

## ИМПУЛЬСНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ МОЩНОЙ С.В.Ч.-ЭЛЕКТРОНИКИ

© 2015 г. В. Я. Савкин\*, \*\*, Д. В. Яковлев\*\*

\*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

\*\*Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: V.Ya.Savkin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 21.11.2014 г.

Описан разработанный в ИЯФ им. Будкера импульсный высоковольтный модулятор для питания мощной вакуумной с.в.ч.-электроники. Модулятор рассчитан на напряжение 70 кВ, ток 25 А, длительность импульса до 5 мс и стабильность вершины на уровне 1%. Источник построен по схеме с частичным разрядом и собран из последовательно соединенных одинаковых секций емкостных накопителей энергии на напряжение 5.4 кВ каждая, с ключами коммутации на IGBT-транзисторах и питанием от аккумуляторов. Для обеспечения требуемой стабильности вершины в модулятор встроена система стабилизации выходного напряжения. Частота следования импульсов –  $1/100 \text{ с}^{-1}$ . Изложен принцип работы модулятора и представлены электрические схемы конденсаторных секций. В настоящее время два источника такого типа прошли испытания и работают в составе системы микроволнового нагрева плазмы мощностью 0.8 МВт.

DOI: 10.7868/S0032816215050134

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из самых надежных методов нагрева плазмы в термоядерных установках является нагрев мощными пучками миллиметровых волн. При этом необходимую мощность на уровне 1–2 МВт (для одного устройства) могут обеспечить только вакуумные электронные с.в.ч.-генераторы, среди которых самыми мощными и технически развитыми для данного диапазона длин волн являются гиротроны. Для обеспечения работы этих устройств в непрерывном режиме используются сложные и дорогостоящие системы питания, способные выдавать напряжение до 100 кВ при токе несколько десятков ампер, отвечающие при этом особым требованиям стабильности выходного напряжения. Однако для многих экспериментальных задач вполне достаточны импульсные источники питания, среди которых наибольшее распространение получили импульсные высоковольтные модуляторы с емкостными накопителями энергии.

В данной работе описан такой высоковольтный модулятор, созданный в ИЯФ им. Будкера для питания гиротронов комплекса микроволно-

вого нагрева плазмы (0.8 МВт, 54.5 ГГц) на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка [1], ИЯФ им. Будкера).

### ОПИСАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МОДУЛЯТОРА

Требования к высоковольтному питанию гиротронов, как мощных вакуумных с.в.ч.-приборов, описаны в [2]. Исходя из конкретных требований к высоковольтному импульсу, определяющихся типом применяемых гиротронов и режимом работы установки ГДЛ, были выбраны следующие целевые параметры: напряжение 70 кВ при стабильности вершины на уровне 1%, ток до 25 А и длительность импульса до 5 мс при частоте повторения не менее  $1/100 \text{ с}^{-1}$ . Кроме того, в модуляторе должна быть предусмотрена система защиты, ограничивающая максимальную энергию, выделяющуюся в гиротроне при высоковольтном пробое на уровне 10 Дж.

Модулятор построен по схеме емкостного накопителя с частичным разрядом. Он состоит из 16 идентичных последовательно соединенных секций, рассчитанных на напряжение холостого

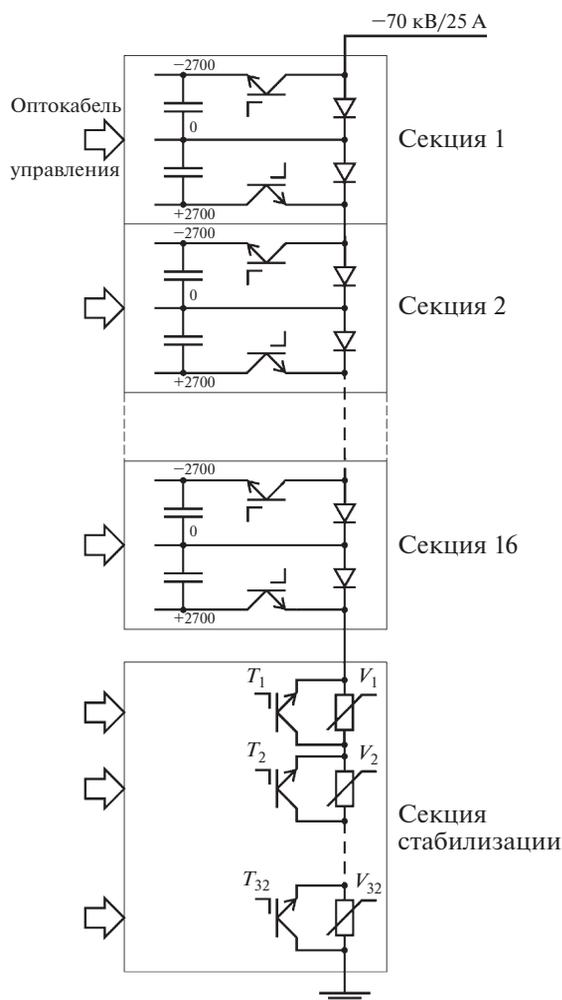


Рис. 1. Блок-схема модулятора.

