

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 3456  
П-58

13/2-75

9-9061

В.А. Попов

3970/2-75

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАТОРА  
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ

**1975**

9-9061

В.А. Попов

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАТОРА  
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В ЛВЭ ОИЯИ создан и введен в строй новый инжектор синхрофазотрона - линейный ускоритель на 20 МэВ - ЛУ-20, позволивший существенно поднять интенсивность ускоренных частиц. При возбуждении резонатора ЛУ-20 встретился ряд сложных технических проблем, способы решения которых могут представлять некоторый интерес для специалистов в области линейных ускорителей ионов.

Резонатор ЛУ-20 и его ВЧ-генератор размещены в различных помещениях, соединяет их фидер длиной 20 м. Ввод ВЧ-мощности в резонатор ЛУ-20 осуществляется петлей связи, расположенной в середине резонатора, длина которого 14 м. Для удобства настройки согласования петли ввода ВЧ-мощности с резонатором используется узел связи, аналогичный применяемому на ускорителях И-2 и И-100<sup>1</sup>. Диафрагма, изготовленная из эпоксидной смолы с кварцевым наполнителем и армированная стеклотканью, отделяет вакуумный объем резонатора от окружающей среды. Петля ввода ВЧ-мощности расположена вне вакуума.

Возбуждение однорезонаторного ЛУ можно проводить по схеме с положительной обратной связью через резонатор. В этом случае не требуется высокостабильного задающего генератора, не нужна также система точного термостатирования резонаторов и система подстройки частоты. Процесс ввода ВЧ-мощности в линейный ускоритель характерен тем, что во время нарастания ВЧ-поля в вакуумном объеме резонатора в ускоряющих промежутках между дрейфовыми трубками возникает резонансный высокочастотный разряд /РВР/ /мультипакторный разряд/, который препятствует нарастанию напряжения до номинального значения, шунтирует резонатор и расстраивает его. РВР развивается следующим образом. Свобод-

ный электрон, появившийся в зазоре, начинает ускоряться и к концу полупериода достигает стенки зазора. При коэффициенте вторичной эмиссии, большем единицы ( $\sigma > 1$ ), вторичные электроны, выбитые из стенки дрейфовой трубки ускоренным электроном, начинают двигаться в противоположном направлении и т.д. Развивается лавнообразный процесс РВР, который шунтирует зазор. Условия для развития РВР возникают тогда, когда время пролета электрона в каком-либо зазоре будет равно  $(n + \frac{1}{2})$  периодов ВЧ, где  $n$  - целое положительное число.

Если постепенно поднимать ВЧ-мощность, вводимую в резонатор от импульсного независимого генератора, то вначале в резонаторе возбуждается уровень ВЧ-поля, при котором РВР не развивается /рис. 1/. При дальнейшем плавном увеличении ВЧ-мощности генератора можно наблюдать, что уровень в резонаторе растет ступенями и имеется модуляция ВЧ-поля /рис. 2/. Это обусловлено как изменением во времени потока резонансных вторичных электронов, так и расстройкой резонатора по частоте.

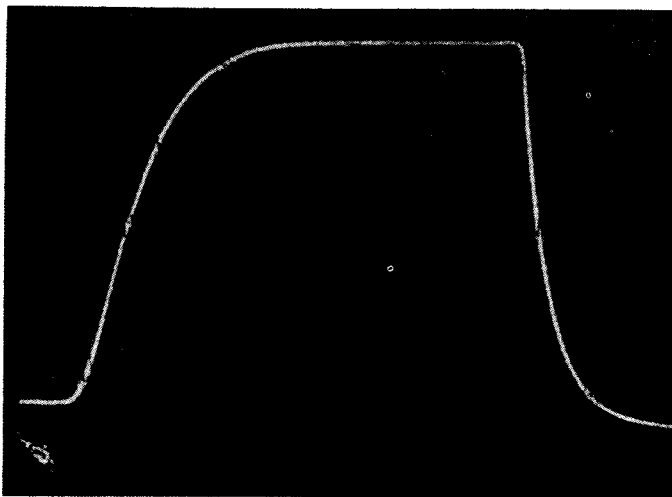


Рис. 1. Уровень ВЧ-поля в резонаторе до появления РВР.

