

## Мощный УКВ-генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей

В.С. Арбузов, А.А. Бушуев, Э.И. Горникер, А.А. Кондаков, В.М. Петров  
*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера РАН, Новосибирск, Россия*

В середине 80-х годов в ИЯФ СО АН СССР были поставлены задачи — модернизировать накопитель ВЭПП-4 с целью увеличения тока и энергии электрон-позитронных пучков [1], а также разработать и построить два специализированных накопителя: в Зеленограде — ТНК [2] и в Москве — Сибирь-2 в ИАЭ им. Курчатова [3]. Частота для всех ВЧ-систем была выбрана близкой к 180 МГц. Для ВЧ-системы ВЭПП-4 максимально необходимая мощность составляла около 1 МВт, для Сибири-2 — 400 кВт, для ТНК — 200 кВт. Кроме того, рассматривался проект создания мощного микротрона для лазера на свободных электронах, для которого требовались генераторы с общей мощностью до 2 МВт [4, 5, 6]. В ИЯФ СО АН было принято решение создать генератор непрерывной ВЧ-мощности на этой частоте на основе тетрода ГУ-101А с водяным охлаждением, разработанного к этому времени на СЕД-СПб (“Светлана”), г. Санкт-Петербург.

Допустимые величины мощности, рассеиваемой на электродах тетрода, и напряжений питания приведены в табл. 1. Для повышения надежности работы и увеличения срока службы тетрода было решено использовать тетрод в облегченном режиме работы (величины в скобках).

Таблица 1:

На экранной сетке	3	(2)	кВт
На аноде	250	(150)	кВт
На управляющей сетке	1,5	(1)	кВт
Анодное напряжение	14	(8,5)	кВ
Экранное напряжение	1,2	(1)	кВ
Напряжение накала	15	(12,5)	В
Ток накала	650	(580)	А
Рабочая частота	200	(180)	МГц

Для создания ряда ВЧ-генераторов с максимальной выходной мощностью от 150 до 600 кВт и упрощения производства, сборки и настройки был предложен модульный принцип построения выходного каскада генератора.

Модульная схема построения анодного контура выходного каскада генератора существенно упрощает как сложение мощностей, генерируемых каждой лампой, так и настройку генератора. Выходной каскад можно собрать из любого количества (от одного до четырех ламповых модулей) в зависимости от требуемой ВЧ-мощности. Для любого количества ламп в каскаде используется только один элемент настройки анодного контура каскада на резонансную частоту и один элемент для связи каскада с нагрузкой. При этом в любом варианте применяется одна и та же конструкция узла настройки анодного контура. Схема связи с нагрузкой определяется максимальной мощностью генератора. Для одномодульного (рис.2б) и двухмодульного каскадов (выходная мощность 150 и 300 кВт соответственно) применяется одна и та же конструкция узла связи с емкостной регулировкой величины коэффициента связи с передающей линией. В четырехмодульном каскаде (рис.3, выходная мощность до 600 кВт) применена конструкция узла связи с фиксированной величиной связи с линией передачи. Регулировка коэффициента связи с нагрузкой осуществляется трансформацией сопротивления в передающей линии. Конструкция соединений модулей между собой и с узлами подстройки и связи унифицирована.

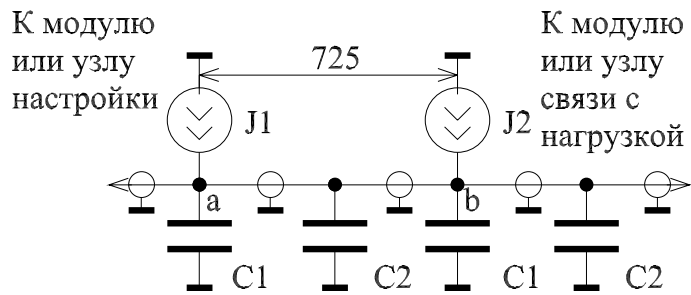


Рис. 1: Эквивалентная схема контура.

Эквивалентная схема анодного контура, в котором складываются мощности, генерируемые лампами (источники тока J1, J2), показана на рис.1. Размеры анодного контура подобраны так, чтобы на рабочей частоте матрица передачи между сечениями линии “a” и “b” имела вид, характерный для линии передачи с длиной, равной половине длины волны в ней:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

В этом случае фазы ВЧ-напряжений в сечениях “a” и “b” соседних модулей

отличаются на  $\pi$ , а амплитуды равны. Мощности, развиваемые источниками, подключенными в указанных сечениях, суммируются в нагрузке общей линии связи.

Напряжения на анодах ламп соседних модулей также в противофазе, а амплитуды пропорциональны емкостям между анодом и экранирующей сеткой, разброс величин которых не превышает 5%. Геометрическая длина линии передачи между сечениями “a” и “b” (725 мм) выбрана несколько меньше половины длины волны. Поэтому элементы матрицы передачи приводятся (на рабочей частоте) к единичному виду выбором величин емкостей C1 и C2, подключенных параллельно линии в указанных сечениях.

