

СЗУ58

П-58

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



172/2-79

15/1-79  
9 - 11835

В.А. Попов

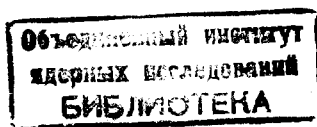
СИСТЕМА ВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЯ  
РЕЗОНАТОРА ЛУ-20 СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

**1978**

9 - 11835

В.А.Попов

СИСТЕМА ВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЯ  
РЕЗОНАТОРА ЛУ-20 СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ



Попов В.А.

9 - 11835

Система ВЧ-возбуждения резонатора ЛУ-20 синхрофазотрона ОИЯИ

На ЛУ-20 синхрофазотрона ОИЯИ проведены работы по повышению надежности эксплуатации и увеличению вводимой в резонатор ВЧ-мощности. Преодоление уровня резонансного высокочастотного разряда при ВЧ-возбуждении резонатора ЛУ-20 обеспечивается включением задающего генератора, частота которого выше частоты резонатора на  $\Delta f \sim 100$  кГц, или включением дополнительной системы положительной обратной связи на вход усилителя мощности. Для получения ВЧ-мощности порядка 4,5+5 мВт в резонаторе ЛУ-20 проведено сложение мощностей двух генераторов. Это обеспечило стабильную работу ВЧ-генератора инжекционного комплекса и позволило увеличить интенсивность пучка протонов на выходе ЛУ-20.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Popov V.A.

9 - 11835

The RF-Excitation System for JINR Synchrotron 20 MeV LINAC

The results of performances carried out at JINR synchrotron 20 MeV LINAC with the aim of increasing the operation reliability and RF power are presented. On the input of the power amplifier an additional generator with a higher frequency ( $\Delta f \sim 100$  kHz) or a positive feedback have been used to overcome multifactor effects. In order to achieve the 4.5-5 MWt RF level the power of two generators was added. As a result, a higher operating stability of the RF system and output beam intensity of the 20 MeV LINAC have been achieved.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Протонный линейный ускоритель ЛУ-20 является многоцелевым инжектором синхрофазотрона ОИЯИ, ускоряющим протоны до 20 МэВ и ядра легких элементов - до 5 МэВ/нукл. Он представляет собой однорезонаторный линейный ускоритель /типа Альвареса/, который запитывается от трехкаскадного генератора по схеме с положительной обратной связью /ПОС/ через резонатор.

Система ПОС охватывает три каскада усилителя мощности и обеспечивает в резонаторе номинальное ВЧ-напряжение /  $U_{НОМ}$  - ВЧ-напряжение, при котором синхронная фаза равна расчетной/. Основная трудность при возбуждении резонатора, находящегося в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Тор, состоит в том, что во время нарастания ВЧ-напряжения в ускоряющих зазорах возникает резонансный высокочастотный разряд /РВР/. РВР в ЛУ-20 /высоковакуумная откачка производится масляными насосами/ появляется на уровне  $0,001 U_{НОМ} \leq U_{РВР} \leq 0,1 U_{НОМ}$ . Возникновение РВР в этом интервале напряжений связано с появлением разрядов, в основном, в первых ускоряющих зазорах. При этом происходит искажение равномерного распределения ВЧ-поля нулевой моды  $TM_{010}$  вдоль резонатора, а частота резонатора изменяется. Распределение ВЧ-поля измерялось при помощи 16 петель связи, расположенных равномерно по образующей резонатора.

Для преодоления РВР на ЛУ-20 была применена схема с дополнительным задающим генератором /ЗГ/, частота которого выше на  $\Delta f \sim 100$  кГц частоты резонатора <sup>1-3/</sup>.

В этом случае ВЧ-возбуждение резонатора осуществляется от дополнительного ЗГ до уровня  $\sim 0,1 U_{\text{НОМ}}$ . с перекошенным полем. Когда уровень ВЧ-поля в резонаторе достигает значения  $U_{\text{РВР}} \approx 0,1 U_{\text{НОМ}}$ , система ПОС обеспечивает нарастание ВЧ-поля до  $U_{\text{НОМ}}$ . При этом в резонаторе наблюдается появление моды  $TM_{011}$ , частота которой выше основной частоты резонатора  $f_p = 145,0 \text{ МГц}$  на  $\Delta f \approx 250 \text{ кГц/см}$ . рис. 1/.