Если скорость нарастания ВЧ-напряжения будет превышать скорость развития РВР, то ВЧ-напряжение в резонаторе возрастет до номинального. Однако при этом для надежного возбуждения резонатора требуется обеспечить скорость нарастания ВЧ-напряжения в несколько кВ или десятков кВ в мкс. Добротность резонаторов ЛУ

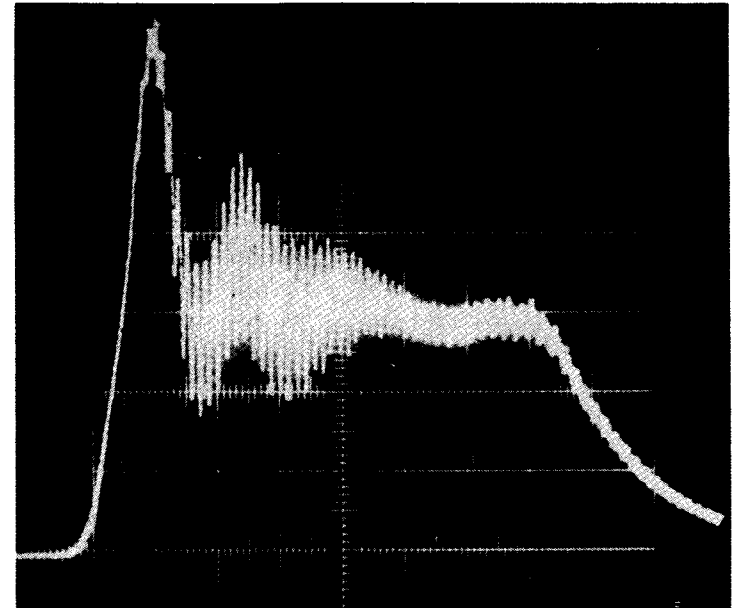


Рис. 2. Развитие РВР в резонаторе.

обычно равна  $40000 \div 70000$ , фронт установления импульса -  $\tau = 150 \div 300$  мкс, и обеспечить существенно более короткий фронт нарастания ВЧ-поля при больших добротностях резонатора затруднительно. Скорость развития и шунтирующее действие РВР зависят как от площади торцевых поверхностей дрейфовых трубок, так и от их формы. Кроме того, если между генератором и резонатором имеется длинный фидер в несколько десятков длин волн, то введение мощности и преодоление РВР затрудняется из-за рассогласования выходного сопротивления фидера при расстройке резонатора.

Условия преодоления РВР облегчаются, если использовать для возбуждения положительную обратную связь /ПОС/ через резонатор, т.к. система ПОС сама автоматически регулирует частоту колебаний при возникновении РВР, и ВЧ-мощность продолжает поступать в резонатор. Однако с увеличением длины фидера между генератором и резонатором увеличивается также и длина элементов ПОС. Диапазон регулирования частоты, обеспечивающий устойчивое генерирование системы при расстройках резонатора, сокращается, и трудности преодоления РВР возрастают. Практически сложно определить границы длины фидера и длины элементов ПОС, за пределами которых РВР не позволит возбудить резонатор.

На ЛУ-20 ЛВЭ были опробованы все известные методы возбуждения резонатора. Однако не удалось получить устойчивого номинального ВЧ-поля. Были проведены измерения частоты резонатора и распределения ВЧ-поля вдоль его длины, когда между дрейфовыми трубками закорочены отдельные зазоры, имитирующие возникновение РВР. Данные измерений приведены на рис. 3. Оказалось, что частота при закорачивании зазоров повышается на  $50 \div 60$  кГц.

