

C 345g

M-345

Матюра Ц.М.

Б1-2737.

+

Б1-2737.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

И.М. Матора, Р.В. Карьюзов

51-2737

с. ф. 1396

ВОЛНОВОДНЫЙ СВЧ ТРАКТ МИКРОТРОНА НА 30 МЭВ
ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ОИЯИ

Рукопись поступила
в редакционный отдел
.. 7 .. 1956 г.

Дубна 1956 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

А н н о т а ц и я

Описан действующий волноводный тракт для передачи СВЧ колебаний большой мощности от генератора 10 см диапазона к резонатору микротрона на 30 Мэв. Схема тракта позволяет без перестройки генератора плавно регулировать мощность, вводимую в резонатор от 0 до 100%. Приведены данные об эффективной системе контроля параметров тракта и ускорителя и автоматическом устройстве для защиты резонатора.

В в е д е н и е

Созданный в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ тракт для передачи мощности СВЧ колебаний от генератора в резонатор микротрона / I / к настоящему времени проработал несколько тысяч часов.

Ряд существенных особенностей тракта обеспечил вполне надежную работу его при максимальных удобствах эксплуатации несмотря на то, что номинальное значение амплитуды напряжения между крышками резонатора равно 1,2 мегавольта. Схема тракта позволяет не только обеспечить передачу мощности, но и плавную регулировку амплитуды напряжения между крышками резонатора от 0 до 100% без перестройки генератора. Схема позволяет также получать всю необходимую информацию о качестве работы магнетрона, элементов волноводного тракта, резонатора и ускорителя в целом.

Необходимость в плавной регулировке мощности диктуется следующим. Нормальной работе микротрона с фиксированными значениями параметров всегда предшествует период тренировки резонатора и вакуумного участка тракта, при которой постепенно амплитуду напряжения повышают до номинал^{ьного значения}. Следует подчеркнуть, что наиболее трудный период тренировки имеет место при малых напряженностях СВЧ полей в системе, так как / I / основным явлением, препятствующим нормальному возбуждению резонатора, является резонансный СВЧ разряд. Поэтому и была разработана система регулировки мощности от нулевого его значения. Настройка резонатора при такой схеме выполняется

на минимальных вводимых в него мощностях, что также позволяет избегать излишне напряженных моментов работы тракта.

Та часть мощности генератора, которая не поступает на резонатор, по схеме ответвляется в хорошо согласованную с трактом водяную нагрузку. В то же время оператор направляет всю или значительную часть мощности на резонатор только во время его хорошего согласования с трактом. Таким образом, эта схема тракта обеспечивает наилучшую согласованность тракта с генератором в любом случае.

Принципиальная схема тракта.

На рис.1 изображена принципиальная схема волноводного тракта, в состав которого входят: волноводный патрон 2; ферритовые циркуляторы 10 и 24; оконечные водяные нагрузки 8, 20, 22 и 27; детекторные головки 3 и 21; термобатареи 18, 19 и 26; кварцевые заслонки 4, 9, 11, 13, 23 и 25; блок резонатора 15; волноводы 5, 7 и 12; резонатор 17.

Возможность гибкого маневрирования мощностью СВЧ обеспечивается двумя ферритовыми циркуляторами 10 и 24. Последовательное включение в схему двух циркуляторов приводит, естественно, к дополнительным потерям мощности порядка $0,5 - 1,0 \text{ дБ}$. Однако эти потери вполне оправдываются преимуществами схемы.

Схематически циркулятор изображен на рис.2 а, б, в. Устройство имеет четыре волноводных входа I, II, III, IV. Электромагнитные колебания, поступившие на вход I (рис.2а) направляются из циркулятора на вход II. Если по каким-либо причинам устройство, соединенное со входом II, согласовано плохо,

отраженная от этого устройства волна следует на вход III.