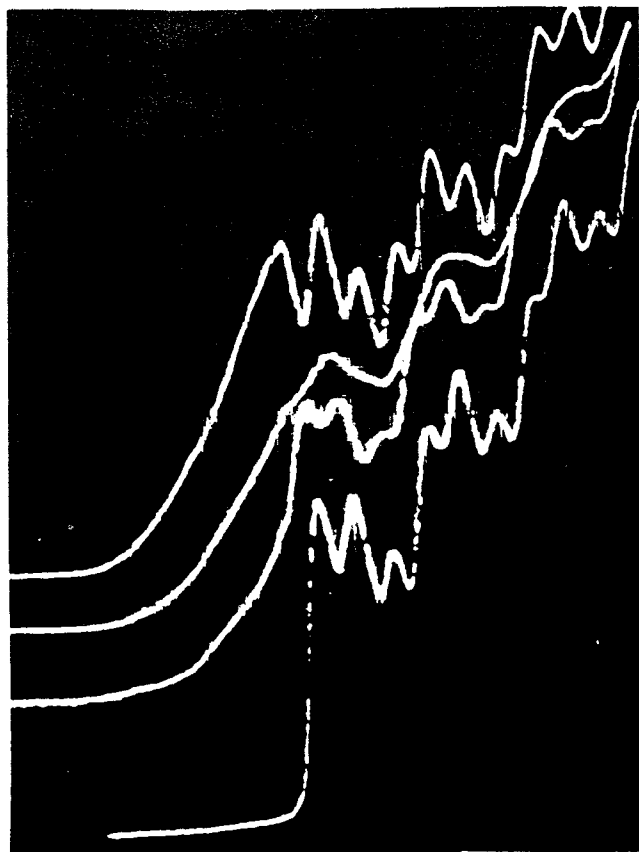


Рис. 1. Огибающие ВЧ-напряжений, снимаемых с петель №1,5,9,16 /снизу вверх/, на уровне  $U_{\text{РВР}} \approx 0,1 U_{\text{НОМ}}$  при работе с дополнительным задающим генератором.  $t_{\text{разв.}} = 10 \text{ мкс/см}$ .

При исследовании режимов возбуждения резонатора ЛУ-20 было замечено, что  $U_{\text{РВР}}$  можно преодолеть, если на вход усилителя мощности вместо ЗГ включить еще цепь дополнительной обратной связи /ДОС/. Блок-схема представлена на рис. 2, где ФИ - форинжектор; мост сложения - мост сложения мощностей; УП - усилитель предварительный; Н - нагрузка 75 Ом; ПОС - система положительной обратной связи; ДОС - система дополнительной обратной связи.

Система ДОС необходима для преодоления уровня  $U_{\text{РВР}}$ . Когда уровень  $U_{\text{РВР}}$  будет пройден, анодное напряжение с УП снимается и система ДОС перестает работать. Включение двух систем положительной обратной связи на вход усилителя мощности является наиболее предпочтительным. В этом случае основная система ПОС может состоять из нескольких /3÷4/ каскадов усиления, что повышает стабильность работы установки. Система ДОС должна включать в себя еще несколько /3÷6/ каскадов усиления для получения необходимой крутизны фронта нарастания ВЧ-поля в ускоряющих зазорах на уровне  $0,001 \div 0,1 U_{\text{НОМ}}$ .

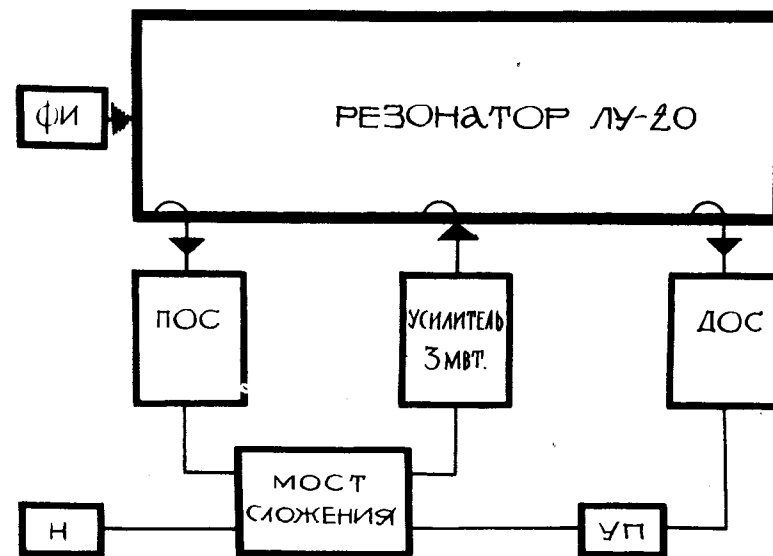


Рис. 2. Блок-схема включения двух систем положительной обратной связи на вход усилителя мощности.