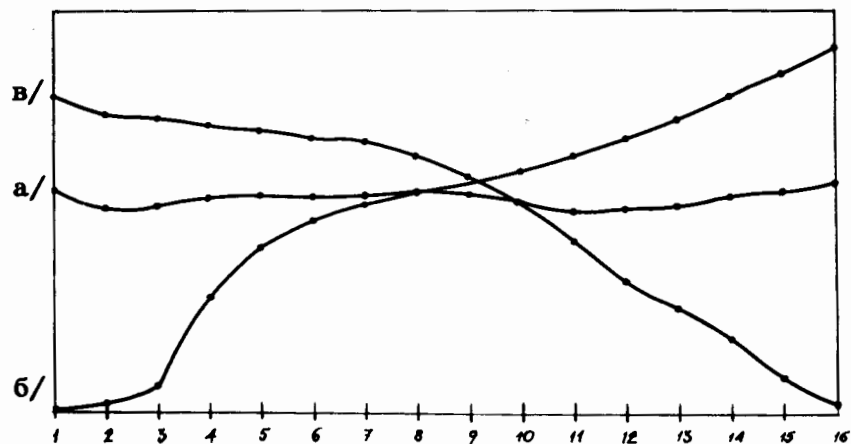


Рис. 3. Уровни ВЧ-поля в резонаторе на 16 петлях, расположенных вдоль цилиндрической стенки; а/ в рабочем режиме; б/ при закороченном первом зазоре; в/ при закороченном последнем зазоре.

Было решено попытаться возбудить резонатор по блок-схеме, приведенной на рис. 4. Кроме системы ПОС на вход генератора подключили дополнительный задающий генератор, частота которого выше резонансной на  $50 \div 100$  кГц. Предложенный способ возбуждения позволил получить устойчивое номинальное ВЧ-напряжение после тренировки резонатора.

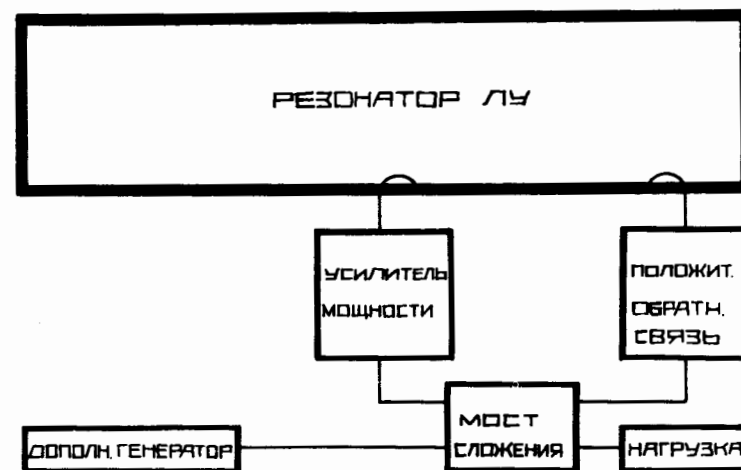


Рис. 4. Блок-схема возбуждения резонатора.

Амплитуда ВЧ-напряжения и частота дополнительного задающего генератора сильно влияют на фронт установления основного колебания, поэтому они тщательно подбираются. Действие дополнительного генератора можно объяснить следующим образом.

При развитии РВР в одном или нескольких зазорах между дрейфовыми трубками частота резонатора повышается, и он сам настраивается на частоту дополнительного задающего генератора. ВЧ-мощность в резонатор поступает от этого генератора, достигая уровня, ограниченного РВР. С этого уровня положительная обратная связь обеспечивает генерирование системы на основной частоте. Кроме этого, частота от дополнительного гене-

ратора с частотой основного колебания образует биения, которые создают модуляцию ВЧ-поля в резонаторе. Эта модуляция нарушает условия развития РВР. Если рассмотреть осциллограмму /рис. 5/, то увидим, что нарастание основного импульса начинается с максимальной крутизны, огибающей при биениях, т.е. когда скорость нарастания ВЧ-поля в резонаторе превышает скорость развития РВР. Процесс РВР и условия его преодоления представляется более сложным, чем это удается объяснить.

