

Мощные высокочастотные системы ИЯФ СО РАН

П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов., А.А.Бушуев, В.Г.Вещеревич, В.Н.Волков,
 Н.Г.Гаврилов, Э.И.Горникер, В.Н.Ерохов, М.М.Карлинер, Е.К.Кенжебулатов,
 А.А.Кондаков, С.А.Крутихин, Я.Г.Крючков, И.В.Купцов, Г.Я.Куркин,
 Л.А.Мироненко, В.Н.Осипов, В.М.Петров, А.М.Пилан, И.К.Седяров,
 А.Г.Трибендис, М.Ю.Фомин, Н.Г.Фомин, Е.Н.Харитонов.
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера РАН, Новосибирск, Россия

В конце 80-х годов в Институте ядерной физики СО АН СССР было решено построить мощные высокочастотные системы для накопителя со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4 (ИЯФ), накопителей СИ “Сибирь-2” (Институт ядерных исследований им. Курчатова) и ТНК (Зеленоград), разрезного микротрона-рекуператора (ИЯФ). К этому времени самым мощным вакуумным электронным прибором в сравнительно коротковолновом диапазоне ($f=200$ МГц), выпускаемым отечественной промышленностью, была лампа ГУ-101А. Эта лампа была разработана на объединении “Светлана” (г.Ленинград) по заказу ИФВЭ (г.Серпухов) для УНК. Поскольку ИЯФ имел опыт работы в этом частотном диапазоне ($f=180$ МГц) и имел некоторое количество резонаторов для ВЧ-системы ВЭПП-4, было решено строить ВЧ-системы перечисленных выше ускорителей на частоте 180 МГц с использованием ВЧ-генераторных ламп ГУ-101А и ГУ-92А. Параметры ускорителей и их ВЧ-систем приведены в табл. 1.

Таблица 1:

№	Ускоритель	ВЭПП-4	Сибирь-2	ТНК	Разрезной Микротрон- рекуператор
1.	Энергия ускоряемых частиц (ГэВ)	6.0	2.5	1.6–1.9	0.1–0.15
2.	Ток ускоряемых частиц (мА)	20×20	200	300	45
3.	ВЧ-мощность, потребляемая пучком (кВт)	130	150	50–90	55
4.	Количество резонаторов	6	2	2	19–51
5.	Макс. напряжение на одном резонаторе (МВ)	1.0	0.74	0.45	0.8
6.	Макс. суммарное напряжение на всех резонаторах (МВ)	6.0	1.48	0.9	12.8–38.4
7.	Шунтовое сопротивление резонатора (МОм)	6.4	6.4	4.0	4.0
8.	Максимальная мощность, рассеиваемая в резонаторе (кВт)	78	45	25	80
9.	Максимальная мощность, рассеиваемая в резонаторах (кВт)	468	90	50	1370–3930
10.	Номинальная мощность В.Ч. генераторов (кВт)	1000	400	400	1430–4000

Таким образом, для этих ускорителей необходимы были генераторы ВЧ-мощности на суммарную мощность $\sim 5,6$ МВт. Для того чтобы упростить и удешевить производство и монтаж на установках генераторов, была найдена возможность модульной конструкции каскадов на лампах ГУ-101А. В этом случае каскады собираются из трех модулей (рис.1): ламповый модуль 1, модуль вывода мощности из каскада 2 и модуль перестройки частоты 3. Модули вывода мощности одной стороной подсоединяются к выходному коаксиальному фидеру, а другой стороной — к ламповому модулю.

