

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ45e5  
П-58

12/1-76

9 - 9192

В.А.Попов

111/2-76

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ  
ВЧ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУ-20  
ЛВЭ ОИЯИ

**1975**

9 - 9192

В.А.Попов

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ  
ВЧ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУ-20  
ЛВЭ ОИЯИ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Запуск линейного ускорителя ЛУ-20 в ЛВЭ ОИЯИ позволил существенно увеличить интенсивность ускоренных частиц и повысить стабильность работы синхротрона. Работа на ускоритель требует от ВЧ аппаратуры большой надежности, особенно при ВЧ мощности в несколько МВт.

Линейные ускорители ионов на энергии 10-50 МэВ часто изготавливаются на базе одного цилиндрического резонатора с трубками дрейфа, в котором возбуждаются ВЧ колебания на частоте, соответствующей моде  $TM_{010}$ . Возбуждение такого резонатора довольно сложная техническая проблема. Во-первых, резонансные частоты нерабочих мод  $TM_{010}$  находятся довольно близко от основной частоты. Во-вторых, в процессе нарастания ВЧ колебания необходимо пройти область резонансного высокочастотного разряда /РВР/ между трубками дрейфа. В-третьих, ввиду высокой добротности резонатора время нарастания колебаний на рабочей частоте намного больше, чем на других частотах /например, на частотах фидерных колебаний/.

В связи с этим в настоящее время часто применяется система возбуждения, использующая обратную связь ВЧ генератора через резонатор. Система положительной обратной связи /ПОС/ ЛУ-20 состоит из одной петли, установленной на цилиндрической стенке резонатора, соединенной ВЧ кабелем с фазовращателем и входом усилителя мощности /рис. 1/.

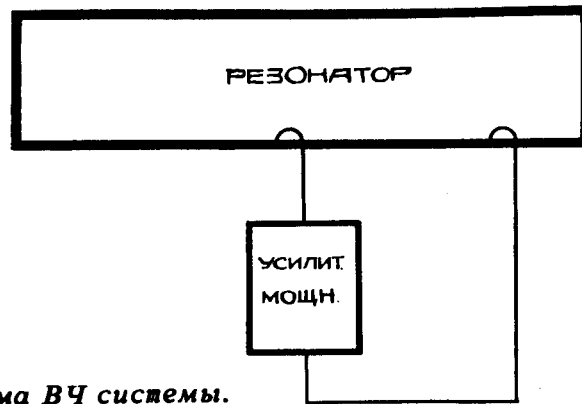


Рис. 1. Блок-схема ВЧ системы.

Для получения ускоряющих напряжений в резонатор требуется ввести ВЧ мощность в несколько  $MВт$  /2 ÷ 3  $MВт$  для ЛУ-20/. При прохождении пучка через ЛУ, а также при тренировке резонатора после вскрытия вакуумного объема наблюдаются пробой между дрейфовыми трубками /см. рис. 2/. Однако система ПОС при пробое в резонаторе продолжает обеспечивать возбуждение системы в нерабочих условиях. При этом в генераторе, фидере, петле связи и в самом резонаторе возникают сильные перенапряжения, которые могут вывести систему из строя. Выброс напряжений является источником пробоя. Но если этот выброс составляет доли микросекунд, то он не опасен. Если же система ПОС будет обеспечивать возбуждение и после начальных выбросов напряжений, то пробой может произойти достаточной силы.

Измерения на ЛУ-20 показали, что если закоротить первый зазор /или близкий к нему/ между дрейфовыми трубками резонатора, то ВЧ поле в нем искажается, а частота изменяется на 50-60  $кГц$  при  $f_p = 145 МГц$ . Если закоротить последний зазор, то получим обратную картину распределения ВЧ поля. Закорачивание зазоров проводилось медной проволокой /  $d = 1,2 мм$ /. При пробоях зазоров в резонаторе наблюдается подобная картина /рис. 3/.