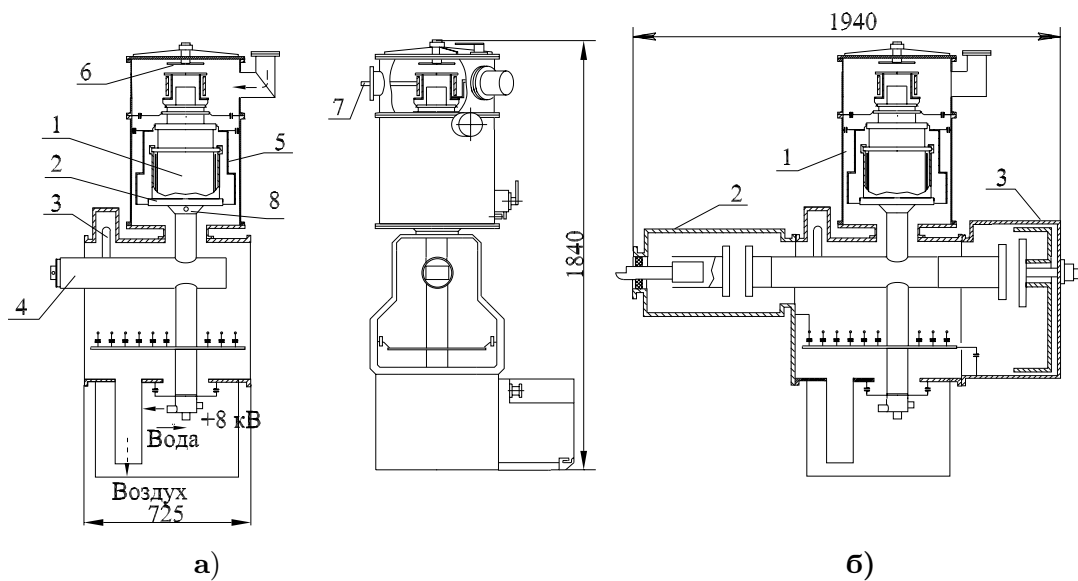


Рис. 2: Ламповый модуль (а); одномодульный каскад (б).

Эскизная схема лампового модуля для усилительного каскада, в котором реализован этот принцип сложения мощностей, приведена на рис.2а. Тетрод (1), помещенный в бак водяного охлаждения, конструктивно оформлен в легко отделяемый (для смены лампы) узел. Для оперативной замены лампы предусмотрен специальный разъем (8), размыкаемый через отверстие в корпусе модуля. Узел с тетродом присоединен к линии связи анодного контура (4). Настройка модуля производится фиксированной установкой размеров двух элементов. Высота накладного диска на анодном баке (2) изменяет импеданс C1, а длина шлейфа (3)

определяет импеданс  $C2$  в соответствии с эквивалентной схемой каскада. Особенностью схемы усилителя является также то, что блокировочной емкостью в цепи экранной сетки тетрода на рабочей частоте является только емкость между экранной и управляющей сетками.

Конструктивный конденсатор (5) служит для уменьшения доли ВЧ-тока анодно-сеточного контура, протекающего через блокировочные керамические конденсаторы в цепи экранной сетки. В конструкции анодного контура модуля предусмотрено также подключение четырех маломощных резистивных нагрузок (до 100 Вт) для подавления самовозбуждения в каскаде на высших модах колебаний. Входной контур модуля перестраивается по частоте конденсатором (6). Мощность возбуждения вводится коаксиальным фидером (7).

В одномодульном усилительном каскаде (рис.2б) ламповый модуль (1) объединен с узлом связи с нагрузкой (2) и узлом настройки частоты анодного контура (3). Отсутствие скользящих контактов в конструкции подвижных элементов этих узлов повышает надежность работы и не приводит к модуляции при настройке генератора. Это существенно для настройки ВЧ-системы при электронном пучке в ускорителе. На одномодульном каскаде при испытании ускоряющих резонаторов была получена мощность 135 кВт при КПД 62%. Коэффициент усиления каскада по мощности около 12.

Два генератора с одномодульным выходным каскадом в настоящее время эксплуатируются в ВЧ-системе инжектора для микротрона рекуператора [7]. Еще два таких же генератора установлены и работают в таком же ускорителе в Южной Корее (KAERI, г. Тайджон).

Двухмодульный каскад обеспечивал работу накопителя ВЭПП-4 до введения в действие следующего, более мощного усилителя. На нем была получена мощность 300 кВт при возбуждении пятирезонаторной ускоряющей системы. КПД каскада составил 66 %. Возбуждение каждой лампы независимое от отдельных предварительных каскадов. Оптимальный баланс фаз и амплитуд возбуждающих напряжений достигается с помощью настройки анодных контуров предварительных каскадов.

Такой же вариант конструкции выходного каскада установлен и работает на накопителе “Сибирь-2” в РИЦ “Курчатовский институт”. Оперативный диапазон перестройки частоты одномодульного каскада  $\pm 6$  МГц, двухмодульного —  $\pm 4$  МГц.

