

УДК 621.384.64

## **МОЩНЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА ЧАСТОТУ 81 МГц ДЛЯ СИСТЕМЫ ВЧ-ПИТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ТЕРАВАТТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИТЭФ**

*В. Г. Кузьмичев, А. М. Раскопин, А. М. Козодаев*

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Представлены результаты расчетов, моделирования и испытаний усилительных каскадов на частоту 81 МГц для ускорителя интенсивного пучка тяжелых ионов. Каскады построены на триоде ГИ-27АМ. Выходная импульсная мощность усилительных каскадов составляет 3 МВт. Рассматриваются проблемы, связанные с режимом работы каскадов, электрической прочностью и конструктивным исполнением отдельных узлов.

The results of analysis, modelling and testing 81 MHz amplifiers for heavy ion linear accelerator are presented. Stages were built with GI-27AM triode. The output pulse power is equal to 3 MW. Operating mode, electric strength and design features of these amplifiers are discussed.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В московском Институте теоретической и экспериментальной физики ведутся работы по сооружению тераваттного накопительного комплекса (ТВН). В качестве инжектора ТВН предлагается использовать линейный ускоритель тяжелых ионов с выходной энергией 7 МэВ/нуклон и током 40 мА. Резонансная система ускорителя состоит из двух резонаторов с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) и пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ) [1].

Для возбуждения резонаторов потребуется два канала с выходной мощностью 1,5 и 4 МВт соответственно (с учетом потерь в передающих трактах и затрат ВЧ-мощности на ускорение пучка). Инжектор будет работать в «пакетно-импульсном» режиме при длительности ВЧ-импульсов 300 мкс и частоте повторения 20 имп./с. Длительность пакета 30 с. Пауза между пакетами будет определяться энергетическими параметрами оборудования всего накопительного комплекса. Эти данные учитывались при выборе структурной схемы системы ВЧ-питания и разработке усилительных каскадов.

### **1. ВЫБОР ГЕНЕРАТОРНОЙ ЛАМПЫ И СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Особенностью режима работы системы ВЧ-питания инжектора ТВН является высокая импульсная мощность при относительно небольшой средней мощности. Наиболее

подходящей лампой для использования в оконечных каскадах является триод ГИ-27АМ с предельной выходной мощностью около 4,5 МВт в импульсе. Так как для возбуждения второго резонатора требуется мощность почти предельная для этой лампы, то целесообразно использовать в канале возбуждения этого резонатора два оконечных каскада с выходной мощностью по 2 МВт каждый. Структурная схема возбуждения резонаторов представлена на рис. 1. Канал возбуждения первого резонатора состоит из двух мощных каскадов К1, К2 и стойки предварительного усиления (СПУ).