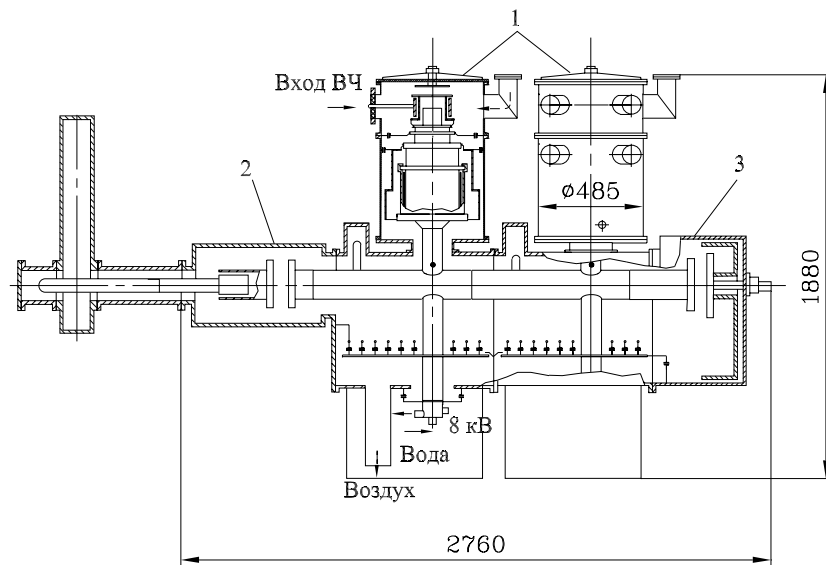


Рис. 1: Схематический чертеж генератора с двумя ламповыми модулями. 1 – ламповые модули, 2 – модуль вывода мощности, 3 – модуль перестройки частоты.

В каскаде может быть от одного до четырех ламповых модулей. Это обеспечивает соответственно выходные ВЧ-мощности на частоте ~ 180 МГц в непрерывном режиме 150; 300; 450; 600 кВт. Со свободной стороны последнего лампового модуля подсоединяется модуль перестройки частоты. Входные каскады генераторов были спроектированы по классической схеме на лампах ГУ-92А. Максимально допустимые параметры для лампы ГУ-101А показаны в табл. 2.

Таблица 2: Максимально-допустимые параметры для лампы ГУ-101А

Мощность, рассеиваемая на аноде	250 кВт
Напряжение на аноде	14 кВ
Напряжение на экранной сетке	1,2 кВ
Мощность, рассеиваемая на экранной сетке	3 кВт
Мощность, рассеиваемая на управляющей сетке	1,5 кВт
Напряжение накала	15 В
Ток накала	650 А
Рабочая частота	200 МГц.

Опытный образец двухлампового каскада на лампах ГУ-101А был произведен в мастерских ИЯФ. Массовое изготовление модулей генераторов было произведено в 1989–1991 гг. на Барнаульском радиозаводе. В выпрямителях анодного питания ВЧ-генераторов ВЭПП-4, “Сибирь-2” и ТНК используются тиристорные преобразователи, выпускаемые в Запорожье, и быстродействующая защита, разработанная и изготовленная в ИЯФ. Выпрямитель обеспечивает 8 кВ постоянного напряжения и до 2 МВт мощности. Быстродействующая защита обеспечивает отключение напряжения с анодов ламп генераторов при превышении тока лампы выше максимально допустимого за ~ 50 мксек. Это предотвращает возможное разрушение экранных сеток ламп при электрическом пробое в лампе. Если не отключать так быстро напряжение, то даже энергии, накопленной в фильтре выпрямителя, будет достаточно, чтобы разрушить сетки ламп, т.е. вывести лампу из строя.

