

## Быстроперестраиваемая ускоряющая система для компактного протонного синхротрона

И.И. Авербух

*ГНЦ РФ Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН Новосибирск, Россия*

В докладе рассмотрены проблемы и результаты работы по созданию ускоряющей системы для малогабаритного протонного синхротрона. Синхротрон рассчитан на работу в импульсном режиме с максимальным полем на орбите 5 Т. Малая длительность ускорительного цикла 2,5 мс требует высокого темпа ускорения и высокой скорости перестройки частоты. Ускоряющая система обеспечивает напряжение до 16 кВ в диапазоне частот 9,3 – 33,3 МГц. Скорость перестройки частоты 26000 МГц/с. Приводится конструктивная схема ускоряющей системы.

Основные проблемы создания ускоряющей системы для малогабаритного протонного синхротрона связаны с необходимостью получения высокого ускоряющего напряжения в частотно-перестраиваемом резонаторе с ограниченными размерами. Технические трудности обусловлены низкой добротностью ферритов. Как известно, при быстром намагничивании добротность ферритов вначале падает в несколько раз относительно значения в неподмагниченном состоянии. Кроме этого, добротность уменьшается с увеличением высокочастотной индукции в ферритах, т.е. с ростом высокочастотного напряжения на резонаторе. Предельные значения ВЧ-индукции, при которых добротность оказывается еще удовлетворительной, не превышают 150–200 Гс. Снижение уровня ВЧ-индукции путем увеличения объема ферритов вызывает сложности с обеспечением быстрой перестройки и с размещением ускоряющей системы из-за ограниченных размеров промежутка, составляющего всего 470 мм.

Вторая проблема связана с обеспечением высокой скорости перестройки частоты из-за короткого времени ускорения.

Основные характеристики синхротрона и технические требования к ускоряющей системе приведены в таблице 1 [1].

Разработка ускоряющей системы базируется на имеющемся в БИЯФ опыте создания малогабаритных быстроперестраиваемых ускоряющих устройств с ферритами [2,3]. Способ получения высоких напряжений в ускоряющих резонаторах на ферритах [4] состоит в том, что полное напряжение распределяется равномерно между несколькими резонаторными секциями с несколькими ускоряющими промежутками. Такое решение позволяет уменьшить индукцию и потери в ферритах, а также требуемую высокочастотную мощность.

В нашем случае, учитывая, что высокое напряжение должно одновременно обеспечиваться с быстрой перестройкой по частоте, каждая секция должна выполняться с минимальным объемом ферритов.

Таблица 1

Энергия ускоренных протонов	МэВ	200
Энергия инжекции	МэВ	12
Радиус дипольных магнитов	м	0,43
Максимальное поле на орбите	Т	5
Ускоряющее напряжение	кВ	14
Синхронная фаза – $\sin F$		0,5
Диапазон перестраиваемых частот	МГц	9,3-33,3
Длительность ускорительного цикла	мсек	2,5
Наибольшая скорость перестройки частоты	МГц/сек	24000
Число циклов в секунду		5
Длина ускорительного промежутка	м	0,47

Для выбора и предварительного исследования ферритов, а также определения наибольшего напряжения на одной резонаторной секции, был изготовлен коаксиальный резонатор на основе короткозамкнутой линии. Перестройка резонатора осуществлялась во внешнем электромагнитном подмагничивающем устройстве.

В резонаторе исследовались ферриты с наименьшими стандартными размерами, которые могут быть установлены в синхротроне. Размеры колец  $180 \times 110 \times 20$  мм. Высота набора ферритов была выбрана равной 100 мм с учетом возможности размещения в промежутке нескольких резонаторных секций.

В качестве критериев для отбора ферритов были приняты коэффициент перекрытия по частоте и добротность на начальной частоте диапазона 9,3 МГц в режиме перестройки, на которой в рабочем режиме должно быть максимальное напряжение и, соответственно, наибольшие высокочастотная индукция и потери.

