

Система ВЧ-питания четырехкамерного резонатора RFQ линейного ускорителя ММФ

А.Г. Васильев, А.И. Кваша, Ю.М. Лопатников, А.Н. Набока, В.Л. Серов,
Н.И. Уксусов, Т.Н. Хабибулин
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Введение

Для обеспечения требуемых уровней ВЧ-поля в четырехкамерном резонаторе RFQ его необходимо возбуждать четырьмя петлями возбуждения, расположенными в каждой камере. При этом фазы и амплитуды полей в каждой камере на резонансной частоте 198,2 МГц не должны различаться более чем на 5 град и 2 % соответственно. Очевидно, что для обеспечения этих параметров должны быть выполнены следующие условия:

- одинаковые входные импедансы по каждому из входов резонатора;
- синфазные и одинаковые по величине ВЧ-сигналы возбуждения резонатора, подводимые к каждому входу резонатора от системы ВЧ-питания.

Соответственно, на первом этапе работ осуществлялся подбор связи резонатора с фидерами возбуждения с тем, чтобы обеспечить условие равенства входных сопротивлений резонатора. Параллельно с этим прорабатывались различные варианты построения системы ВЧ-возбуждения резонатора, обеспечивающие синфазные и одинаковые по уровню мощности ВЧ-сигналы на выходе четырёх кабелей, нагруженных на согласованные нагрузки.

НАСТРОЙКА УЗЛОВ ВВОДА МОЩНОСТИ РЕЗОНАТОРА RFQ

ВЧ-поле в RFQ возбуждается 4 петлями ввода мощности, расположенными в одной плоскости, перпендикулярной оси резонатора, по одной петле в каждой камере резонатора симметрично относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей, проходящих через ось резонатора (рис. 1).

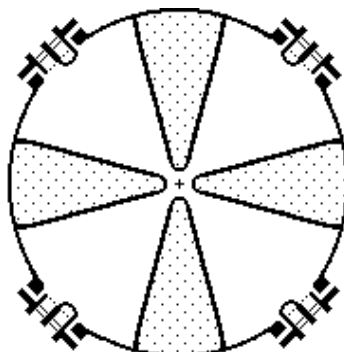


Рис.1. Сечение резонатора RFQ в плоскости петель возбуждения.

Так как распределение поля рабочего колебания представляет собой квадрупольную моду и магнитные поля в соседних камерах противофазные и одинаковые по амплитуде, то возбуждающие токи в петлях ввода мощности должны быть синфазные и одинаковые по амплитуде. Коэффициенты связи петель ввода регулируются подбором толщины медных вакуумных прокладок, определяющих глубину погружения петли связи в резонатор. Для измерений использовались прокладки толщиной 2,4,7 мм и их

комбинации. Во время измерений ко всем вводам мощности были присоединены коаксиальные переходы для подключения СВЧ-узлов с разъемами N-типа. КСВ этих переходов меньше 1,15.

Для измерений КСВ использовался прибор “Измеритель полных сопротивлений РЗ-34”. Для ввода мощности в RFQ по всем 4 вводам мощности был изготовлен специальный делитель мощности на 4.

В этом делителе все кабели одинаковые, с волновым сопротивлением 50 Ом. КСВ на входе делителя на рабочей частоте 198.2 МГц, при подключении согласованных нагрузок на выходах составил 1,07. Для уменьшения погрешности измерения КСВ последние проводились двумя независимыми способами:

- измерялась добротность резонатора без подключения нагрузок к переходам (Q_0) и с подключением согласованных нагрузок (Q_l). При этих измерениях использовались измерительные петли RFQ с проходным затуханием около 70 дБ. Величина КСВ₁ вычислялась по формуле $КСВ_1 = \frac{Q_0 - Q_l}{Q_l}$;

- измерялся непосредственно КСВ₂ на входе делителя мощности, подключенного через конусообразные переходы к узлам ввода ВЧ-мощности резонатора RFQ. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Толщина прокладки, мм	Частота резонатора, МГц	КСВ ₁	КСВ ₂
2	198.206	4.0	4.2
6	198.167	2.6	2.6
9	198.146	2.1	2.1
13	198.134	1.45	1.5

По результатам измерений было решено остановиться на медных прокладках толщиной 14 мм с КСВ около 1,4. Величина 1,4 выбралась с учетом следующих факторов:

- погрешность измерения КСВ с учетом всех СВЧ-узлов достигает 20% ;
- при ускорении тока заряженных частиц КСВ уменьшается;
- при КСВ = 1,4 и отсутствии тока заряженных частиц мощность отраженной волны составляет менее 4% от уровня мощности падающей волны.