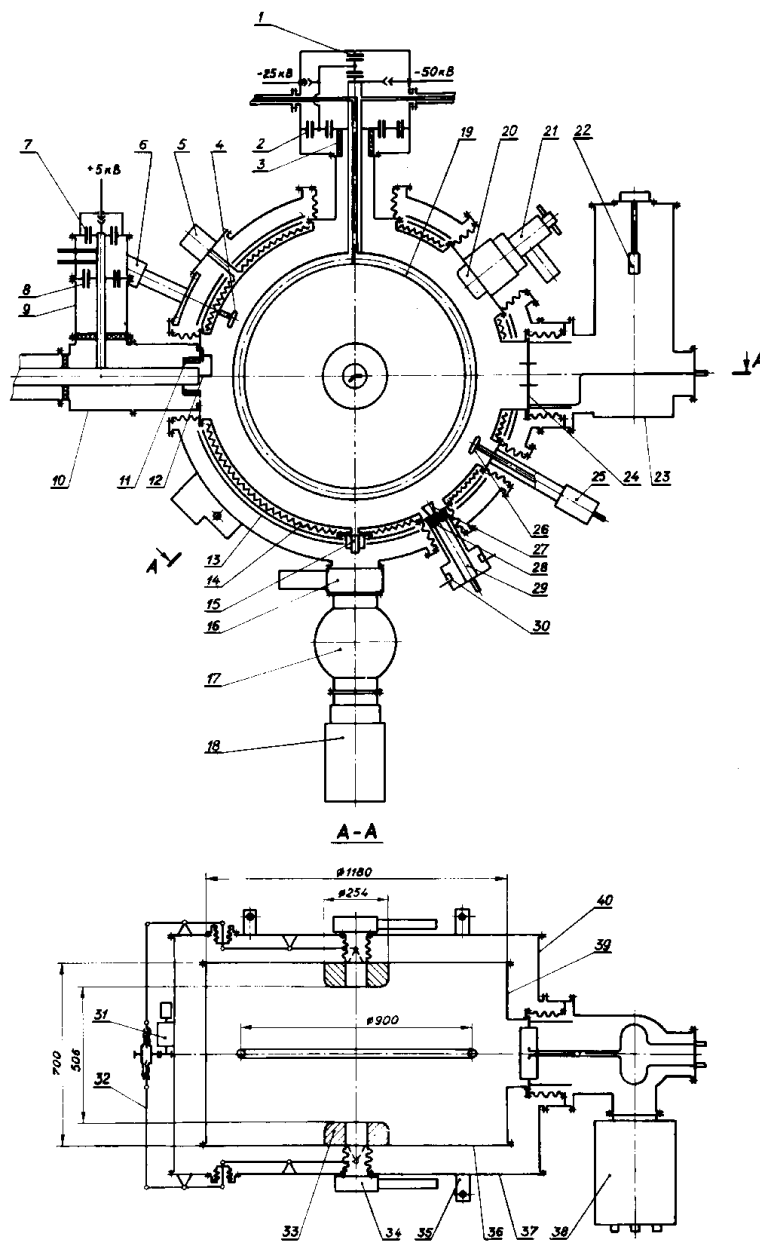


Рис. 2: Схематический чертеж двухкамерного резонатора 181 МГц. 1, 2, 7, 8 – блокировочные конденсаторы; 3, 11, 28 – керамические изоляторы; 4, 20, 26 – элементы подстройки высших мод; 6, 21, 25 – приводы подстройки; 5 – вывод нагревателей и термпар; 9 – четвертьволновый стакан; 10 – узел ввода мощности; 12 – петля связи; 13 – тепловые экраны; 14 – нагреватели; 15 – перепускной клапан; 16, 34 – вакуумные шиберы; 17 – азотная ловушка; 18, 38 – магниторазрядные насосы; 19 – противоразрядное кольцо; 22 – испаритель титана; 23 – сорбционный насос; 24 – электромагнитный экран; 27 – измерительная петля; 29 – отрезок коаксиальной линии; 30 – датчики напряжения; 31 – привод подстройки основной частоты; 32 – механизм подстройки; 33, 36, 39 – корпус резонатора; 37, 40 – вакуумный кожух; 35 – геодезические знаки.

В ВЧ-системах накопителя ВЭПП-4 и накопителя “Сибирь-2” было решено использовать ускоряющие резонаторы на частоту 180 МГц, которые были изготовлены для накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4 в семидесятые годы. Всего в ИЯФ было изготовлено 8 таких резонаторов. Резонаторы двухкамерные (рис.2). Внутренняя камера — это медный резонатор, в котором поддерживается вакуум 10^{-8} – 10^{-9} Торр. Медный резонатор помещен в контейнер из нержавеющей стали. В контейнере поддерживается вакуум 10^{-6} Торр. Атмосферное давление воспринимается этим контейнером. Вес резонатора ~ 5 т. Шунтовое сопротивление резонатора 6,4 МОм. Максимальное ускоряющее напряжение на резонаторе, полученное при испытаниях, 1,85 МВ. Рабочее напряжение $\sim 1,4$ МВ. Шесть таких резонаторов было решено поставить на ВЭПП-4, два резонатора — на “Сибирь-2”.