хода 5.4 кВ. Блок-схема модулятора приведена на рис. 1.

Стабилизация вершины импульса при разряде конденсаторов производится дискретным способом – во время импульса изменяется число варисторов СН2-2А в последовательной цепи, включенной в положительной (низкопотенциальной) ветви выхода модулятора. За время импульса суммарное напряжение конденсаторных батарей снижается на ~12 кВ при длительности рабочего импульса 5 мс. Поэтому суммарное напряжение варисторов в цепи стабилизации составляет ~13 кВ. В начале импульса все варисторы включены в токовую цепь, и их суммарное напряжение вычитается из суммарного напряжения конденсаторных батарей. По мере разряда батарей варисторы по очереди закорачиваются IGBT-транзисторами, подключенными параллельно варисторам и управляемыми общей схемой управления, преобразующей сигнал ошибки выходного напряжения модулятора в

числовой код. Таким образом, выходное напряжение модулятора поддерживается на заданном уровне с квантом регулирования напряжения 0.4 кВ. Упрощенная схема секции модулятора представлена на рис. 2.

Каждая секция состоит из двух разнополярных полусекций с зарядным напряжением 2700 В. Конденсаторная батарея полусекции состоит из 3 конденсаторов К75-28 (100 мкФ, 3000 В). Коммутация напряжения батареи производится ключом из 4 последовательно включенных IGBT-транзисторов Infineon BUP314, напряжение на которых делится при помощи варисторов СН2-2А на напряжение 680 В. Управляющие сигналы подаются по оптоволоконным линиям связи – по одной на каждую секцию. Световой импульс длительностью <50 мкс включает зарядку конденсаторных батарей перед рабочим импульсом. При подаче светового импульса длительностью >50 мкс происходит включение модулятора на нагрузку, при этом продолжительность высоковольтного импульса совпадает с длительностью управляющего светового импульса >5 мс обрывается в схеме управления секцией. Каждый ключ содержит индивидуальную схему защиты, приводящую к его отключению при токе в нагрузке >40 А. Быстродействие схемы защиты составляет примерно 10 мкс. *LR*-цепь на выходе секции предназначена для снижения энергии, выделяемой на транзисторах ключа при пробое в нагрузке. На передней панели секции размещены вольтметры напряжения на конденсаторных батареях полусекций, а также светодиоды индикации процесса зарядки конденсаторных батарей, рабочего импульса и индикации степени заряда аккумуляторов. Зарядка конденсаторных батарей перед рабочим импульсом происходит в каждой секции через транзисторный инвертор 2700 В/20 кГц/50 Вт, питающийся от двух необслуживаемых аккумуляторов  $A_1, A_2$  (12 В/7 А · ч). Применение аккумуляторов позволило избежать трудностей, связанных с высоковольтной прочностью цепей зарядки конденсаторных батарей модулятора. Емкости аккумуляторов хватает на неделю работы модулятора на установке ГДЛ. По истечении этого периода аккумуляторы заряжаются в течение 12 ч от специального зарядного устройства.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И НАДЕЖНОСТЬ МОДУЛЯТОРА

Изначальная помехоустойчивость системы оказалась невысокой, поскольку в секциях в це-

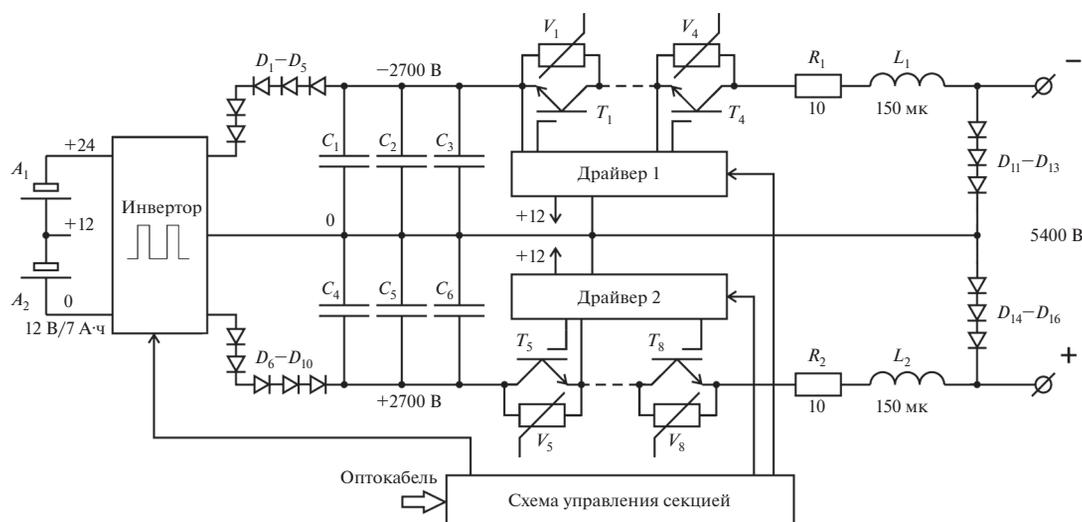


Рис. 2. Упрощенная схема секции модулятора.  $T_1$ – $T_8$  – BUP314;  $D_1$ – $D_{10}$  – SF1600,  $D_{11}$ – $D_{16}$  – RHRG 30120;  $C_1$ – $C_6$  – К75-28-100 мкФ-3000 В;  $V_1$ – $V_8$  – CH2-2A-680.