После вакуумной откачки резонансная частота увеличилась на ~60 кГц и с учетом этого была подстроена резонансная частота RFQ с помощью штатных элементов настройки. Окончательная толщина прокладок оказалась равной 13,6 мм. В каждой камере резонатора были установлены идентичные измерительные петли с переходным ослаблением 50 дБ. При этом с измерительных петель на нагрузку 50 Ом при мощности 100 кВт в каждой камере резонатора поступает ВЧ-мощность около 1 Вт. Сигналы с этих петель были использованы для контроля мощности в RFQ во время ВЧ-тренировки. После достижения рабочего вакуума были проведены окончательные измерения: КСВ=1,5; F=198,204 МГц.

СИСТЕМА ВЧ-ПИТАНИЯ РЕЗОНАТОРА RFQ

Исходя из требований, предъявляемых к системе ВЧ-питания резонатора RFQ, оптимальным вариантом построения является вариант с четырьмя регулируемыми элементами вывода ВЧ-мощности из анодного контура выходного каскада и фазовращателями в трёх кабелях ВЧ-возбуждения резонатора. Такая схема позволила бы прецизионно выставить фазы и амплитуды ВЧ-сигналов возбуждения резонатора RFQ и, самое главное, поддерживать их, используя простейшие системы авторегулирования. Однако это решение требует существенных переделок конструкции выходного ВЧ-каскада или разработки нового. То же самое касается и фазорегуляторов на проходящую мощность не менее 100 кВт в импульсе, введение которых потребовало бы проведения специальной разработки конструкции и их изготовления, что в нынешних экономических условиях практически неосуществимо.

Поэтому было принято следующее решение:

- Использовать в качестве системы ВЧ-питания штатный канал усиления начальной части ускорителя ММФ. В его составе четырехкаскадный ВЧ усилитель на лампах ГС-14Б (первые два ВЧ-каскада К1, К2), ГИ-51А (каскад К3) и ГИ-54А (каскад К4) и два анодных модулятора: один для питания двух первых ВЧ-каскадов и экранной сетки лампы ГИ-51А и второй – для анодного питания выходных каскадов ВЧ-канала усиления. Такой канал усиления реально обеспечивает выходную ВЧ-мощность до 3 МВт в импульсе при скважности, равной 30 .
- На выходе фидера каскада К4 (300/130 мм) установить ВЧ-разветвитель, обеспечивающий согласование со стороны К4 при работе на четыре согласованные нагрузки.
- Транспортировку ВЧ-мощности в резонатор RFQ осуществлять с помощью гибких ВЧ-кабелей типа РК50-44-17, фазовые длины которых установить одинаковыми с точностью не хуже 5 град. Сплошная полиэтиленовая изоляция кабеля такого типа позволяет надежно пропускать через него импульсную ВЧ-мощность до 1 МВт, а его габариты – среднюю мощность до 3,5 кВт на частоте 200 МГц. При работе резонатора RFQ на частоте повторения ВЧ-импульсов 100 Гц, длительности 200 мкс и импульсной мощности 400 кВт по каждому кабелю будет поступать на вход резонатора средняя мощность около 2 кВт и за счет потерь в кабеле рассеиваться в нем около 0,3 кВт. Естественно, выделяемая в кабеле ВЧ-мощность будет приводить к его разогреву и изменению его параметров: затуханию и фазовой длине. Однако при идентичной длине кабелей, одинаковых условиях их прокладки от ВЧ-канала до резонатора RFQ и постоянстве входных сопротивлений резонатора RFQ существенных изменений в условиях возбуждения резонатора не ожидается. Кабели подсоединяются к резонатору с помощью специально разработанных угловых разъёмов.

ВЧ-разветвитель на выходе оконечного каскада К4 смонтирован из доработанных стандартных узлов металлического коаксиального фидера возбуждения резонаторов с трубками дрейфа начальной части ускорителя ММФ диаметром 300/130 мм. Разветвитель представляет собой четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением $W_t=25$ Ом, к торцевой стенке внутреннего цилиндра которого через 90 градусов прикреплены жилы коаксиальных кабелей РК50-44-17. Длина трансформатора скорректирована с учетом торцевой емкости и индуктивностей внутренних проводников четырех кабелей и равна 255 мм. Расстояние между торцевыми стенками трансформатора составляет ~ 120 мм. Такой трансформатор оказывается очень компактным и не требует изгиба кабелей. Для проверки работоспособности разветвителя была собрана схема с

двумя разветвителями, соединенными между собой четырьмя кабелями длиной ~ 25 м каждый. Второй разветвитель использовался в качестве коллектора и подключался к штатному ВЧ-эквиваленту нагрузки, согласованному с коаксиальным фидером 300/130 мм. Предварительно длины кабелей были измерены и выравнены с точностью не хуже 5 см. Для более точного выравнивания длин кабелей была измерена их емкость и откорректированы по результатам измерений длины кабелей; при этом разброс емкостей кабелей уменьшился с 2,5 до 0,3 пФ, что в пересчете на фазовую длину составляет $\sim 2^\circ$ по фазе.

