

# Состояние работ по проекту сверхпроводящего вертикального ускорителя для прикладных целей

А.А. Васильев, О.А. Войналович

*Минатом России*

А.А. Глазков, А.Д. Коляскин, А.Г. Пономаренко

*Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия*

И.А. Звонарев, А.М. Коротков, Л.М. Севрюкова

*Отраслевая проблемная лаборатория*

*технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов при ИФВЭ,  
Протвино, Россия*

Рассматривается состав, компоновка и параметры основных элементов электронного сверхпроводящего ускорителя на энергию 5 МэВ с непрерывным током пучка 10 мкА. Ускоритель использует сверхпроводящую секцию из 14 ячеек на основе структуры типа TESLA-shape длиной 684 мм в вертикальном криостате. Приведена топологическая схема ускорителя, обсуждается система ВЧ-питания чоппера и сверхпроводящего ускоряющего резонатора. Ускоряющая СВЧ-структура выполняется методом гальванопластического формования медной оболочки и магнетронного распыления сверхпроводящего покрытия.

## 1. Топологическая схема ускорителя

Ускоритель состоит из традиционных элементов (инжектора, системы формирования и транспортировки пучка, вакуумной, систем ВЧ-питания и управления) и элементов, обусловленных наличием сверхпроводимости (ускоряющий резонатор на основе Nb/Cu [1,2], вертикальный гелиевый криостат, высокочастотный чоппер). Его топологическая схема приведена на рис.1, а расчетные параметры – в табл. 1.

На рис. 1 показан фрагмент схемы ускорителя [3]. В ней выделяются две части: вертикальная и горизонтальная. Наличие вертикальной части связано с выбором криостата вертикального типа поз. 11. Это обусловлено прежде всего сравнительной простотой конструкции криостата и относительно невысокой его стоимостью. Инжектор поз. 1 находится в горизонтальной части схемы. Он создает непрерывный пучок электронов с номинальной энергией 40 кэВ и током до 2 мА. Следующие за инжектором элементы схемы поз. 2..9 образуют систему предварительного формирования пучка.

Проводка пучка от источника и его фокусировка на влете в резонатор чоппера осуществляется электронно-оптической системой (ЭОС) поз. 2. После резонатора чоппера часть пучка, прошедшая через щель, поворачивается на  $90^\circ$  в поворотном магните поз. 4 и сбрасывается на коллимационную щель 6. ЭОС 9 согласует эмиттанс пучка с поперечным акцептансом канала.

## 2. Система предварительного формирования пучка

Призматический резонатор чоппера возбуждается на волне  $H_{101}$ . При  $W_{инж} = 40$  кэВ размерах резонатора  $76 \times 76 \times 20$  мм<sup>3</sup> и угле развертки пучка  $0.2$  рад мощность потерь составляет  $0,85$  кВт, напряженность электрического поля в центре резонатора равна  $20$  кВ/см, а добротность резонатора составляет  $1,04 \cdot 10^4$ . На выходе резонатора пучок разворачивается в веер в плоскости рисунка за счет действия ВЧ-составляющей магнитного поля.

Параметры системы предварительного формирования пучка, при которых обеспечивается согласование сгустка частиц с каналом ускорителя по поперечному движению, определены исходя из расчета динамики движения электронов с энергией  $40$  кэВ на участке формирования пучка от инжектора до сверхпроводящего резонатора. При этом нормализованный эмиттанс пучка принимался равным  $2\pi$  мм·мрад. На выходе инжектора поз. 1 рис. 1 в кроссовере пучок имеет диаметр  $1$  мм и расходимость  $10$  мрад.

В качестве электронно-оптических систем выбраны идентичные одиночные электростатические линзы. В ЭОС поз. 2 пучок фокусируется и на вход резонатора чоппера поступает с диаметром около  $1$  мм. В конце шестидесятимиллиметрового участка дрейфа между чоппером и передним краем поворотного магнита размер пучка вдоль вертикальной оси достигает  $13$  мм. При расчетах поворотного магнита выбран вариант  $90^\circ$  магнита с размерами полюсов  $200$  мм и зазором между ними  $25$  мм. В расчетах поле полагалось однородным и равным  $0,005$  Тл.

