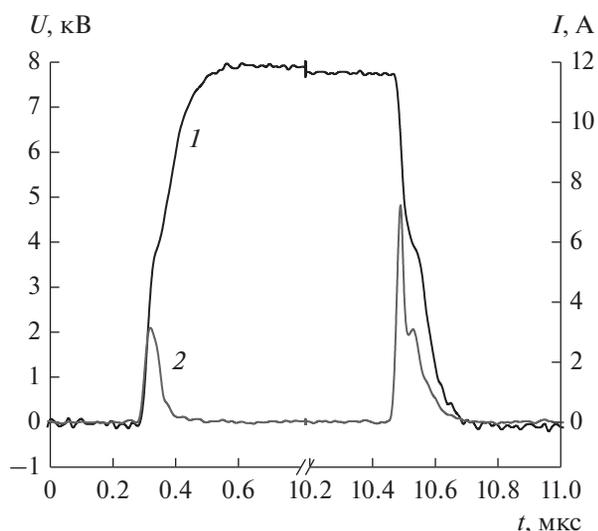


Рис. 4. Импульсы напряжения на активной нагрузке (1), а также тока РК (2).

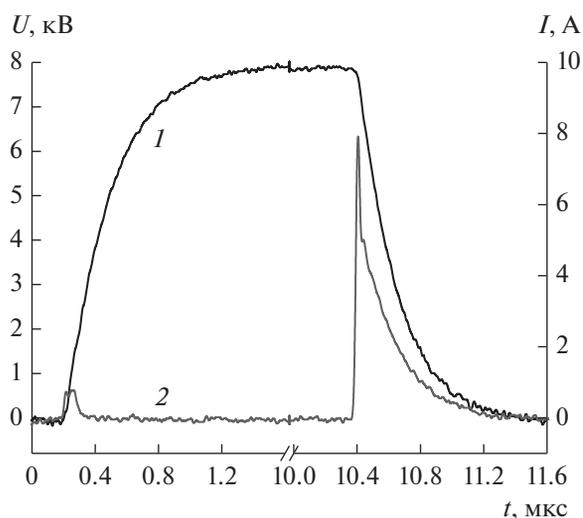


Рис. 5. Импульсы напряжения на резистивно-емкостной нагрузке (1), а также тока РК (2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЯТОРА

Испытания импульсного модулятора были проведены на действующих стендах динамических испытаний СВЧ-приборов НПП “Торий”. На первом этапе тестировалась работа модулятора с использованием эквивалентных резистивных и резистивно-емкостных нагрузок.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) через РК модулятора для резистивной нагрузки $R_n = 10$ кОм (временная шкала представлена с разрывом в средней части импульсов). Зарядное напряжение емкостного накопителя модулятора составляет $U_0 = 8$ кВ, длительность импульса напряжения $t_{и} \approx 10$ мкс. В выходном каскаде модулятора установлены токоограничивающие резисторы $R_1 = R_2 = 1.5$ кОм. Для регистрации импульсов высокого напряжения на нагрузке использован делитель напряжения Tektronix P6015A.

Полученные данные показывают, что переключение коммутационного блока сопровождается короткими (~ 50 нс) импульсами сквозного тока, формирование которых связано с дополнительной задержкой запирающего коммутаторов, возникающей при срабатывании управляющего транзистора в схеме ТМ [2].

На фазе включения коммутационного блока импульс сквозного тока проявляется в виде характерного выброса на осциллограмме тока через РК. Амплитуда этого токового броска ограничивается сопротивлениями R_1 и R_2 и в представленном случае достигает ~ 3.5 А. В процессе выключения коммутационного блока РК пропускает через себя суммарный импульс сквозного тока и тока пере-

зарядки емкости нагрузки через сопротивление R_2 . Амплитуда формируемого при этом импульса тока для рассмотренного режима достигает 8 А.

Несинхронность переключения коммутаторов сказывается на форме и длительности фронтов импульса напряжения на нагрузке. В средней части фронтов (одновременно с импульсами сквозного тока) наблюдается снижение скорости изменения напряжения. При этом на осциллограммах возникают характерные перегибы, а полное время переключения коммутационного блока увеличивается. Длительности фронтов импульсов напряжения на нагрузке для рассмотренного режима срабатывания составляют ~ 120 нс, что превышает собственные времена переключения коммутаторов (< 50 нс).

Сеточные узлы мощных СВЧ приборов представляют собой нагрузки с выраженным емкостным характером, которые, обладая относительно малым уровнем активной мощности, способны за счет емкостных пиковых токов оказывать существенное влияние на условия переключения коммутационного блока.