При испытании работы разветвителей на эквивалент нагрузки при средней мощности в ВЧ-эквиваленте нагрузки, равной ~ 10 кВт был обнаружен неравномерный разогрев кабелей, что однозначно указывало на разброс фазовых длин кабелей. Для выравнивания фазовых длин кабелей без разборки разветвителя была использована следующая схема измерений (рис.2).

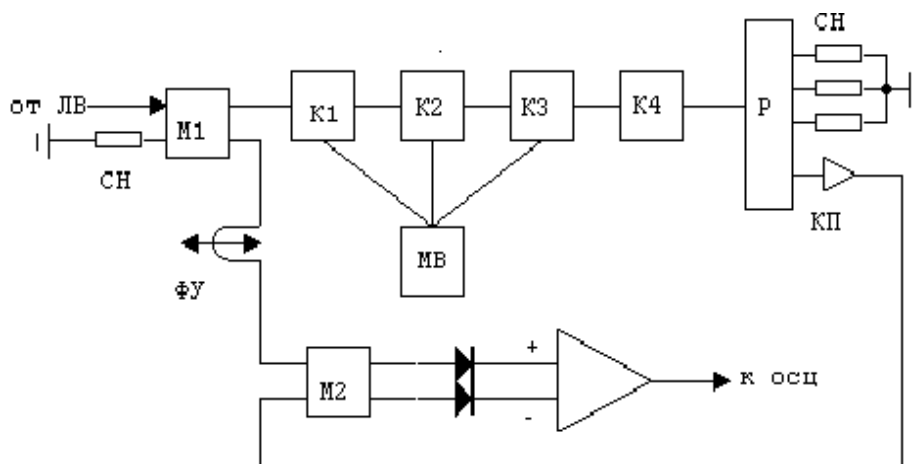


Рис.2.Схема измерения фазовых кабелей возбуждения RFQ
 М-трёхдецибельные мосты, Р-разветвитель, МВ-модулятор,
 ЛВ-линия возбуждения, ФУ-фазосдвигающее устройство,
 СН-согласованная нагрузка, КП-коаксиальный переход.

Здесь для получения низких уровней ВЧ-сигналов, обеспечивающих работу ФД (на выходе каждого кабеля ВЧ-мощность в импульсе не должна была превышать 0,5-1Вт) без разборки разветвителя подавалось анодное питание только на первые два каскада и экранную сетку лампы ГИ-51А третьего каскада. На лампу четвертого выходного каскада не подавалось ни анодное напряжение, ни накал. Это позволило провести фазировку кабелей, разделанных с обеих концов: с одной стороны подключенных к разветвителю, а с другой – оканчивающихся угловыми разъемами 110/48 мм для подключения к резонатору RFQ. Кабели по очереди подключались к фазовому детектору, с помощью фазосдвигающего устройства ФУ устанавливался нулевой сигнал на выходе схемы сложения и фиксировалась длина ФУ. Кабели, не подключенные к ФД, нагружались на согласованные нагрузки через специальные коаксиальные переходы. В процессе измерений выяснилось, что наибольшее отклонение фазовой длины кабеля ($\sim 40^\circ$ по фазе) соответствовало кабелю с максимальным разогревом при испытании на ВЧ-эквивалент нагрузки. После корректировки фазовых длин кабелей разброс между ними составил около 5 град.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше схема ВЧ-питания резонатора RFQ и методика настройки позволили успешно реализовать тренировку и ввод номинальной ВЧ-мощности в резонатор в течение 60 часов с постепенным увеличением уровня вводимой импульсной ВЧ-мощности до 280 кВт.

Для уменьшения времени тренировки резонатора, учитывая большую площадь внутренней поверхности и сложную конфигурацию, использовался щадящий режим. Плавный подъем вводимой ВЧ-мощности при длительностях ВЧ-импульса 50, 100, 220 мкс и частотах следования 10, 50, 100 Гц позволил в короткие сроки провести тренировку резонатора, контролируя огибающую ВЧ-импульса и вакуум при пробоях, не позволяя пробую перейти в режим горения. Это позволило качественно произвести полировку внутренней поверхности резонатора RFQ без образования разрядных раковин и сохранить ВЧ-прозрачность гермоокон.