лях удешевления отсутствуют какие-либо экранирующие элементы. Основной мерой, позволившей снизить влияние наводок на схемы управления ключами, стала более жесткая реализация логики работы микросхем к.м.о.п.-серий, а именно: запрет на запуск секции при длительности запускающих импульсов  $< 10$  мкс и введение “мертвого времени”, исключающего повторный запуск секции по окончании рабочего импульса или при срабатывании защиты по превышении тока нагрузки. Кроме этого, в схемы были введены дополнительные фильтры. Помехоустойчивость схем управления оказалась достаточной для работы в условиях электрических полей, возникающих в условиях реальных высоковольтных пробоев.

Надежность работы модулятора в штатном режиме определяется, в основном, надежностью силовых транзисторов и диодов секций. После экспериментальной доводки схмотехники управления секций в реальной работе на гиротрон число отказов в модуляторе не превышает одного в несколько месяцев. При отказе секции она оперативно заменяется на запасную, и время простоя в работе модулятора не превышает получаса. На рис. 3 приведены осциллограммы выходного напряжения и тока модулятора в рабочем импульсе на гиротроне. Приведена также осциллограмма напряжения на цепи стабилизации, иллюстрирующая ее работу.

Конструктивно модулятор представляет собой этажерку из стеклотекстолита, полками которой

служат сами секции. Габариты модулятора составляют  $600 \times 1000 \times 2200$  мм. Внешний вид модулятора показан на рис. 4.

## ВЫВОДЫ

К достоинствам разработанного модулятора следует отнести простую этажерочную конструкцию, в которой практически отсутствуют пробле-

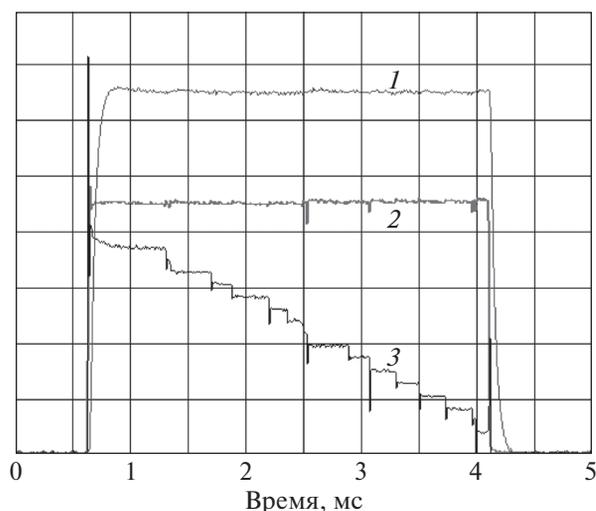


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на гиротроне. 1 – напряжение на гиротроне (10 кВ/деление); 2 – ток гиротрона (5 А/деление); 3 – напряжение на секции стабилизации (2 кВ/деление).



Рис. 4. Внешний вид модулятора.

мы с высоковольтной прочностью. Данный вариант исполнения позволил отказаться от сложных в изготовлении высоковольтных экранов при сохранении высокой помехоустойчивости. Кроме того, при использовании в качестве источников питания для секций индивидуальных аккумуля-

торных батарей исчезает необходимость в высоковольтных разделительных трансформаторах. Наконец, предложенный в данной работе дискретный метод стабилизации вершины импульса выходного напряжения продемонстрировал полную адекватность предъявляемым к модулятору требованиям по питанию высоковольтных резонансных вакуумных приборов, что было подтверждено calorиметрическими измерениями с.в.ч.-мощности.

Используемая схема предоставляет широкие возможности по модернизации модулятора. Модульный принцип позволяет масштабировать выходное напряжение путем изменения числа задействованных секций. Длительность рабочего импульса, в свою очередь, может быть увеличена при замене конденсаторных батарей на более емкие. При замене силовых ключей на более мощные возможно также увеличение выходного тока модулятора. Частота следования импульсов, которая в настоящее время задана режимом работы установки ГДЛ, в свою очередь, может быть значительно увеличена соответствующим увеличением мощности встроенных в секции инверторов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-12-01007.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A.A., Prikhodko V.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. V. 55. P. 063001; doi 10.1088/0741-3335/55/6/063001
2. *Денисов Г.Г., Запелалов В.Е., Литвак А.Г., Мясников В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 10. С. 845.