В случае, если вход III не имеет согласованной нагрузки, отраженная от него волна направляется на вход IV и лишь отразившись здесь может попасть на вход I, т.е. в генератор. Следовательно, при необходимости защитить генератор, включенный на вход I, от отражений, обусловленных недостаточным согласованием нагрузки на входе II, достаточно входы III и IV снабдить хорошо согласованными нагрузками. При этом нагрузка на входе IV будет служить резервной на случай выхода из строя нагрузки на входе III. Этот вариант использования циркулятора в качестве вентиля известен (см. например, / 2 /).

В нашем случае циркулятор IO рис. I, расположенный ближе к резонатору, играет роль вентиля (осуществляет развязку), т.е. направляет мощность, отраженную от резонатора при его неточной настройке, в водяную нагрузку 20. Нагрузка 8 является аварийной и автоматически включается в момент выхода из строя нагрузки 20.

Следует заметить, что изменение направления магнитного поля, приложенного к ферритовым элементам циркулятора, на обратное приводит к изменению направления прямой и отраженных волн. На рис. 2в стрелками указаны направления распространения для этого случая. При отсутствии магнитного поля, мощность отдаваемая генератором на вход I, распределится между входами II и IV (рис. 3б) в соответствии со степенью согласованности устройств, нагружающих эти входы. В частности, при полном согласовании нагрузок на этих входах мощность, рассеиваемая

в них, будет приблизительно одинаковой. Изложенное выше свойство циркулятора позволяет использовать его в качестве делителя мощности с плавным изменением коэффициента деления, если намагничивание ферритов осуществляется электромагнитом с плавно регулируемым в пределах $\pm 100\%$ током возбуждения. Приблизительная зависимость относительной мощности в нагрузке 27 и резонатора 17 от величины и направления тока возбуждения электромагнита 6 представлена на рис.3. Электромагнит изготовлен из мягкой стали, поэтому заметных неудобств из-за явления гистерезиса при изменениях направления тока возбуждения не наблюдается.

Водяная нагрузка 27 играет роль балластной, т.е. в ней рассеивается мощность, являющаяся избыточной при настройке резонатора, тренировке ускорителя и работе в любом из возможных режимов. Нагрузка 22 является аварийной. Все водяные нагрузки тракта согласованы до КСВН 1,1.

Работа элементов волноводного тракта.

Перед включением магнетронного генератора I (рис.1) устанавливается ток через электромагнит 6 циркулятора 24. Его величина и направление выбираются так, чтобы вся мощность, отдаваемая генератором, направлялась в балластную водяную нагрузку 27. С помощью термобатарей 26 и детекторной головки оценивается и корректируется режим работы магнетрона. Затем соответствующим изменением тока через электромагнит 6 ответвляется небольшая часть мощности в сторону резонатора. Поскольку в общем случае резонатор оказывается расстроенным или настроенным не точно, отраженная от него мощность поступает в циркулятор 10 и направляется в водяную нагрузку 20. С помощью

детекторной головки 2I получается огибающая импульса отраженной мощности. Опыт наладки и продолжительной эксплуатации микротрона показал, что информация, заключенная в форме этого импульса обладает исключительной ценностью. На рис.4 приведены типовые осциллограммы огибающей импульса отраженной мощности. Рис.3а соответствует расстроенному резонатору; электромагнитные колебания полностью отражаются от резонатора, форма импульса подобна огибающей импульса магнетрона, наблюдаемой с помощью головки 3 рис.1. По мере настройки резонатора огибающая меняет форму рис.4б (пунктир) и принимает вид, представленный на рис.4б (сплошная линия). Такая осциллограмма соответствует настроенному резонатору без нагрузки пучком, если начальное значение КСВН его равно 3. Плавное изменение коэффициента отражения в пределах импульса можно объяснить процессом „раскачки“ резонатора и связать с добротностью его без нагрузки. Дальнейшее увеличение мощности, поступающей в резонатор, может привести к нарушению электрической прочности в полости резонатора и ухудшению вакуума. Эти явления, как правило, развиваются во второй половине импульса, что видно из осциллограммы рис.4в, но могут привести к полному нарушению согласования (рис. 4а), если своевременно не снижена мощность. При первом включении резонатора обычно требуется тренировка, которая состоит в плавном увеличении поступающей на резонатор мощности до момента возникновения на осциллограмме кратковременных расстроек резонатора электронными процессами, типа изображенных на осциллограмме рис.4в. После прекращения расстроек мощность повышают снова до их возникновения.