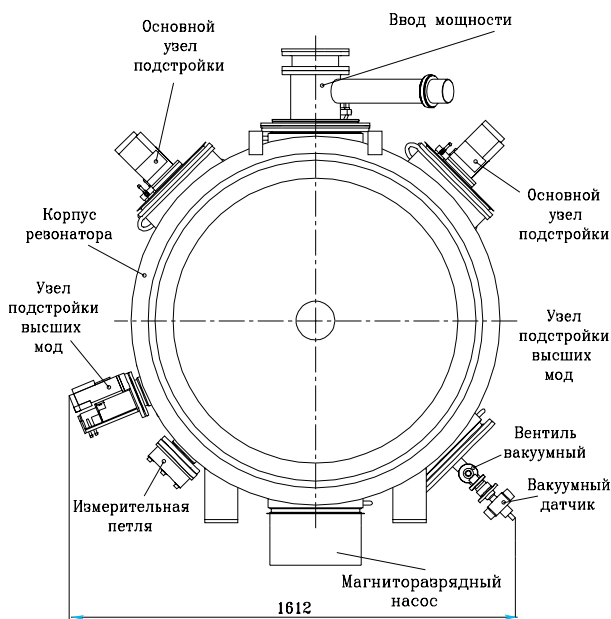


Рис. 3: Схематический чертеж биметаллического резонатора.

В конце 80-х годов, когда рассматривались проекты этих ВЧ-систем, появилась возможность использовать технологии завода “Комсомолец” (г. Тамбов) при создании ВЧ-резонаторов. Совместно с технологами этого завода и сотрудниками ИЯФ была разработана конструкция биметаллического резонатора (рис.3), который должен был использоваться в ВЧ-системах микротрона-рекуператора и накопителя ТНК. На этом заводе в 1990–1991 гг. было произведено 24 биметаллических корпуса резонаторов. Изготовление узлов резонатора (ввода мощности, двух узлов перестройки основной частоты резонатора, двух узлов перестройки высших мод, петли контроля напряжения на резонаторе, вакуумного оборудования) и сборка резонаторов проводятся в кооперации нескольких организаций, включая ИЯФ. Окончательная сборка и испытания резонаторов производится в ИЯФ.

Теперь рассмотрим, в каком состоянии находятся эти проекты. На ВЧ-системе накопителя ВЭПП-4 (рис.4) установлено 5 ускоряющих резонаторов из шести. Шестой резонатор требует реставрации. Остальные элементы ВЧ-системы установлены. Выпрямители с быстродействующей защитой, предвыходные каскады и одна половина выходного каскада — четырехламповый усилитель мощности (лампы ГУ-101А) работают на 5 ускоряющих резонаторах, обеспечивая проведение экспериментов на накопителе ВЭПП-4. Выходная мощность ВЧ-генератора в этой конфигурации 500 кВт. Закончен монтаж второго мощного усилителя на 500 кВт. Когда возникнет необходимость, второй усилитель мощности будет подключен, и выходная мощность ВЧ-генератора ВЭПП-4 станет 1 МВт.

Все элементы ВЧ-системы накопителя “Сибирь-2” на частоту 181 МГц установлены. Система питания генераторов находится в рабочем состоянии. Половина ВЧ-системы, которая включает ускоряющий двухкамерный резонатор, ВЧ-генератор с выходным мощным каскадом на двух лампах ГУ-101А находится в рабочем состоянии и обеспечивает работу накопителя “Сибирь-2”. Накопленный ток в накопителе 150 мА. Максимальная энергия электронов при этом токе 1,8 ГэВ. Другую половину ВЧ-системы планируется привести в рабочее состояние в конце этого года.

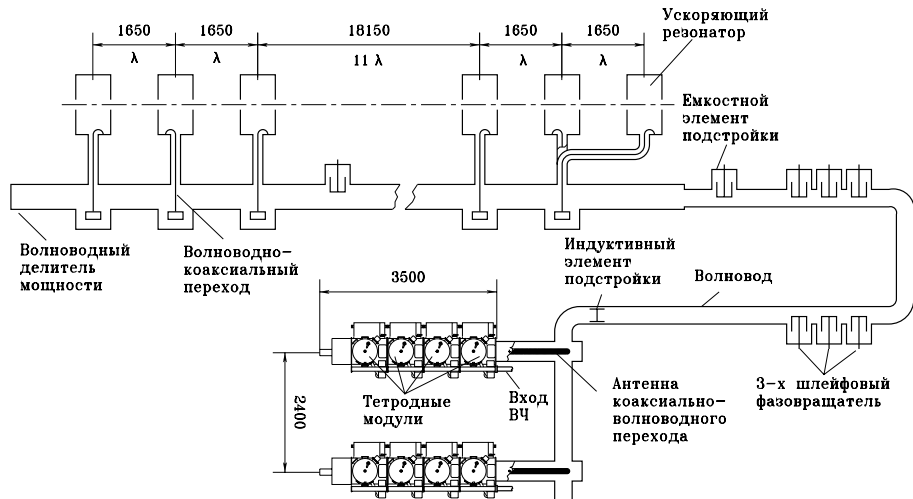


Рис. 4: ВЧ-система ускорителя со встречными пучками ВЭПП-4.