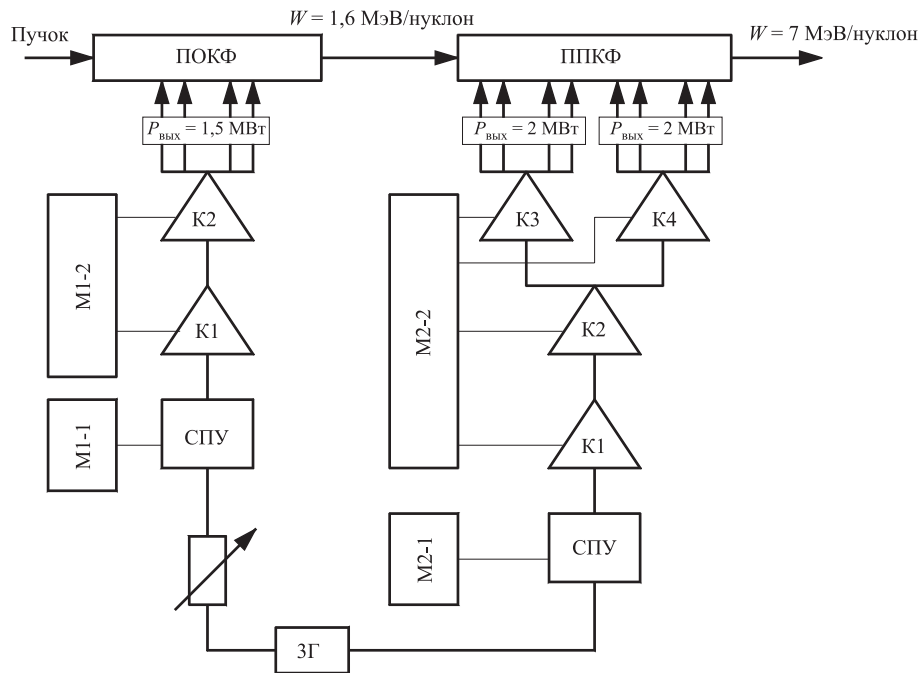


Рис. 1. Структурная схема возбуждения резонаторов

В канале возбуждения второго резонатора используется четыре мощных каскада К1–К4 с общим коэффициентом усиления более 21 дБ. Разработка усилительных каскадов на частоту 81 МГц проводилась на базе резервных каскадов на частоту 300 МГц [2]. На начальном этапе разработки рассматривалось несколько вариантов построения анодного контура. Длина четвертьволнового контура оказалась недостаточной для размещения узлов связи и высоковольтных разделительных конденсаторов. Длина полуволнового контура на основе однородной коаксиальной линии становится очень большой. По конструктивным соображениям было решено в одном из вариантов использовать дополнительную неактивную лампу в качестве контурной емкости, в другом варианте применить неоднородную коаксиальную линию.

Расчеты колебательных систем каскадов проводились как методами теории электрических цепей с распределенными параметрами, так и с помощью специальных программ, основанных на принципах электродинамики.

## 2. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ НЕАКТИВНОЙ ЛАМПОЙ

Выходной колебательный контур каскада с дополнительной неактивной лампой представляет собой резонансную систему с распределенными параметрами в виде коаксиальной линии, нагруженной с обоих концов междуэлектродными емкостями генераторных ламп. Верхняя лампа является активной (к ней подводится накал и мощность возбуждения), а нижняя — неактивной. Неактивной может быть отработанная лампа с неповрежденной сеткой. Эта лампа служит в качестве контурной емкости и обеспечивает симметричное распределение поля в анодном контуре, как в двухтактной схеме.

Схема конструкции усилительного каскада показана на рис. 2. Конструкция каскада состоит из блока питания и расположенной над ним высокочастотной части. Электрическая длина резонатора составляет  $\lambda/2$  и с учетом укорачивающих емкостей анод-сетка генераторных ламп равна 800 мм. Внутренний диаметр наружной трубы анодного резонатора равен 440 мм и определяется размером соответствующего узла базового каскада на 300 МГц. Неактивная лампа с одной стороны жестко крепится сеточным выводом к плунжеру, с другой — скользящим контактом к внутреннему цилиндру резонатора. Перемещение плунжера вместе с неактивной лампой обеспечивает подстройку частоты анодного контура в пределах 5%. В плоскости узла ВЧ-напряжения к аноду лампы через специальный ввод подводится высокое напряжение и вода. Для уменьшения линейных размеров ввод выполнен в виде комбинированной линии, состоящей из отрезков коаксиальных и спиральных линий. Связь между резонатором и нагрузкой осуществляется петлевым способом.

Максимальное значение напряженности электрического поля на поверхности внутреннего проводника при анодном напряжении 30 кВ составляет 10,5 кВ/см.

Входное устройство выполнено в виде последовательного коаксиального трансформатора, согласующего входное сопротивление генератора с волновым сопротивлением кабеля. Ток накала через четвертьволновый дроссель подводится к лампе в районе минимума электрического поля.

Применение неактивной лампы позволило уменьшить длину анодного резонатора по сравнению с резонатором, выполненным на основе однородной коаксиальной линии,

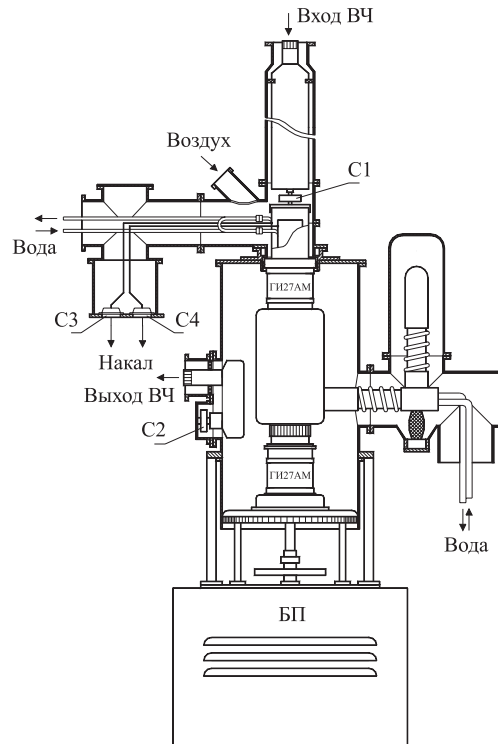
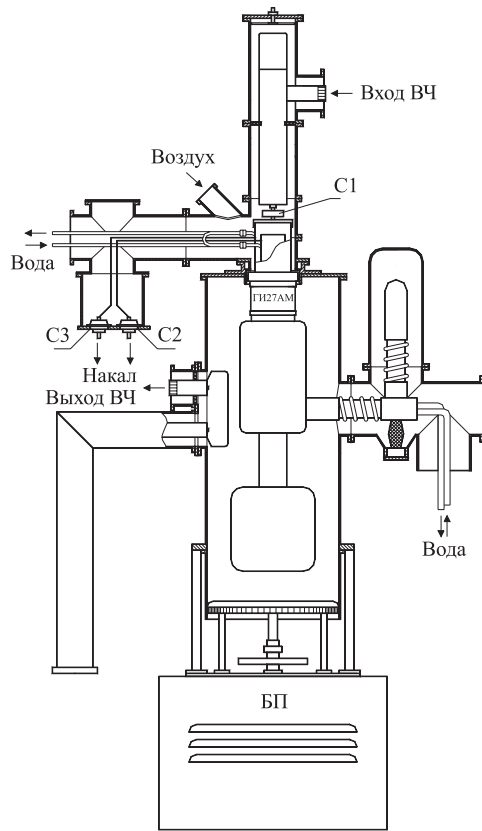