На рис. 5 представлены осциллограммы импульсов напряжения (1) на нагрузке, а также тока через РК (2) при работе модулятора с резистивно-емкостной нагрузкой, моделирующей сеточный узел СВЧ-прибора ($R_n \approx 300$ кОм; $C_n \approx 100$ пФ). Длительность фронтов импульса напряжения в этом режиме составляет около ~ 0.7 мкс и определяется динамикой перезарядки емкости нагрузки через токоограничивающие резисторы, установленные в выходном каскаде модулятора ($R_1 = R_2 = 1.5$ кОм).

При включении коммутационного блока через него протекает импульс сквозного тока с амплиту-

дой не более ~ 0.7 А, что значительно меньше, чем в условиях работы с активной нагрузкой (~ 3.5 А). Снижению амплитуды сквозного тока способствует то, что запираение РК происходит на начальной фазе зарядки емкости нагрузки и, как результат, при меньшем уровне приложенного к коммутатору напряжения. При выключении коммутационного блока через РК протекает импульс тока с амплитудой около 8 А и характерной длительностью спада ~ 0.5 мкс.

Разработанный модулятор был протестирован с различными эквивалентными нагрузками, а также при его работе в составе стендов динамических испытаний СВЧ-приборов НПП “Торий”. Полученные результаты продемонстрировали стабильность работы модулятора в диапазоне длительностей импульсов 2...200 мкс при рабочих напряжениях до 10 кВ и сопротивлениях нагрузок в пределах $10^3 \dots 10^7$ Ом.

При подключении модулятора к сеточным узлам приборов, находящихся под постоянным напряжением смещения, использовался импульсный разделительный конденсатор (20 нФ). Для защиты выходного каскада модулятора от кратковременных выбросов напряжения, возникающих при электрических пробоях в СВЧ-приборах, сигнал на их сетку передавался через блок фильтров с дополнительными защитными резисторами.

На рис. 6 представлена осциллограмма импульса напряжения на сетке ПП7 (измерения проведены делителем напряжения НВП-15) для одного из режимов испытаний: напряжение смещения на сетке составляет -200 В, амплитуда импульса “превышения” ~ 4 кВ, длительность импульса ~ 40 мкс. Спад плоской вершины, возникающий при передаче сигнала управления на сетку через разделительный конденсатор, составил $\sim 4\%$. Затягивание длительности фронтов формируемых на сетке импульсов напряжения (до 1.5 мкс) связано с влиянием дополнительных фильтрующих элементов, установленных в цепи передачи импульса модулятора на сеточный узел прибора.

Результаты испытаний разработанного твердотельного модулятора показали, что его характеристики удовлетворяют требованиям для исполь-

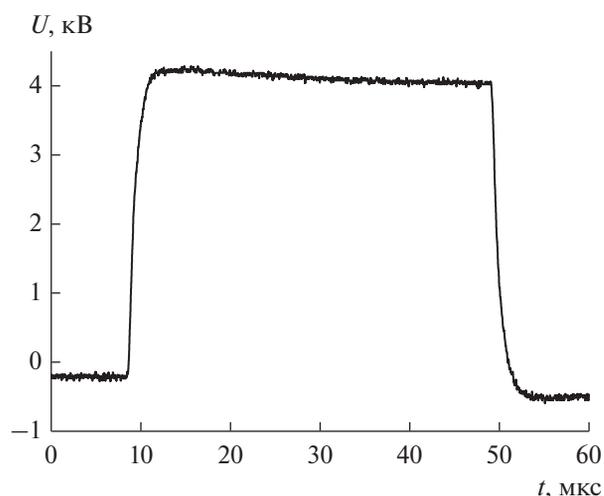


Рис. 6. Импульс напряжения на сетке ПП7.

зования при построении систем управления мощными СВЧ-приборами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и исследован твердотельный двухтактный модулятор мощных СВЧ-приборов с сеточным управлением. Выходной каскад модулятора построен на основе высоковольтных коммутаторов с последовательно соединенными МОП-транзисторами, которые обладают наносекундными временами переключения при напряжениях до 10 кВ и импульсных токах до 12 А. Экспериментально показано, что характеристики твердотельного модулятора удовлетворяют условиям эксплуатации в составе систем управления мощных СВЧ-приборов в различных областях применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серебрякова А.С., Масленников С.П.* // Матер. межд. науч.-техн. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2016”. Саратов: СГТУ, 2016. Т. 2. С. 351. doi 10.1109/APEDE.2016.7879027
2. *Масленников С.П., Серебрякова А.С.* // Вестник НИЯУ МИФИ. 2017. Т. 6. № 2. С. 161. doi 10.1134/S2304487X17020092