

УДК

Высоковольтные системы питания для СВЧ-устройств

В.П. Зыков, А.С. Руцкой, Д.А. Тентюк, К.И. Пученков, Л.Б. Кисляк, Д.Н. Уколов

ООО «ПАРАМЕРУС»

Аннотация: в работе рассмотрены современные высоковольтные системы питания для СВЧ-приборов импульсного и непрерывного режима работы. Представлены особенности применения твердотельных высоковольтных коммутаторов и многоканальных высоковольтных источников питания, предназначенных для питания и управления лампами бегущей волны, магнетронами, клистродами и другими СВЧ-устройствами. Рассмотрены характеристики высоковольтных коммутаторов серий HVS-HBM и HVS-HB, а также источников питания серий TWT-HVLP и EBWHP. Показаны возможности применения указанных устройств для питания СВЧ-приборов.

Ключевые слова: высоковольтный твердотельный коммутатор, высоковольтный источник питания, СВЧ-приборы, лампа бегущей волны, модуляция катода, модуляция сетки, силовая электроника.

1. Введение

Современные СВЧ-системы, применяемые в радиолокации, ускорительной технике, системах связи, научных установках и промышленном оборудовании, предъявляют высокие требования к системам высоковольтного питания и модуляции электронных приборов. Для питания магнетронов, клистронов, ламп бегущей волны (ЛБВ) и других вакуумных СВЧ-устройств требуется формирование высоковольтных импульсов либо стабилизированного постоянного напряжения с высокой повторяемостью параметров [1-3].

При этом системы питания должны обеспечивать:

- высокую электрическую прочность;
- устойчивость к пробоям нагрузки;
- низкий уровень джиттера;
- высокую скорость коммутации;
- стабильность формы импульсов;
- устойчивость к электромагнитным помехам;
- возможность цифрового управления и диагностики.

Дополнительной задачей является высокочастотная модуляция катода или сетки электронных приборов. В подобных системах особенно важны крутые фронты высоковольтных импульсов, позволяющие обеспечить быстрое управление электронным потоком и минимизировать переходные процессы в СВЧ-тракте.

Традиционно для коммутации высоковольтных цепей применялись тиратроны, газоразрядные разрядники и электромеханические ключи. Однако подобные решения обладают ограниченным ресурсом, требуют обслуживания и характеризуются заметным дрейфом параметров. Развитие современной силовой электроники позволило перейти к использованию полностью твердотельных высоковольтных систем [4, 5].

В данной работе рассматриваются решения компании «ПАРАМЕРУС» для построения высоковольтных систем питания и модуляции СВЧ-приборов, включая высоковольтные коммутаторы серий HVS-HBM и HVS-HB, а также многоканальные источники питания TWT-HVLP и EBWHP.

2. Твердотельные коммутаторы для модуляции катода СВЧ-приборов

Для импульсной модуляции катода СВЧ-приборов компанией «ПАРАМЕРУС» разработан высоковольтный твердотельный коммутатор HVS-HBM-25N-15. Устройство выполнено по полумостовой схеме и предназначено для формирования прямоугольных высоковольтных импульсов на нагрузке различного типа. Коммутатор обеспечивает коммутацию напряжений до 25 кВ и импульсных токов до 15 А. Принципиальная структура коммутатора HVS-HBM-25N-15 представлена на рис. 1.

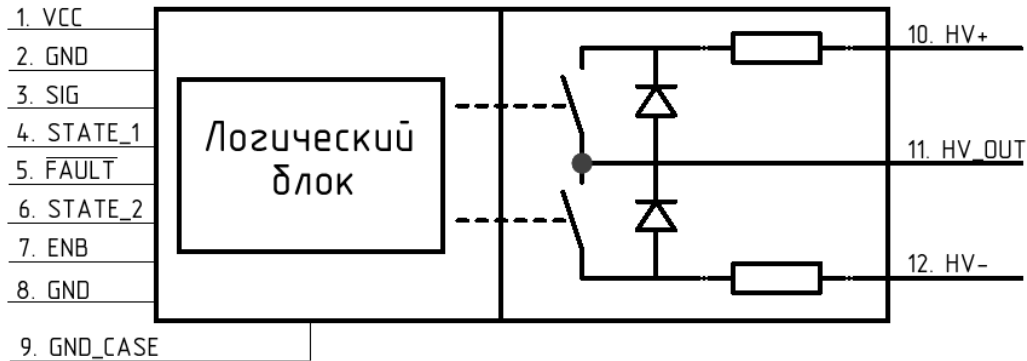


Рисунок 1. Принципиальная структура коммутатора HVS-HBM-25N-15.

Одним из наиболее важных преимуществ серии HVS-HBM является устойчивость к пробоям и коротким замыканиям нагрузки. В СВЧ-приборах, особенно работающих в импульсном режиме, возможно возникновение паразитных дуговых процессов и резкого изменения сопротивления нагрузки. Коммутатор сохраняет управляемость даже при коротком замыкании выхода и продолжает формирование импульсов тока, параметры которых соответствуют управляющему сигналу. Подобные свойства делают устройство особенно подходящим для модуляции катодного напряжения магнетронов, клистронов и других СВЧ-приборов [1, 6].