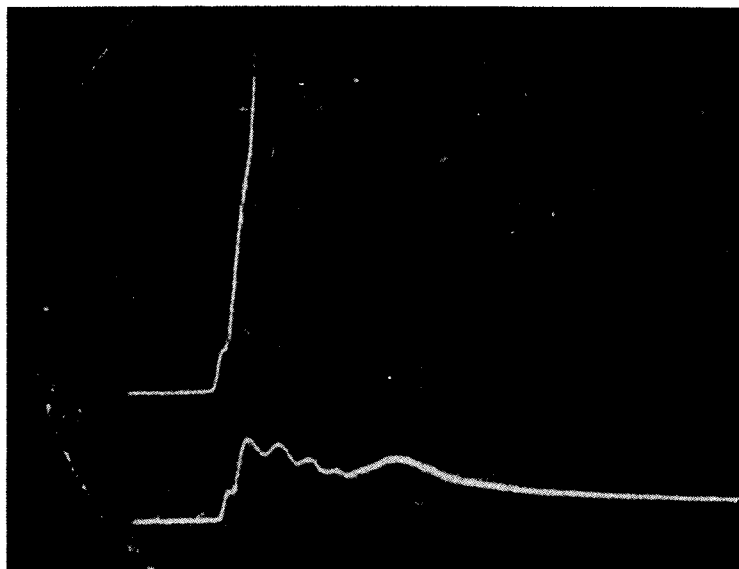


Рис. 5. Модуляция ВЧ-поля при возникновении РВР и преодолении РВР.

Существует диапазон частот, на  $\Delta f = 50 \div 300$  кГц выше резонансной, в котором резонатор возбуждается до уровня  $0,01 \div 0,005 U_{НОМ}$ . Такой большой диапазон частот для высокочастотного резонатора можно объяснить тем, что РВР расстраивает и шунтирует резонатор, снижая его добротность, а также тем, что существует множество резонансов РВР в зазорах между трубками дрейфа. Условия резонанса РВР изменяются от зазора к зазору. Может изменяться и кратность разряда.

Возбуждение системы на основной частоте обеспечивается ПОС только тогда, когда уровень с дополнительного задающего генератора достигает определенной величины. Продолжая увеличивать этот уровень, получим максимальную крутизну фронта, а затем и затягивание фронта нарастания основного колебания. Для резонатора ЛУ-20 максимальную крутизну получили при  $P_{доп.} = 0,001 \div 0,01 P_{ген.}$ , где  $P_{ген.} = 3$  мВт. Измерения проводились с помощью направленных ответвителей, установленных в фидере. Начало генерирования на основной частоте соответствовало в  $10 \div 30$  раз меньшему напряжению с дополнительного генератора, чем уровню, при котором получали наилучшую крутизну фронта импульса. От частоты дополнительного задающего генератора также зависит фронт импульса. Понижая и повышая частоту, заметим, что фронт нарастания также затягивается, затем колебание совсем срывается /см. рис. 6/. Без включения

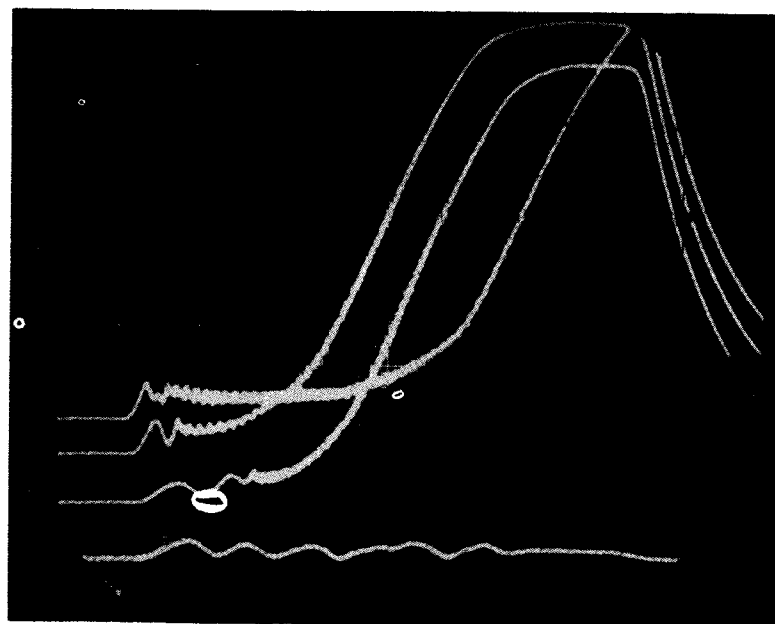


Рис. 6. Зависимость фронта импульса в резонаторе от амплитуды напряжения дополнительного генератора.

дополнительного задающего генератора система ПОС не обеспечивает возбуждения всей системы. Когда пройден уровень РВР, напряжение от дополнительного задающего генератора можно выключить. Это осуществляется дифференцирующей цепочкой в анодной цепи предусилителя.