Достижение номинальной амплитуды напряжения между крышками резонатора проверяется по показаниям термобатареи I8 (рис. I), измеряющей выделяемое в стенках резонатора тепло, а также по ускорению электронов, которое возникает при нагреве катода.

С увеличением нагрузки электронным пучком от катода согласование в волноводном тракте улучшается, о чем можно судить по уменьшению уровня отраженной мощности (см. рис. 4г пунктирные линии) в средней части её огибающей. При определенном значении тока нагрузки, соответствующем заданному размеру окна связи, согласование становится оптимальным, КСВН близок к 1 (рис. 4г сплошная линия). Это достигается плавным увеличением тока с катода при одновременном плавном увеличении мощности, поступающей в резонатор. Существенной расстройки резонатора пучком электронов при этом не наблюдается по-видимому из-за ухудшения добротности резонатора. На рис. 4 д, е представлены осциллограммы огибающей импульса отраженной мощности в случае, если нагруженный пучком резонатор настроен не точно на частоту магнетрона. На рис. 4 ж можно видеть ухудшение согласования в средней части импульса за счет слишком большой величины нагружающего тока. Осциллограмма отраженного импульса меняет свою форму даже в том случае, если катод-инжектор сместился относительно центра отверстия в крышке резонатора и между крышкой и катодом возникают СВЧ разряды. Форма импульса для этого случая изображена на рис. 3з. Узкие, острые крайние выбросы на рис. 3 б, в, г, д, е, ж, з характеризуют расстройку за счет несоответствия частоты на переднем фронте и спаде импульса магнетрона.

Система защиты резонатора.

В процессе наладки и опытной эксплуатации выяснилось, что описанный выше волноводный тракт микротрона обладает достаточной надежностью и не нуждается в частых профилактических осмотрах. Наименее надежным элементом является резонатор. Продолжительность непрерывной работы резонатора в режиме ускорения составляет $100+120$ часов, после чего требуется чистка последнего с целью восстановления электрической прочности. Важно при этом заметить, что решающим фактором, который определяет срок службы резонатора, является правильная эксплуатация. Всякое нарушение электрической прочности в процессе работы, влекущее за собой полное рассогласование в волноводном тракте, (осциллограмма типа 4г принимает вид 4а) должно быть немедленно устранено путем кратковременного снижения мощности, направляемой в сторону резонатора, до полного восстановления рабочего вакуума. Если это требование систематически не выполнять, срок службы резонатора, как правило, значительно сокращается. В связи с этим была разработана и испытана система защиты резонатора, блок-схема которой представлена на рис.5. На селектор по длительности поступает огибающая импульса отраженной от резонатора мощности, соответствующая по форме рис.4г при нормальной работе ускорителя. Постоянная времени селектора составляет несколько микросекунд, поэтому на выходе его сигнал отсутствует. Частичное или полное нарушение электрической прочности резонатора приводит к увеличению длительности отраженного импульса до $1-2$ микросекунд (рис.4а,в), на выходе селектора появляется импульс, который запускает

одновибратор - удлинитель импульсов. Удлинитель работает на емкостный накопитель, зарядная цепь которого выбрана таким образом, что напряжение на конденсаторе достигает заданного уровня лишь в том случае, если нарушение электрической прочности произошло в нескольких периодах подряд. Этим напряжением открывается мощный транзистор, в коллекторную цепь которого включено реле, переключающее направление тока через обмотку электромагнита регулятора мощности. Поскольку нормальному режиму работы ускорителя соответствует использование большей части мощности, отдаваемой магнетроном, переключение направления тока на обратное приводит в соответствии с рис. 3 к обратному: большая часть мощности будет поступать в балластную нагрузку и меньшая в резонатор. Разрядная цепь накопителя обеспечивает выдержку около 3 секунд, после чего ток через реле прекращается, направление и величина тока через обмотку электромагнита изменяется на первоначальное и режим ускорения автоматически восстанавливается. Экспериментально установлено, что выдержка около 3 секунд достаточна для полного восстановления рабочих условий в полости и окне связи резонатора. Повторное многократное срабатывание защиты является сигналом для вмешательства дежурного оператора в работу ускорителя.