Коммутатор поддерживает:

- длительность импульсов от 5 мкс;
- работу в DC-режиме;
- коммутацию любого напряжения от 0 В до максимально допустимого;
- работу в контурах с «плавающей землёй»;
- TTL-совместимое управление и индикацию состояния [6].

Электрическая прочность гальванической развязки между управляющей и силовой частью составляет 30 кВ. Максимальная энергия накопительного конденсатора для HVS-HBM-25N-15 составляет 150 Дж, что при напряжении 25 кВ соответствует ёмкости 500 нФ. При коммутации нагрузки 1 пФ максимальная частота непрерывной работы достигает 4 кГц при 15 кВ и 1 кГц при 25 кВ.

На рис. 2 представлена осциллограмма высоковольтного импульса, полученного на коммутаторе HVS-HBM-35-15, по структуре и параметрам аналогичного HVS-HBM-25N-15 за тем отличием, что его максимальное рабочее напряжение составляет 35 кВ, а прочность гальванической развязки составляет 40 кВ. параметры нагрузки при испытаниях: ёмкость 100 пФ, сопротивление 30 кОм.

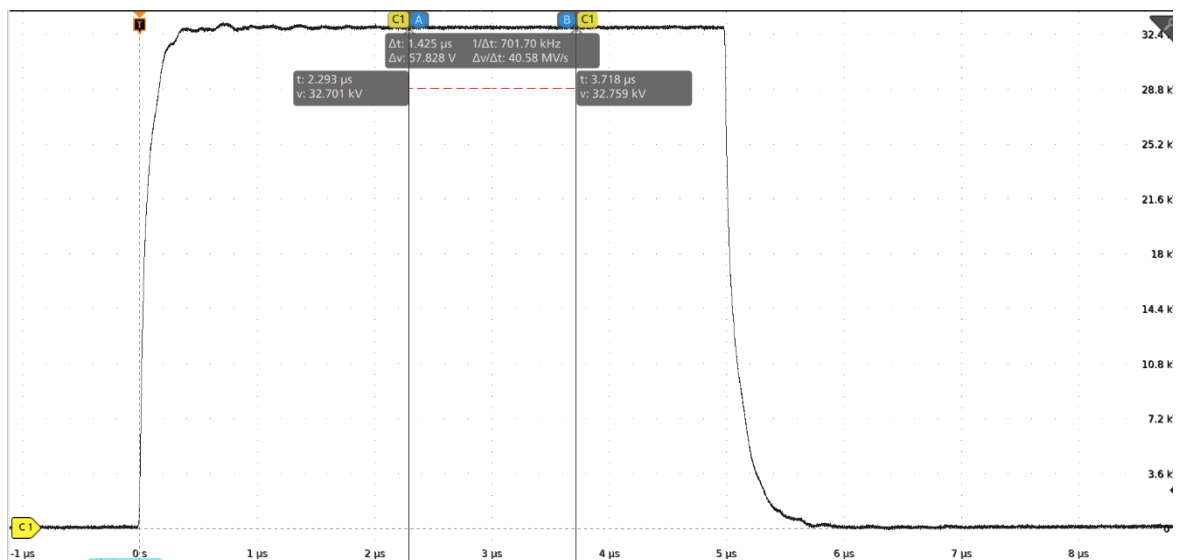


Рисунок 2. Оциллограмма высоковольтного импульса на нагрузке 30 кОм, 100 пФ (подключены параллельно), полученного с помощью твердотельного коммутатора HVS-HBM-35-15.

3. Высокоскоростная модуляция сетки электронных приборов

Для управления сетками ускорения и отклонения электронов в СВЧ-приборах требуются существенно более высокие скорости коммутации и крайне крутые фронты импульсов. Для решения подобных задач компанией «ПАРАМЕРУС» разработан высоковольтный коммутатор HVS-HB-6.5N-40-IR. Устройство представляет собой полностью твердотельный полумостовой высоковольтный коммутатор с цифровым управлением и полной гальванической развязкой силовой и управляющей части [2, 4, 7].

Коммутатор обеспечивает:

- коммутацию напряжений до 6.5 кВ;
- импульсный ток до 40 А;
- минимальную длительность импульса 500 нс;
- работу на частотах до 40 кГц в непрерывном режиме;
- работу в режиме пачек до 100 кГц.

Ключевой особенностью устройства является высокая скорость переключения. При коммутации нагрузки 12 пФ время нарастания импульса амплитудой 5.2 кВ составляет около 11.5 нс. Такие параметры позволяют использовать устройство для высокочастотной модуляции сетки электронных приборов и управления электронным пучком в импульсных СВЧ-системах [7].

В отличие от газоразрядных и ламповых коммутаторов, устройство обеспечивает:

- отсутствие дребезга на фронтах импульса;
- высокую повторяемость формы сигнала;
- низкий джиттер;
- практически неограниченный срок службы ввиду полностью твердотельной структуры [4, 5].