Таким образом, для получения максимального фронта нарастания основного колебания необходимо подобрать определенную частоту от дополнительного задающего генератора и оптимальный уровень напряжения. Эти величины изменяются по мере тренировки резонатора.

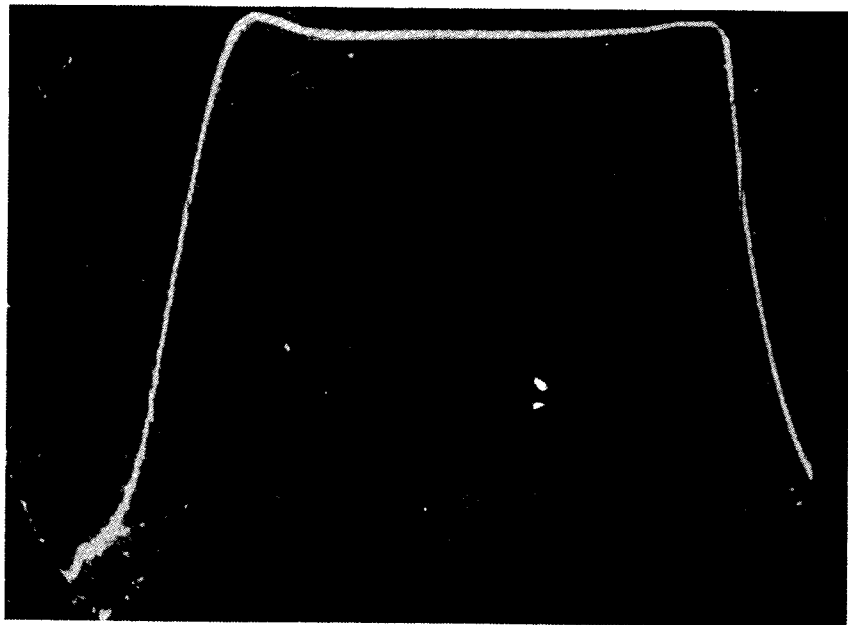


Рис. 7. Рабочий импульс ВЧ-поля в резонаторе,  $t = 100$  мкс/см.

#### Заключение

1. Для преодоления РВР в резонаторах линейных ускорителей ионов при определенных условиях можно применять способ возбуждения по описанной блок-схеме и с использованием дополнительного задающего генера-

тора, частота и уровень мощности которого влияют на оптимальный фронт установления импульса.

2. Частота дополнительного задающего генератора должна быть выше частоты резонатора на  $50 \pm 250$  кГц. В этом диапазоне резонатор настраивается на частоту задающего генератора, когда развивается РВР.

3. Реализованный метод возбуждения резонатора позволил осуществить запуск ускорителя ЛУ-20 без существенных переделок аппаратуры. Возбудить резонатор известными методами не удалось в течение года эксплуатации ускорителя.

4. Когда ЛУ уже работал, автор обнаружил описание изобретения В.Г.Андреева и Д.Г.Зайдина о способе подавления вторичноэлектронного резонансного разряда в вакуумной промежутке между двумя электродами. Однако описанный выше способ существенно отличается от способа Андреева и Зайдина.

Автор выражает глубокую благодарность И.Н.Семнюшкину, Л.П.Зиновьеву, Ю.Д.Безногих, В.Л.Степанюку за интерес к работе и помощь, а также гг. И.И.Голованю, В.А.Шурховецкому, А.Г.Никандрову, А.А.Шевенину, Э.Д.Свердлину, принимавшим участие в наладке ВЧ-установки, В.В.Екимову, А.А.Скорову и П.П.Степанову - за создание высокочастотного генератора.

#### Литература

1. В.А.Баталин и др. ПТЭ, №5, 1967. Линейный ускоритель протонов И-2 на энергию 25 МэВ.
2. Ю.Д.Иванов и др. О работе системы ВЧ-питания инжектора И-100. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц /Москва, 9-16 окт. 1968 г./ ВИНТИ, 1969 г.
3. Б.П.Мурин. Стабилизация и регулирование ВЧ-полей в ЛУ ионов.
4. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 263767. Инф. бюлл., №8, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 июля 1975 года.