Рис. 2. Схема конструкции каскада с дополнительной лампой

почти на 42 %. Испытание каскада проводилось в режиме внешнего возбуждения при нагрузке на три эквивалента с сопротивлением 50 Ом. При анодном напряжении 27 кВ и напряжении накала 0,9 от номинала выходная мощность составила 2 МВт, коэффициент усиления по мощности — 7, КПД — 65 %. Коэффициент стоячей волны на входе каскада в процессе испытаний не превышал 2.

### 3. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С НЕОДНОРОДНЫМ КОНТУРОМ

Схема конструкции усилительного каскада с анодным контуром на основе неоднородной коаксиальной линии показана на рис. 3. Входное устройство в этом каскаде выполнено в виде полуволнового коаксиального резонатора, разомкнутого на конце и нагруженного катодно-сеточной емкостью лампы.



Выходной колебательный контур представляет собой полуволновую линию, нагруженную с одной стороны на емкость анод-сетка лампы ГИ-27АМ, а с другой — на торцевую емкость анодного контура.

Внутренний проводник коаксиальной линии состоит из трех участков с разными волновыми сопротивлениями:  $W_1 = 42 \text{ Ом}$ ;  $W_2 = 93,8 \text{ Ом}$ ;  $W_3 = 27 \text{ Ом}$ . Волновые сопротивления и длины однородных участков выбирались из условия сокращения продольного размера анодного резонатора до минимального значения при сохранении электрической прочности, обеспечивающей надежную работу каскада при выходной мощности до 3,5 МВт. Длина анодного резонатора составляет 1060 мм. Внутренний диаметр наружной трубы равен 440 мм.

В плоскости узла ВЧ-напряжения через специальный ввод подводится высокое напряжение и вода, охлаждающая анод лампы. По конструктивному исполнению и электрическим параметрам ввод абсолютно идентичен анодному вводу усилительного каскада с дополнительной неактивной лампой.

Связь между резонатором и внешней нагрузкой осуществляется с помощью петель, размещенных в пучности магнитного поля.

Рис. 3. Схема конструкции каскада с неоднородным контуром

Компенсация индуктивности петли достигается регулировкой длины коаксиального шлейфа. Конструкция корпуса резонатора позволяет подключить четыре выходных узла связи.

Максимальным значениям напряженности поля в резонаторе соответствуют точки, которые находятся на поверхности участка линии с низким волновым сопротивлением

и определяют электрическую прочность всего каскада. При анодном напряжении 30 кВ напряженность поля достигает значения 15 кВ/см.

Испытания каскада проводились в режиме внешнего возбуждения при нагрузке на четыре одинаковых эквивалента с сопротивлением 50 Ом. При анодном напряжении чуть больше 30 кВ и напряжении накала 0,9 от номинального значения выходная мощность составила 3 МВт, коэффициент усиления по мощности — 7,5, КПД — 68%. Коэффициент стоячей волны на входе каскада в процессе испытаний оставался практически неизменным и не превышал 1,8.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны и испытаны два варианта усилительных каскадов на частоту 81 МГц с выходной импульсной мощностью порядка 3 МВт. В процессе испытаний усилительных каскадов проведены измерения радиотехнических характеристик, исследовано влияние питающих напряжений и входной мощности на параметры режимов. Испытания полностью подтвердили результаты расчетов и возможность использования этих усилителей в системе ВЧ-питания линейного ускорителя тяжелых ионов в качестве предварительных и окончательных каскадов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Першин В. И. и др.* Линейный ускоритель многозарядных ионов на энергию 8 МэВ/н — инжектор ускорительного комплекса ТВН-ИТЭФ // АЭ. 2003. Т. 94, вып.1.
2. *Звягинцев В. Л. и др.* Мощный импульсный генератор на частоту 297 МГц // Тр. XI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц, 25–27 окт. 1988 г. Дубна, 1989. Т. I. С. 302–305.