Дополнительным преимуществом является встроенный аналоговый монитор температуры силовых полупроводников ATS, позволяющий контролировать тепловой режим устройства в реальном времени. При нагреве силовой части выше 75 °С устройство автоматически переходит в режим ожидания.

4. Многоканальные источники питания для СВЧ-приборов

Для питания ламп бегущей волны и других вакуумных СВЧ-приборов компанией

«ПАРАМЕРУС» разработана серия многоканальных высоковольтных источников питания TWT-HVLP. Источники питания данной серии содержат четыре гальванически развязанных канала: анодный, накальный, фокусирующий и спиральный. Серия включает модели с положительным анодным напряжением от 4 до 12 кВ [8].

Каждый канал имеет независимую регулировку и индикацию тока и напряжения. Поддерживаются цифровые интерфейсы RS-232, RS-485, USB и Ethernet, что позволяет интегрировать источники питания в автоматизированные измерительные и технологические комплексы.

К основным особенностям серии относятся:

- защита от короткого замыкания;
- защита от перенапряжения;
- гальваническая развязка каналов;
- поддержка цифрового управления;
- наличие пользовательского программного обеспечения.

Внешний вид многоканального источника питания TWT-HVLP представлен на рис. 3.

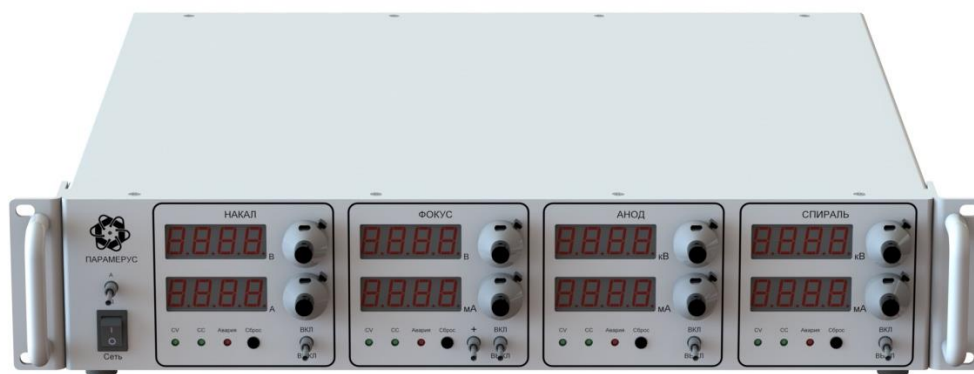


Рисунок 3. Внешний вид многоканального источника питания серии TWT-HVLP.

Для высокомогущных применений разработана серия источников питания EBWHP, обеспечивающая напряжения до 150 кВ и мощность до 60 кВт. Источники питания серии EBWHP поддерживают режимы стабилизации напряжения, тока и мощности, а также оснащаются системой защиты от дуговых разрядов, короткого замыкания и перегрева. Долговременная стабильность напряжения составляет порядка 100 ppm/час, а коэффициент стабилизации по нагрузке менее 0.05% [8].

5. Заключение

В работе рассмотрены современные высоковольтные системы питания и модуляции для СВЧ-приборов на основе твердотельных коммутаторов и многоканальных источников питания.

Показано, что коммутаторы серии HVS-HBM хорошо подходят для модуляции катодного напряжения СВЧ-приборов благодаря высокой электрической прочности, устойчивости к пробоям и возможности работы с высоковольтными импульсными нагрузками.

Высокоскоростные коммутаторы серии HVS-HB обеспечивают формирование импульсов амплитудой до 6.5 кВ с фронтами порядка 10 нс и могут эффективно использоваться для высокочастотной модуляции сетки электронных приборов.

Многоканальные источники питания серий TWT-HVLP и EBWHP позволяют реализовать комплексные системы питания вакуумных СВЧ-устройств с цифровым

управлением и развитой системой защит.

Использование полностью твердотельной архитектуры обеспечивает высокую повторяемость параметров, низкий джиттер, устойчивость к электромагнитным помехам и длительный ресурс работы, что делает подобные решения перспективными для современных СВЧ-комплексов и научных установок.

Список литературы

1. Gilmour A. S. Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons. — Boston : Artech House, 2011. — 845 p.
2. Barker R. J., Schamiloglu E. High-Power Microwave Sources and Technologies. — IEEE Press, 2001. — 888 p.
3. Benford J., Sweigle J. A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. — 3rd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2016. — 778 p.
4. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М. : Наука, 2004. — 704 с.
5. Mesyats G. A. Pulsed Power. — Springer, 2005. — 577 p.
6. Paramerus LLC. High Voltage Solid-State Switches HVS-HBM Series: Technical Documentation. — 2025.
7. Paramerus LLC. High-Speed High Voltage Switches HVS-HB Series: Technical Documentation. — 2025.
8. Paramerus LLC. Multi-Channel High Voltage Power Supply Systems for Microwave Vacuum Electronics. Product Catalog. — 2025.