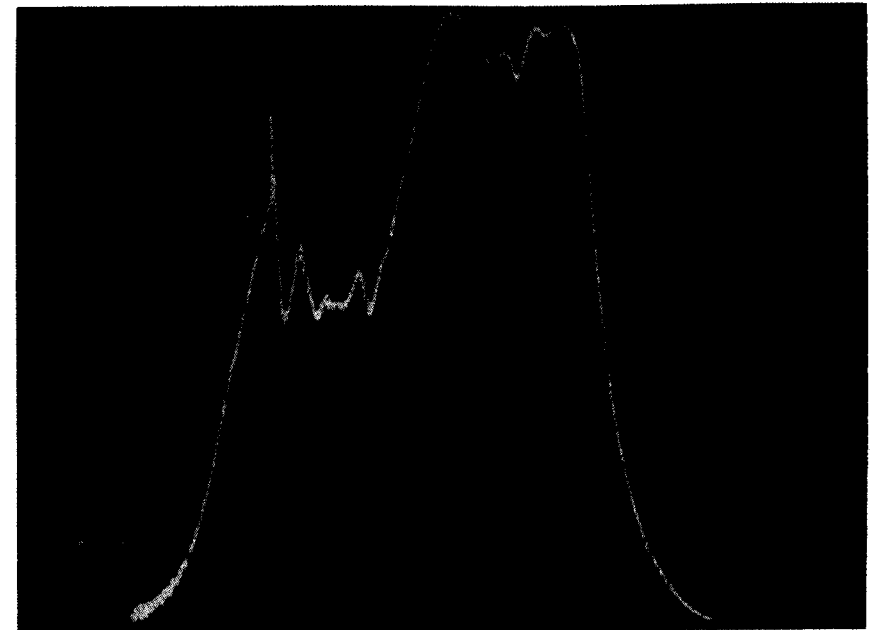


Рис. 2. ВЧ импульс в резонаторе во время пробоя зазора между дрейфовыми трубками.

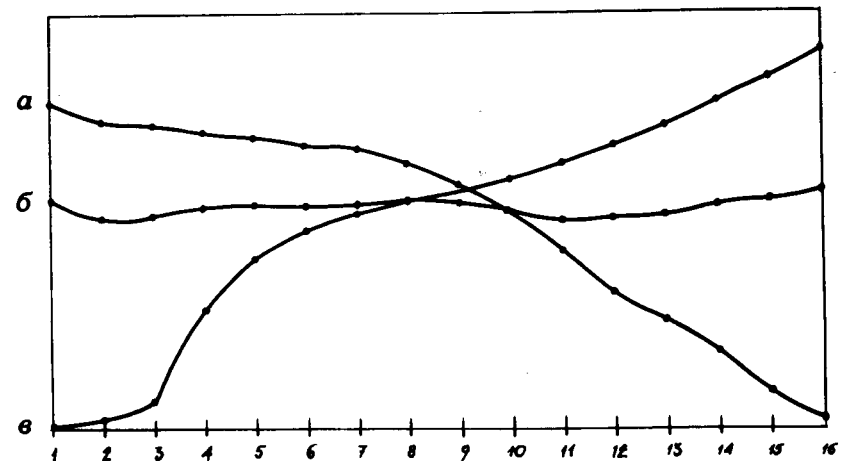


Рис. 3. Распределение ВЧ поля вдоль резонатора: а/ в рабочем режиме, б/ при закороченном первом зазоре, в/ при закороченном последнем зазоре.



Рис. 4. Напряжение падающей волны в фидере во время пробоя в резонаторе.

Однако если петля ПОС установлена на одном конце резонатора, а пробой произошел на противоположном, то система ПОС будет обеспечивать условия самовозбуждения, хотя частота резонатора и всей системы изменится. При этом выбросы напряжений приводят к значительным перегрузкам генератора, фидера, изоляторов, блокировочных конденсаторов, петли связи и других узлов системы.

Напряжение падающей волны измеряется направленными ответвителями, установленными в фидере. Пробои в резонаторе между трубками дрейфа вызывают выбросы напряжений в фидере до  $1,3 U_{\text{НОМ}}$ . Если в этот момент /т.е. в момент пробоя/ коэффициент бегущей волны /КБВ/ в фидере мал или близок к нулю, то в фидере устанавливается стоячая волна, где  $U_{\text{max}} = 2U_{\text{НОМ}}$ , а  $U_{\text{min}} \sim 0$ . Напряжение в пучности может достигать  $U_{\text{max}} \sim 2,6U_{\text{НОМ}}$ . Этот случай зафиксирован на осциллограмме рис. 4.

Для устранения этого явления была опробована система ПОС, включающая две петли обратной связи, расположенные в противоположных концах резонатора /рис. 5/. Сигналы с двух петель суммируются мостом сложения и подаются в цепь положительной обратной связи. ВЧ мощность складывается мостом сложения по формуле

$$P = P_1 + P_2 - \frac{|P_1 - P_2|}{2},$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - мощности сигнала с 1 и 2 петель,  $|P_1 - P_2|$  - абсолютное значение разности этих мощностей. Если сигналы с обеих петель равны, то получаем удвоение мощности, когда разность фаз сигналов равна нулю. Как только пропадает один из сигналов с любой петли из-за пробоя в резонаторе /или по какой-либо другой причине/, то на выходе моста сложения имеем половину мощности оставшегося сигнала, т.е. мощность сигнала на входе усилителя в четыре раза меньше, так как мост сложения работает в этом случае как мост деления. Вторая половина мощности оставшегося сигнала попадает на выход разности. Этот сигнал можно использовать также для