Кроме двух биметаллических резонаторов, все элементы ВЧ-системы накопителя ТНК изготовлены. Часть оборудования находится в ИЯФ, часть — в Зеленограде на ТНК. Пока никаких конкретных планов о вводе в действие ТНК нет.

Финансирование работ по созданию разрезного микротрона-рекуператора очень маленькое. Его едва хватает на строительные работы по подготовке помещений для размещения ускорителя. Только зарубежные контракты позволили сделать несколько шагов по созданию ВЧ-системы этого ускорителя. Так, контракт на поставку ускоряющего резонатора в университет Дьюк, штат Северная Каролина, США позволил провести испытания первого биметаллического резонатора в 1992 году.

Второй резонатор, предназначенный для поставки в США, потребовал некоторой переделки. Так как частота ВЧ-системы накопителя в Дьюк 178,5 МГц, то это потребовало изменения конструкции центральной части резонатора.

При испытаниях первого резонатора и резонатора университета Дьюк были достигнуты следующие результаты:

Максимальное ускоряющее напряжение	– 1.2 МВ
Вакуум в холодном резонаторе	– 10–11 Торр
Вакуум при номинальном напряжении 800 кВ	– $2 \cdot 10^{-9}$ Торр.

Резонатор успешно работает в Америке. Ток электронов в накопителе 150 мА.

В прошлом году ИЯФ заключил контракт с исследовательским центром KAERI, Южная Корея. По этому контракту ИЯФ изготовил инжектор для микротрона-рекуператора и два ускоряющих резонатора, которые могут быть использованы в микротроне-рекуператоре. Инжектор должен обеспечивать импульсы электронного тока длительностью 0,3 нсек, с частотой повторения от 1 кГц до 22,5 МГц и среднем токе при максимальной частоте повторения 22 мА. Энергия электронов 1.5 МэВ.

В состав инжектора входят три биметаллических резонатора и три генератора мощности. Один резонатор используется для клистронной группировки. Максимальное напряжение на этом резонаторе 150 кВ. Питается этот резонатор генератором с выходным каскадом на лампе ГУ-92А и с выходной мощностью 2 кВт. Два других резонатора — ускоряющие. Напряжение на этих резонаторах 650 кВ. Каждый резонатор питается от ВЧ-генератора с выходным каскадом на одной лампе ГУ-101А. Этот инжектор в начале этого года был собран в Корее, и на выходе был получен ток ~ 12 мА.

Такой же инжектор в 1998 году был собран в ИЯФ, и в настоящее время на нем ведутся работы по достижению проектных параметров. В конце года эти результаты должны быть продемонстрированы в Корее.

Подробные описания ВЧ-систем и основные полученные результаты приведены в литературе.

Список литературы

- [1] В.Г.Вещеревич, Э.И.Горникер, Н.Н.Иощенко, и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-3 на энергию 3 ГэВ. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — Москва, 1974. Наука, 1975.
- [2] 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.
- [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] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, В.А.Беломестных и др. Высокочастотная система накопительных колец комплекса "ТНК". Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990. Дубна, 1992.
- [5] 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.
- [6] V.Arбузов, S.Belomestnykh, A.Bushuev et al. RF System of the CW Race-track Microtron-Recuperator for FELs. PAC'93, Washington, USA.
- [7] R.F.Cavity for the Novosibirsk Race-track Microtron-Recuperator. N.Gavrilov, I.Kuptsov, G.Kurkin et al. Preprint of Budker INP # 94-92, Novosibirsk 1994.
- [8] Status of a 2-Mev CW RF injector for the Novosibirsk high power FEL. V.Anashin, V.Arбузов, Y.Avlasov et al. SR-98, Novosibirsk, 1998.
- [9] RF-System of Electron Injector for the Race-Track Microtron-Recuperator. V.Arбузов, N.Fomin, E.Gorniker et al. XVII International Conference on High Energy Accelerators. Sept. 7-12, 1998, Dubna, Russia.
- [10] В.С.Арбузов, А.А.Бушуев, Э.И.Горникер и др. Мощный УКВ генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей. Доклад на XVI совещании по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.