Некоторые практические выводы.

Более чем годовая непрерывная эксплуатация тракта выявила наряду с его отличной надежностью и удобством ряд особенностей работы отдельных узлов, которые могут быть использованы при разработке аналогичных устройств.

Прежде всего, мы можем теперь на основании большого фактического материала сравнить электрическую прочность медных волноводов с различным наполнением, проводящих одну и ту же мощность. На схеме (рис. I) видно, что мощность от генератора СВЧ, которая при длине волны 10 см составляла несколько мегаватт, проходит сначала участок волновода, заполненного сжатым воздухом (4,5 - 5 атм), затем - циркуляторы и отрезки волноводов, заполненные шестифтористой серой в смеси с воздухом (к воздуху, наполняющему волновод, добавляли из баллона SF_6 до 2-2,6 атм), а перед входом в резонатор - короткий хорошо откачиваемый (давление $1,5 \cdot 10^{-6}$ мм Hg) отрезок волновода. Сечение всех волноводов - 72 x 34 мм. Бросается в глаза существенно более высокая прочность газонаполненных участков тракта, в которых не было ни одного даже незначительного случая эрозии внутренних поверхностей волноводов и стыков.

Вакуумный же отрезок обеспечивал надежную работу только после безукоризненной подгонки стыков на соосность и обеспечения их надежного электрического контакта с помощью посеребренных медных прокладок. Самым слабым местом тракта оказался дроссельный фланец с вакуумной стороны, примыкающий к кварцевой заслонке I3 (рис. I). Здесь неоднократно наблюдался подгар медной поверхности фланца волновода и эрозия кварца с вакуумной стороны, причем со стороны SF_6 стекло всегда оставалось совершенно чистым и гладким. Как правило, тщательная сборка тракта позволяла от этого явления избавиться. Однако за время эксплуатации нам пришлось заменить одну кварцевую заслонку, ставшую непригодной.

Выявилась также нежелательность частых разборок тракта, так как сразу после переборки он требует заметного времени тренировки. По осциллограмме импульса отраженной мощности опытный оператор легко может отличить, происходят ли нежелательные разряды в полости резонатора или между катодом и катодной крышкой или подгорает один из фланцев участка тракта между резонатором и заслонкой (рис. I). Поэтому профилактических переборок тракта лучше не делать, а осуществлять их только тогда, когда начинают наблюдаться его неисправности.

В заключение авторы приносят благодарность О. П. Коровину за полезные дискуссии, П. С. Анцунову и Л. А. Меркулову, оказавшим существенную помощь в наладке и исследовании тракта, а также Н. М. Уткину и Б. Ф. Дыбину за его механическое оформление.