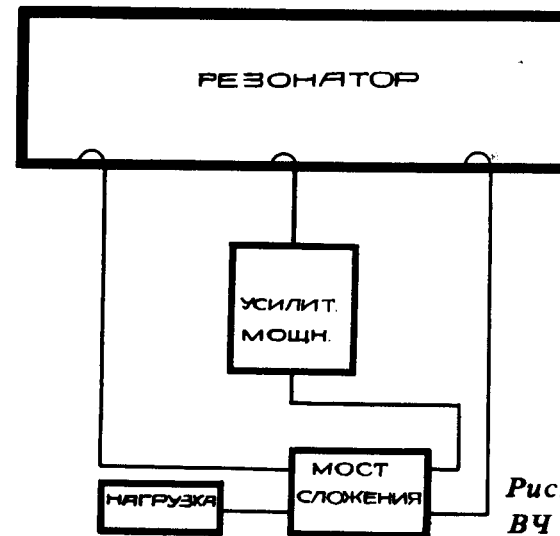


Рис. 5. Новая блок-схема ВЧ системы.

защиты, то есть для снятия анодного напряжения, запирая модулятор, а также для фиксации пробоев в резонаторе. Подобрать уровни ВЧ напряжений с петлей такими, чтобы возбуждение системы было невозможным от одной петли обратной связи, а сигналы, суммированные мостом сложения с двух петель, обеспечивали устойчивое генерирование основного колебания и надежную защиту ВЧ генератора и всей системы от пробоев.

В "длинных" резонаторах, т.е. в однорезонаторных ЛУ на большие энергии  $/20 \div 50 \text{ МэВ}/$ , система обратной связи с одной петлей через резонатор может возбуждаться на высших модах типа  $\text{TM}_{011}$  или подчеркивать эти колебания. Для подавления таких возбуждений петля ввода ВЧ мощности располагается в середине резонатора, где мода  $\text{TM}_{011}$  и все нечетные моды не имеют магнитной связи с петлей ввода. Чтобы исключить возможность возбуждения системы на моде  $\text{TM}_{012}$ , петля обратной связи размещается в  $1/4$  или  $3/4$  длины резонатора, где магнитное поле моды  $\text{TM}_{012}$  отсутствует около цилиндрической стенки резонатора.

Однако в резонаторах ЛУ его геометрическая середина может не совпадать с местом, где отсутствует магнитное поле моды  $\text{TM}_{011}$  и всех нечетных мод. Так, в первых двух резонаторах ЛУ И-100 ИФВЭ геометрическая середина на 120 и 40 см соответственно не совпадает с нулем магнитного поля моды  $\text{TM}_{011}$ . Чем "длиннее" резонатор ЛУ, т.е. чем на большую энергию рассчитан ускоритель, тем ближе находятся высшие моды к нулевой и трудности подавления этих колебаний возрастают  $/4/$ .

Новая система обратной связи, включающая две петли, расположенные в противоположных концах резонатора, и мост сложения, позволяет более надежно возбудить систему на моде  $\text{TM}_{010}$ . Рассмотрим картину полей высших мод типа  $\text{TM}_{01n}$  в резонаторе. Мода  $\text{TM}_{011}$  имеет нулевое магнитное поле в середине резонатора около цилиндрической стенки. Связь петли ввода мощности будет минимальной. Петля обратной связи будет иметь максимальную связь с магнитным полем этой моды. Если же применять систему из двух петель, сигналы с которых складываются мостом, то связь на этой моде

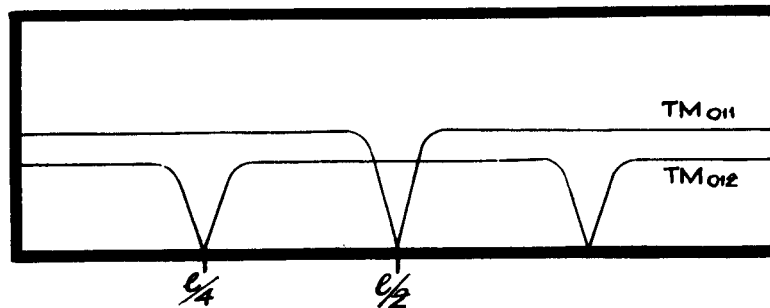


Рис. 6. Распределение магнитных полей колебаний  $\text{TM}_{011}$  и  $\text{TM}_{012}$  вдоль резонатора.

также минимальная из-за противофазности полей /см. рис. 6/.