Проектная выходная мощность четырехмодульного варианта усилителя мощности (рис.3) составляет 600 кВт. Оперативный диапазон перестройки каскада  $\pm 2,7$  МГц.

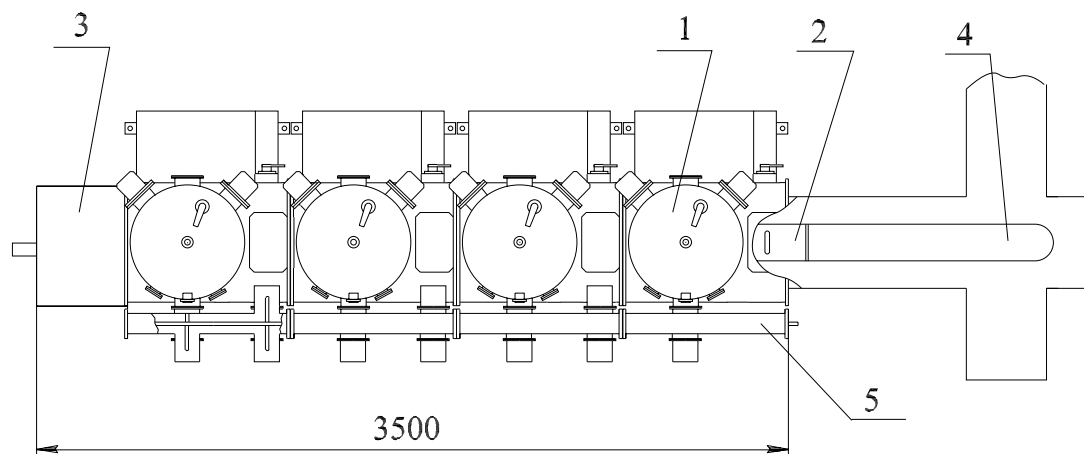


Рис. 3: Четырехмодульный каскад.

Четыре модуля (1) и узел настройки (3) соединены последовательно. Центральный проводник анодной линии связи (2) одновременно является внутренним проводником волноводно-коаксиального перехода (4), связывающего генератор с ускоряющей системой накопителя. Регулировка коэффициента связи генератора с ускоряющей системой предусмотрена в волноводном тракте, соединяющем генератор с резонаторами. Катодно-сеточные (входные) контура ламп объединены линией связи (5). Эквивалентная схема и принцип настройки входного контура 4-модульного каскада аналогичны схеме и настройке анодного контура (рис.1). Баланс амплитуд и фаз возбуждающих напряжений устанавливается с помощью емкостных шлейфов во входной линии связи.

Возможно применение этой конструкции для возбуждения двухмодульного варианта каскада. Каскад был испытан при возбуждении пятирезонаторной ВЧ-системы ВЭПП-4 в режиме с выходной мощностью 500 кВт.

КПД усилителя (мощность в нагрузке по отношению к мощности потребления от анодного выпрямителя) 53–54%. Максимальный КПД не был достигнут, так как ВЧ-напряжение на анодах в испытательном режиме было меньше критического. Дальнейшее повышение мощности было ограничено мощностью существующего источника анодного питания.

В настоящее время генератор с этим выходным каскадом и двухмодульным в качестве предварительного (в двухмодульном каскаде для экономичности накал и ВЧ-возбуждение подаются на одну из ламп) — обеспечивает работу накопителя ВЭПП-4. Все варианты исполнения усилителей устойчиво работают с любой нагрузкой (и без нагрузки) во всем диапазоне перестройки входного и выходного контуров и при любом уровне возбуждения на входе и не требуют установки развязывающих элементов между генератором и ускоряющей системой.

Опыт эксплуатации тетродов ГУ-101А в составе ВЧ-системы ВЭПП-4 показал, что срок их службы составляет около 6000–8000 часов. В проекте разрезного микротрона рекуператора, строящегося в ИЯФ в настоящее время, предусмотрено установить два ВЧ-генератора с четырехмодульным выходным каскадом.

### Список литературы

- [1] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-4М. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1988). — Дубна, 1989.
- [2] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, С.А.Беломестных и др. Высокочастотные системы накопительных колец комплекса ТНК. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1990). — Дубна, 1992.
- [3] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопительного комплекса “Сибирь-2”. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1988). — Дубна, 1989.
- [4] В.Г.Вещеревич, Н.А.Винокуров, П.Д.Воблый и др. Проект разрезного микротрона-рекуператора для лазера на свободных электронах. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1990). — Дубна, 1992.
- [5] V.Arbusov, S.Belomestnykh, A.Bushuev et al. RF System of the CW Race-Track Microtron-Recuperator for FELs. PAC 93.
- [6] N.G.Gavrilov, E.I.Gorniker, G.N.Kulipanov et al. Project of CW Race-Track Microtron-Recuperator for Free Electron Lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, December 1991, v.27, N12, pp.2626-2628.
- [7] G.Kurkin, V.Arbusov, N.Fomin et al. RF System of Electron Injector for the Race-Track Microtron-Recuperator. XVII International Conference on High Energy Accelerators. — Dubna, 1998.