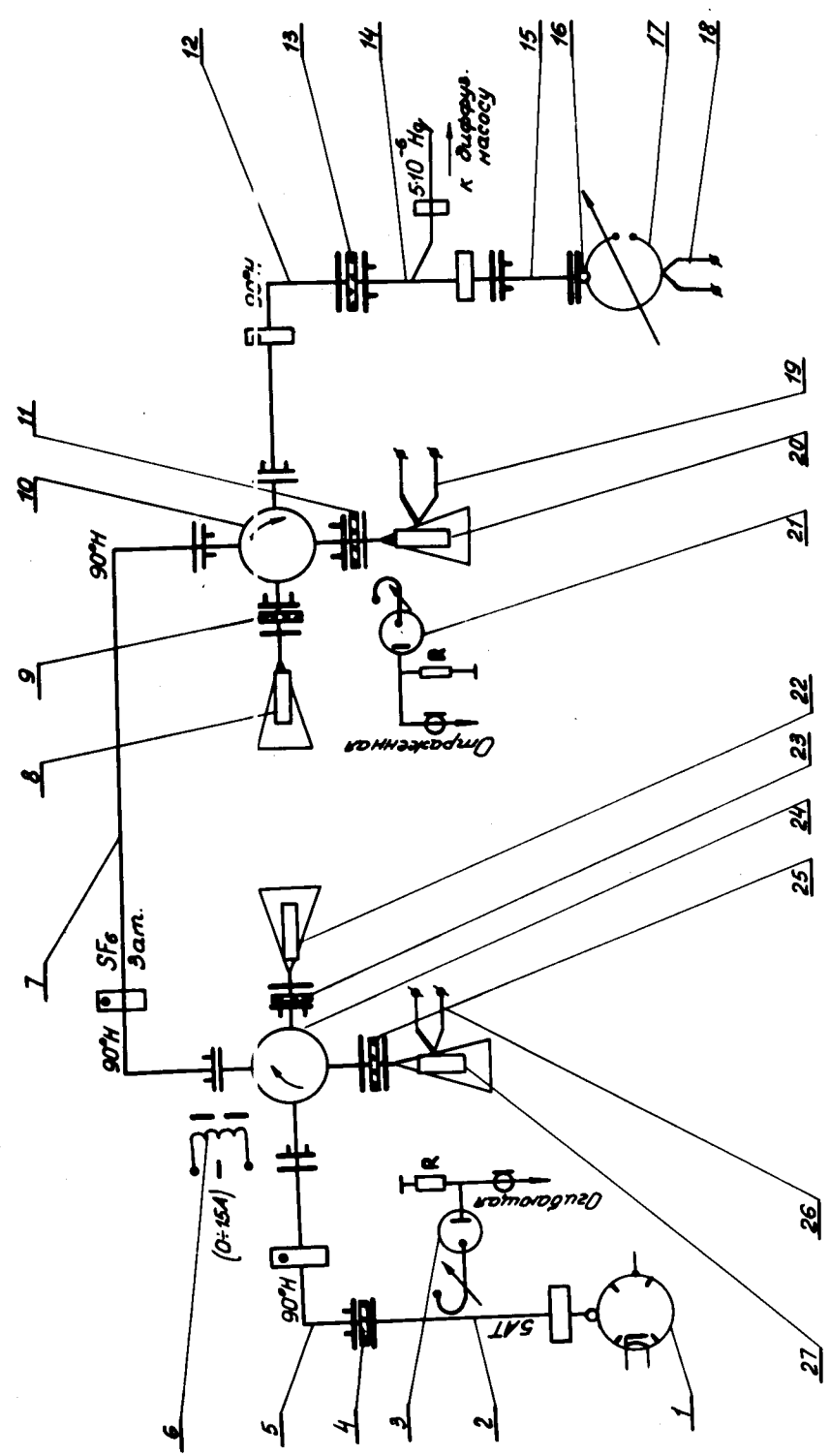
Фосади -
М. М. М.

Подписи к рисункам.

- Рис. 1 Принципиальная схема волноводного тракта микротрона ЛФ ОЛН на 30 Мэв.
- Рис. 2 Схема ферритового циркулятора для различных режимов работы.
- Рис. 3 Зависимость распределения мощностей между резонатором и балластной нагрузкой от тока возбуждения электромагнита в циркуляторе - делителе.
- Рис. 4 Типы осциллограмм отгибающей импульса отраженной мощности для различных режимов работы ускорителя.
- Рис. 5 Блок-схема автоматической защиты резонатора. 1 - селектор по длительности; 2 - удлинитель импульсов; 3 - накопитель; 4 - мощный транзистор; 5 - переключатель направления тока электромагнита циркулятора; 6 - звонок звуковой сигнализации.