По результатам исследований были отобраны ферриты 45 ВНП с начальной магнитной проницаемостью 45. Максимальное напряжение, полученное на резонаторе, 4100 В соответствует индукции в ферритах 210 Гс.

На основе проведенных измерений выполнены расчеты добротности резонатора в зависимости от уровня высокочастотной индукции в ферритах. Кривая этой зависимости приведена на рис.1. Как видно из этой характеристики, добротность ферритов при ВЧ-индукции 100 Гс достигает 80 и падает более чем в три раза при 200 Гс.

Резонатор перестраивается по частоте в 4 раза. Для перестройки резонатора в диапазоне частот 9,3–33,3 МГц требуется 4500 ампервитков.

На рис.2 приведена зависимость частоты настройки резонатора от времени при перестройке. На этом же рисунке, для сравнения, дана расчетная зависимость изменения частоты настройки ускоряющей системы от времени в рабочем режиме синхротрона. Как видно из сравнения этих кривых, экспериментально полученное распределение частот во времени превышает расчетное во всем диапазоне перестройки. Резонатор практически перестраивается в заданном диапазоне за 1,5 мс. Система подмагничивания обеспечивает требуемые скорости перестройки во всем диапазоне перестраиваемых частот. Достигнутая скорость перестройки частоты на начальном участке равна 26000 МГц/с.

На основе проведенных исследований предложена конструкция ускоряющей системы протонного синхротрона, изображенная на рис.3. Ускоряющая система представляет собой четыре одинаковые резонаторные секции, заполненные ферритами. Геометрическая длина одной резонаторной секции 100 мм. Напряжение на одной секции 4000 В. Потребляемая импульсная мощность составляет 12 кВт. Секции установлены последовательно в одном промежутке и объединены в две группы. Каждая группа питается от одной генераторной лампы ГУ-92А и перестраивается по частоте отдельным подмагничивающим устройством.

Вся ускоряющая система питается от трехкаскадного резонансного усилителя мощности. Оконечные каскады, выполненные на лампах ГУ-92А, работают в противофазе и возбуждают каждые две резонаторные секции противофазными напряжениями. Частотная настройка всех трех каскадов резонансного усилителя производится автоматически с помощью систем обратной связи.

Магнитопровод каждого подмагничивающего электромагнита выполнен из двух частей, имеющих С-образную форму. Подмагничивающий поток проникает в ферриты через специально предусмотренные в резонаторных секциях боковые продольные прорезы.

Обмотки подмагничивающих электромагнитов выполнены в виде 12 гальванически изолированных секций, каждая из которых содержит по 20 витков и питается от отдельного усилителя.

Тепловой режим резонаторных секций обеспечивается системой охлаждения ферритов через тонкий слой теплопроводного клея "Эластосил" на охлаждаемый корпус. Резонаторные секции могут работать с частотой повторения до 25 Гц.

Конструктивно резонаторные секции с системами подмагничивания и питающий высокочастотный усилитель мощности выполняются в виде единого компактного узла, составляющего ускоряющую систему. Полная потребляемая мощность ускоряющей системы 10 кВт.

Автор считает приятным долгом поблагодарить Г. И. Сильвестрова, В.Н. Карасюка, В.С. Попова и Д. Григорьева за участие и помощь в работе.

### Список литературы

- [1] Averboukh I.I. et al. Project of small dimensional 200 MeV proton synchrotron, Proceedings of EPAC, Rome, 1988, p.413.
- [2] Averboukh I.I. RF-cavity for compact proton synchrotron, Budker INP 95-67.
- [3] Averboukh I.I. STAC accelerating system, Budker INP 96-7.
- [4] Авербух И.И., Карлинер М.М. Способы повышения напряжения в ускоряющих резонаторах с перестраиваемой частотой. ПТЭ, 1985, №2, стр.29.