Для моды  $\text{TM}_{012}$  сигналы с двух петель ПОС будут не только близки к нулю, но и противофазны, если разместить петли ближе к началу  $1/4$  и  $3/4$  длины. Для колебания  $\text{TM}_{013}$  сигналы противофазны и близки к нулю /см. рис. 7/. Для колебания  $\text{TM}_{014}$  сигналы близки к нулю и противофазны, если сдвинуть петли к  $1/8$  и  $5/8$  длины. Для мод  $\text{TM}_{015}$  и  $\text{TM}_{016}$  сигналы с петель, расположенных соответствующим образом, также можно получить противофазными и близкими к нулю и т.д. /см. рис. 8/. Для наиболее "опасной" моды  $\text{TM}_{01n}$  можно использовать разность длин кабелей с петлей так, чтобы получить раз-

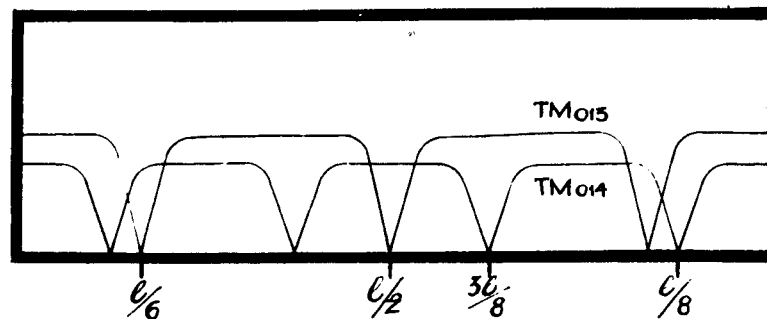


Рис. 7. Распределение магнитных полей колебаний  $\text{TM}_{013}$  и  $\text{TM}_{014}$  вдоль резонатора.

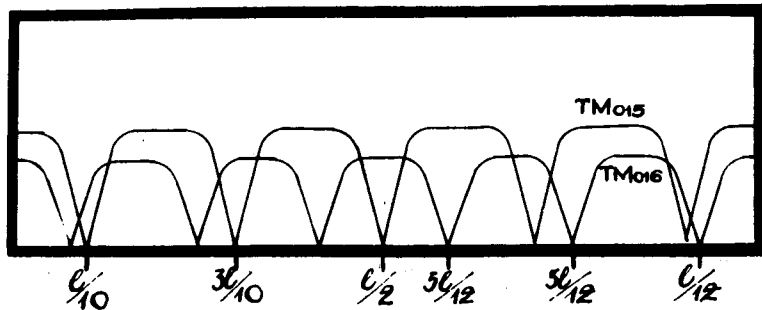


Рис. 8. Распределение магнитных полей колебаний  $TM_{015}$  и  $TM_{016}$ .

ность фаз сигналов для моды  $TM_{010}$  равной нулю, а для моды  $TM_{01n}$  -  $180^\circ$ . И наоборот, если потребуется возбудить резонатор на какой-либо моде типа  $TM_{01n}$ , то, используя обратную связь на двух петлях, можно получить устойчивое возбуждение этого колебания.

#### Заключение

1. Система положительной обратной связи с одной петлей через резонатор проработала на ускорителе ЛУ-20 более года. За это время было несколько случаев выхода из строя ВЧ системы из-за пробоев в резонаторе, особенно при его тренировке.

2. Использование двух петель в цепи ПОС должно обеспечить более надежную работу установки ЛУ-20.

3. Система ПОС с двумя петлями может успешно применяться для тренировки отдельных резонаторов ЛУ, состоящего из нескольких резонаторов, когда для преодоления резонансного высокочастотного разряда лучше использовать режим самовозбуждения, а защита генераторов при пробоях будет осуществляться системой ПОС с двумя петлями.

Автор благодарит И.Н.Семенюшкина, Л.П.Зиновьева, Ю.Д.Безногих, В.Л.Степанюка за обсуждения, полезные

советы и интерес к работе, а также сотрудников группы инжекции А.Г.Никандрова, В.А.Шурховецкого, А.А.Шевенина и Э.Д.Свердина за участие и помощь в работе.

#### Литература

1. Б.П.Муриш. Стабилизация и регулирование высокочастотных полей в линейных ускорителях ионов. Атомиздат, 1971.
2. Д.В.Каретников и др.. Линейные ускорители ионов. Госатомиздат, 1962.
3. В.И.Бобылев, Ю.Д.Иванов, А.В.Мищенко, Н.Х.Невляжский, Б.И.Поляков. Линейный ускоритель протонов У-2. IV. Система ВЧ питания. ПТЭ. №5 /1967/.
4. В.Г.Кульман, В.Б.Чистов. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, стр. 468-470.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 сентября 1975 года.