На ЛУ-20 применен трехкаскадный УП, который обеспечивает 0,5 кВт ВЧ-мощности, если на его вход подать сигнал с петли резонатора, равный  $U_{ВХ} \approx 5 В$ . В этом случае система ДОС не обеспечивает преодоления РВР. Увеличение площади петли в резонаторе /входной сигнал ДОС/ до получения величины сигнала  $U_{ВХ} \approx 100 В$  /в установившемся режиме/ позволяет получить достаточную скорость нарастания ВЧ-напряжения в ускоряющих зазорах. В этом случае ВЧ-возбуждение резонатора происходит в области фаз ВЧ-напряжений  $\Delta\phi_1 \approx 180-200^\circ$ . Если же сигнал с петли в резонаторе уменьшить на 6 дБ, то преодоление РВР происходит уже в области фаз ВЧ-напряжений  $\Delta\phi_2 \sim 90^\circ$ . Уменьшение сигнала на входе УП на 10 дБ не позволяет возбудить резонатор.

Эти эксперименты показывают, что преодоление РВР происходит при определенной скорости нарастания ВЧ-поля в зазорах резонатора<sup>/4/</sup>. Наличие цепи обратной связи облегчает прохождение уровня РВР. При этом цепь обратной связи должна обеспечить фазу входного сигнала, необходимую для самовозбуждения системы при расстройке резонатора в момент развития РВР.

Были проведены некоторые исследования с одной цепью ДОС, охватывающей УП и усилитель мощности /основная цепь ПОС разрывалась/. Максимальный уровень ВЧ-напряжения в резонаторе и максимальная крутизна фронта нарастания ВЧ-импульса соответствовали фазам ВЧ-напряжений, отличающимся на  $\Delta\phi \sim 50^\circ$ . Поэтому включение одной системы ДОС для получения максимальной крутизны фронта импульса, а второй системы ПОС - для обеспечения максимальной амплитуды на одном усилителе мощности является наиболее целесообразным.

Кроме того, петля системы ДОС должна находиться в конце резонатора, иначе его возбудить не удастся. Это обусловлено тем, что искажение распределения ВЧ-поля в резонаторе в момент нарастания соответствует минимуму поля в его начале.

На рис. 3 изображены огибающие ВЧ-напряжений, снятые с петель №1,5,9,12,16 /снизу вверх/, показывающие распределение ВЧ-поля в резонаторе. Зафиксирован случай, соответствующий оптимальным условиям воз-

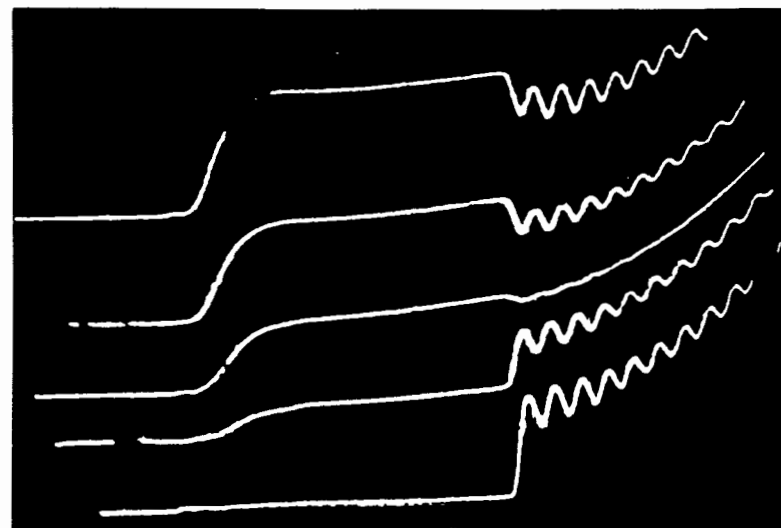


Рис. 3. Огибающие ВЧ-напряжений, снимаемых с петель №1,5,9,12,16 /снизу вверх/, при включении двух систем обратной связи /условия не оптимальные/.

буждения резонатора. Появление моды  $TM_{011}$  соответствует моменту нарастания ВЧ-поля с уровня  $U_{РВР} \sim 0,1 U_{НОМ} / U_{РВР} \sim 0,1 U_{НОМ}$  измеряется в конце резонатора/.