Л и т е р а т у р а :

- 1 В.Д.Ананьев, П.С.Динцупов, С.П.Капица, И.М.Матора,
В.Н.Мелехин, Л.А.Меркулов, Р.В.Харьзов. Атомная энергия,
т.20, в.2, 106 (1966).
- 2 И.В.Лебедев. Техника и приборы сверхвысоких частот.
ГЭИ, М-Л, стр.360, 1961.



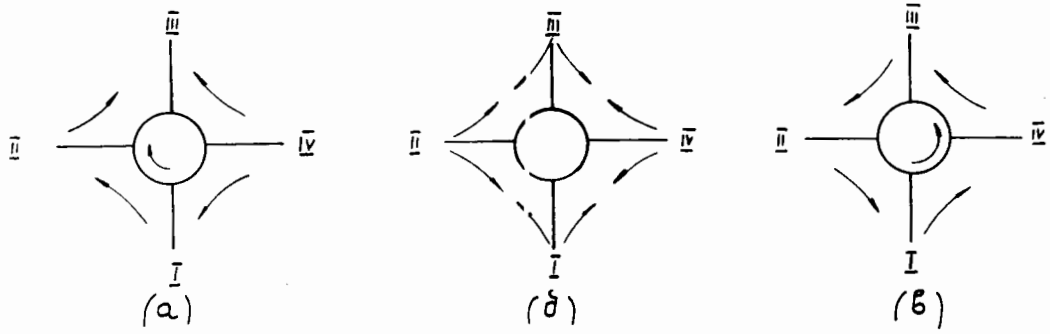


Рис. 2

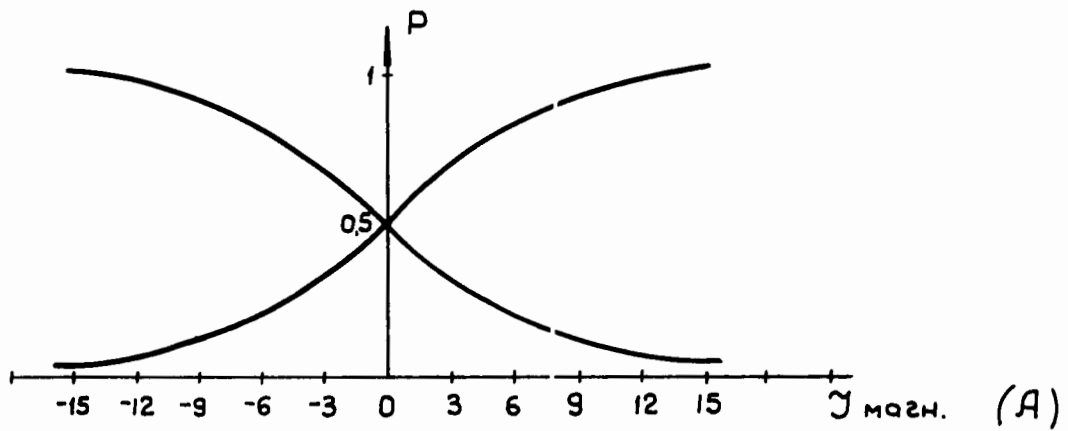


Рис. 3

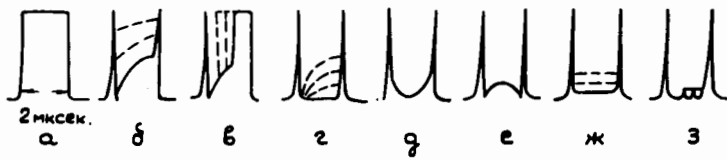


Рис. 4

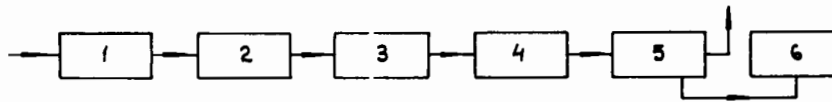


Рис. 5