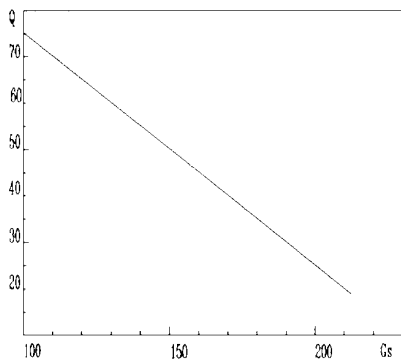


Рис.1. Зависимость добротности резонатора от плотности ВЧ-индукции в ферритах.

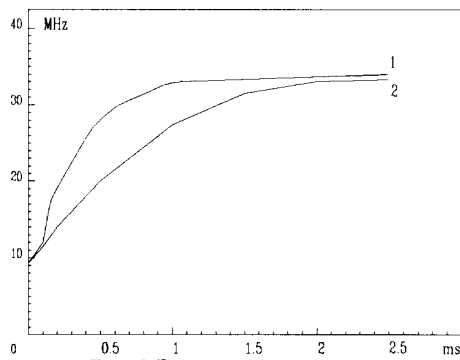
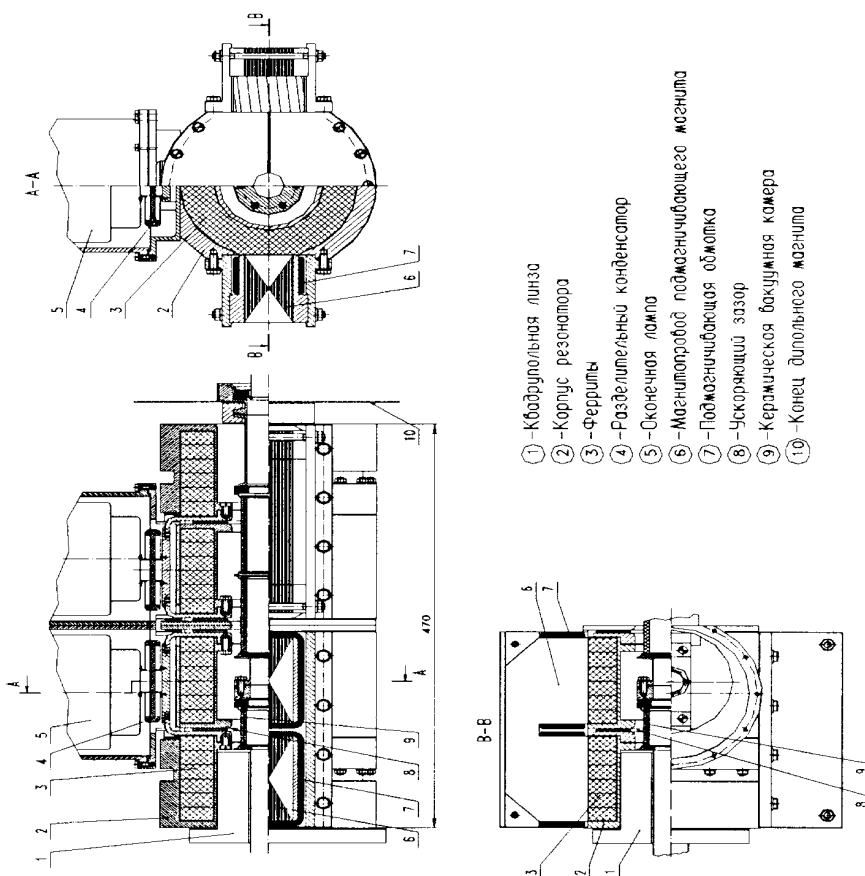


Рис.2. Зависимость частоты настройки резонатора от времени. 1—экспериментальная кривая; 2—расчетная кривая.



- ① -Квадратная линза
- ② -Корпус резонатора
- ③ -ферриты
- ④ -Разделительный конденсатор
- ⑤ -Оконечная лампа
- ⑥ -Магнетронной подмагничивающего магнита
- ⑦ -Подмагничивающая обмотка
- ⑧ -Ускоряющий зазор
- ⑨ -Керамическая вакуумная камера
- ⑩ -Конец дипольного магнита

Рис.3. Конструктивная схема ускоряющей системы.