На ЛУ-20 цепь ПОС состоит из двух петель и моста сложения, а суммарный сигнал подается на вход усилителя мощности<sup>/5,6/</sup>. Включение двух петель и моста сложения в цепь ПОС обеспечивает защиту по высокой частоте при пробоях в резонаторе и позволяет более устойчиво возбудить резонатор на частоте основного колебания  $TM_{010}$ . Так, если пробой ВЧ-поля в резонаторе произойдет в одном конце резонатора, а в другом установлена одна петля ПОС, то ВЧ-система продолжает генерировать ВЧ-колебания. По цепи ПОС на вход усилителя мощности продолжает поступать ВЧ-сигнал, хотя частота резонатора во время пробоя изменяется. При двух петлях, расположенных в разных концах резонатора, и мосте сложения мощностей в цепи ПОС во время пробоя в любом конце резонатора на входе усилителя ВЧ-мощность уменьшается в четыре раза. Тем самым

обеспечивается защита по высокой частоте при пробоях в резонаторе. Быстродействие защиты определяется временем прохождения ВЧ-сигнала по цепям обратной связи, каскадам и фидеру между генератором и резонатором, для ЛУ-20 это время  $t \approx 0,4$  мкс.

Частоты мод  $TM_{01n}$  в "длинных" резонаторах  $/L_{рез} > 7 \div 10 \lambda /$  близко расположены к основному колебанию, могут находиться в полосе пропускания усилителя, определяются по формуле:

$$f_{01n} = f_{010} \sqrt{\frac{n^2}{4\gamma_g \cdot \left(\frac{L_p}{\lambda}\right)^2} + 1}$$

где  $n = 1, 2, 3$  - номер моды,  $\gamma_g$  - коэффициент,  $L_p$  - длина резонатора,  $f_{010}$  - частота моды  $TM_{010}$ . Система ПОС, состоящая из двух петель и моста сложения, позволяет путем выбора местоположения петель в резонаторе добиться отсутствия связи на частотах мод  $TM_{01n}$ .

Кроме защиты по ВЧ на ЛУ-20 применена защита по анодному напряжению при пробоях в резонаторе. Две петли установлены около торцевых стенок резонатора, равные сигналы с которых поступают на мост сложения. Фазы ВЧ-напряжений подбираются такими, чтобы на выходах моста была сумма и разность мощностей сигналов. При равенства сигналов с петель на выходе разности будем иметь  $U_{ВВК} \rightarrow 0$ . При пробое ВЧ-напряжения в резонаторе на обоих выходах моста появляются сигналы, причем мощность каждого равна половине мощности оставшегося.

Детектированный сигнал подается в цепь запирающего модулятора анодного напряжения. На рис. 4 представлена огибающая ВЧ-напряжения разности сигналов с моста при пробое в резонаторе. Напряжение разности сигналов с моста сложения позволяет наблюдать процессы, происходящие в резонаторе во время нарастания ВЧ-импульса, а также следить за изменением наклона ВЧ-поля в резонаторе.

При ускорении пучка ядер легких элементов необходимая потребляемая ВЧ-мощность резонатора состав-

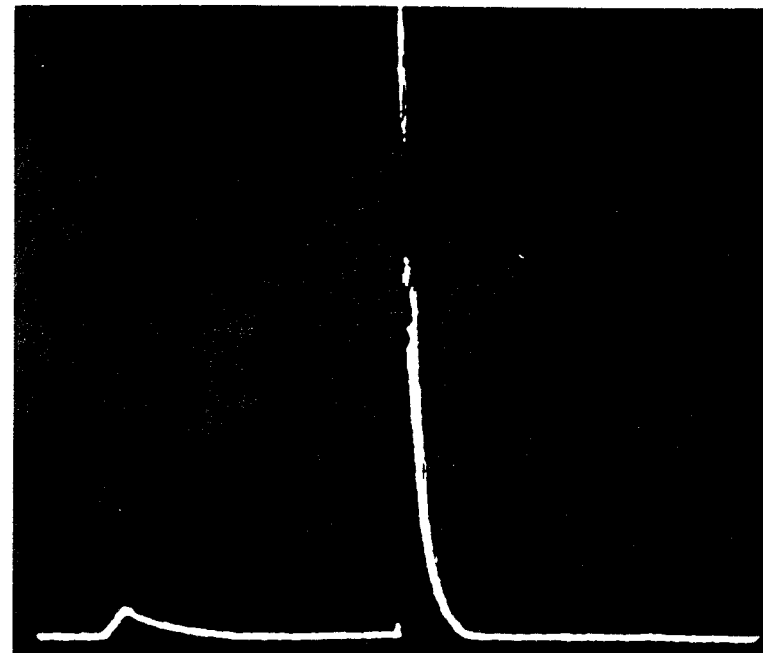


Рис. 4. Огибающая разности ВЧ-напряжений, снимаемых с моста сложения во время пробоя в резонаторе.  $t_{разв} = 10$  мкс;  $U_{разн} \sim 5$  В;  $U_{пробоя} \sim 50$  В.

ляет  $\approx 2,6$  МВт (добротность резонатора ЛУ-20 равна  $/35 \div 40/ \cdot 10^3$ ), при ускорении пучка протонов (при токе 50 мА) - 4,5-5,0 МВт. На ЛУ-20 работают два ВЧ-генератора, каждый по 3 МВт: один включен на резонатор, второй является резервным. Для ускорения протонов проведено сложение ВЧ-мощностей двух генераторов по схеме, представленной на рис. 5, где обозначения те же, что на рис. 2; кроме того: ФВ - фазовращатель, мост деления - мост деления мощностей. Сложение ВЧ-мощностей в резонаторе по такой схеме позволило получить в резонаторе 5 МВт и обеспечить защиту по ВЧ при пробоях в нем. При ускорении ядер легких элементов один генератор работает на резонатор; второй ВЧ-ввод разбирается, а отверстие вакуумной диафрагмы экранируется заглушкой.

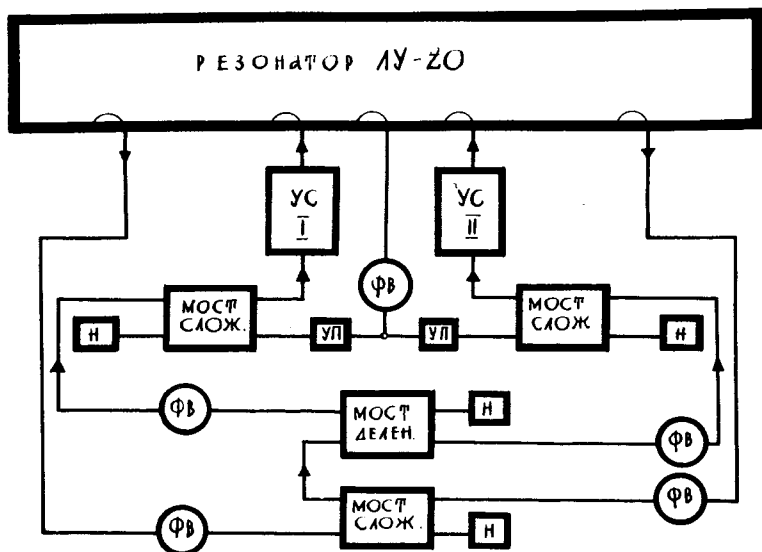


Рис. 5. Блок-схема включения двух усилителей мощности на резонатор ЛУ-20.

В настоящее время ЛУ-20 обеспечивает получение тока пучка протонов 50 мА, дейтронов 12 мА,  $\alpha$ -частиц 1 мА, углерода 0,1 мА. Длительность импульса тока частиц составляет 600 мкс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. ВЧ-возбуждение однорезонаторных ЛУ предпочтительнее проводить по схеме с ПОС через резонатор, используя небольшое /2÷4/ число каскадов усиления мощности. Для преодоления РВР можно дополнительно включить несколько каскадов усиления и цепь ДОС, обеспечивающие определенную скорость нарастания ВЧ-напряжения в зазорах ЛУ.

2. При развитии РВР /в основном в первых ускоряющих зазорах/ частота резонатора повышается. Это накладывает на цепь ДОС требование обеспечения фазы

ВЧ-напряжения на входе усилителя, соответствующей самовозбуждению системы. Петля системы ДОС должна располагаться в конце резонатора.

3. В "длинных" резонаторах ( $L > 7 \div 10\lambda$ ) частоты высших мод  $TM_{01n}$  могут оказаться в полосе пропускания усилителя мощности, поэтому необходимо применять меры по подавлению этих колебаний. Одним из таких способов является использование двух петель и моста сложения в цепи ПОС. Эта схема также позволяет обеспечить защиту по ВЧ при пробоях в резонаторе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баталин В.А. и др. ПТЭ, 1967, №5.
2. Андреев В.Г., Зайдин Д.Г. Авторское свидетельство №263767. Бюлл. ОИПОТЗ, 1970, №8, с.62.
3. Попов В.А. ОИЯИ, 9-9061, Дубна, 1975.
4. Polyakov B.J., Zarubin B.T., Kushin V.V. In: Proc. of the Int. Conf. of High-Energy Accel. and Instr. CERN, 1959, p.670.
5. Попов В.А. ОИЯИ, 9-9192, Дубна, 1975.
6. Попов В.А. Авторское свидетельство №536628. Бюлл. ОИПОТЗ, 1976, №43, с.163.
7. Муринов Б.П. Стабилизация и регулирование ВЧ-полей в линейных ускорителях ионов. Атомиздат, М., 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 августа 1978 года.