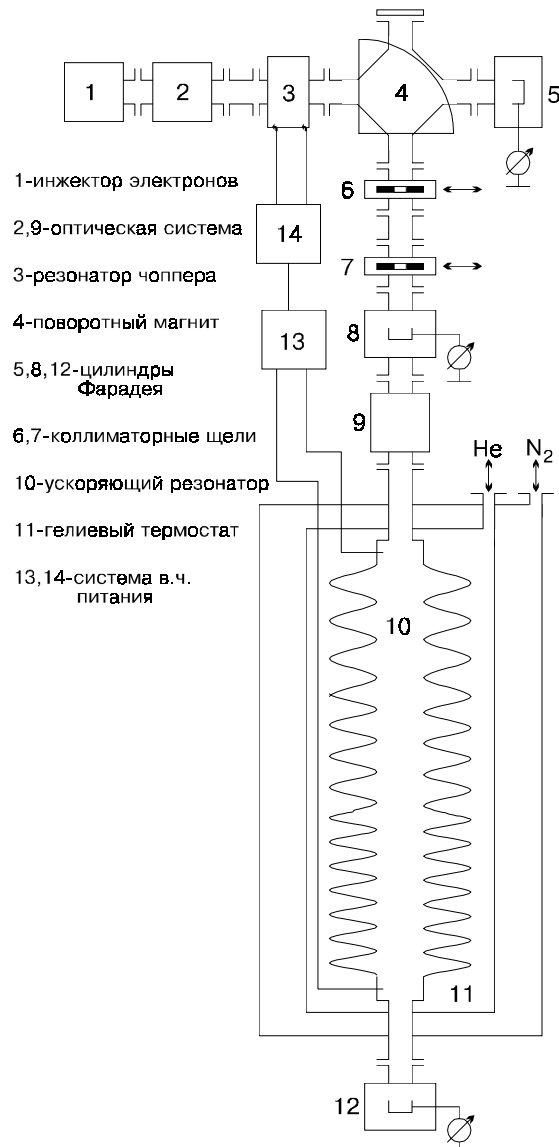


Рис. 1. Схема сверхпроводящего ускорителя электронов.

Таблица 1.

**Расчетные параметры ускорителя**

| №   | Наименование   | Значение |
|-----|--|----------|
| 1.  | Максимальная энергия электронов на выходе ускорителя, МэВ  | 5        |
| 2.  | Энергетический разброс в сгустке 20°, %  | 0,5      |
| 3.  | Энергия инжекции, кэВ  | 40       |
| 4.  | Ток ускоренных частиц, мкА   | 10       |
| 5.  | Рабочая частота f, ГГц   | 3        |
| 6.  | Длина ускоряющей структуры, мм   | 684      |
| 7.  | Число ячеек в резонаторе   | 14       |
| 8.  | Фаза синхронной частицы в ускоряющей части, град.  | ~10      |
| 9.  | Темп ускорения, МэВ/м  | 7,3      |
| 10. | Максимальное значение напряженности электрического поля на оси резонатора, кВ/см                         | 135.6    |
| 11. | Максимальное значение напряженности электрического поля на сверхпроводящей поверхности резонатора, кВ/см | 300      |
| 12. | Суммарная мощность с.в.ч. потерь в ячейках резонатора, Вт, при добротности $Q_0=1,0 \cdot 10^{10}$       | 1,4      |
|     | при добротности $Q_0=3,0 \cdot 10^8$   | 106      |

**3. Система ВЧ-питания**

Система обеспечивает создание и поддержание на необходимом уровне высокочастотных когерентных колебаний в сверхпроводящем ускоряющем резонаторе (СПР) и “теплом” чоппере. Основные параметры системы ВЧ-питания приведены в табл. 2. Применение сверхпроводимости в ускоряющем резонаторе делает недопустимым возникновение электрических пробоев в нем. Отсюда вытекает требование быстродействующей системы регулирования амплитуды поля, которая не допускала бы превышения установленного уровня напряженности поля более чем на 5% при внезапных и существенных изменениях режима работы ускорителя.

Таблица 2.

**Параметры системы ВЧ-питания ускорителя электронов**

| №  | Наименование  | Значение    |
|----|---|-------------|
| 1. | Мощность питания СПР, Вт, при номинальном уровне ускоряющего поля и полном токе пучка:<br>при добротности $Q_0 = 1 \cdot 10^{10}$ , Вт<br>при добротности $Q_0 = 3 \cdot 10^8$ , Вт | 51,7<br>156 |
| 2. | Нагрузка СПР током пучка, Вт  | 0 .. 50     |
| 3. | Мощность питания чоппера, кВт   | ~1          |
| 4. | Допустимая нестабильность сдвига фазы между в.ч. полями СПР и чоппера, град.  | 5 .. 10     |
| 5. | Допустимая нестабильность амплитуды поля, %:<br>в чоппере<br>в СПР  | ~5<br>~5    |

Дополнительные требования к системе ВЧ-питания вытекают из необходимости выполнения пуско-наладочных работ а также регулировки параметров пучка электронов при эксплуатации ускорителя и состоят в необходимости глубокой (до 100%) и отдельной регулировки амплитуды поля в чоппере и СПР, а также полной (на 360°) перестройки разности фаз этих полей.

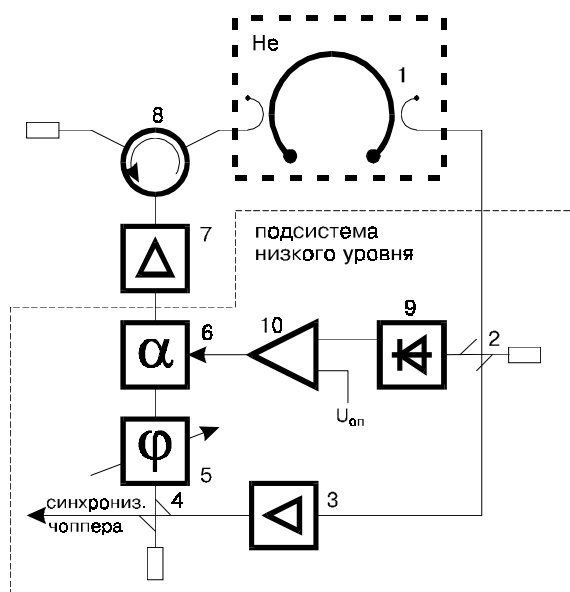


Рис. 2. Система питания СПР.

### Функциональная схема и принцип действия системы питания СПР

Система питания СПР обеспечивает близость частоты питания к собственной частоте СПР. Она строится по автогенераторной схеме, в которой ускоряющий резонатор является главным элементом колебательной системы, определяющим частоту. Функциональная схема такой системы приведена на рис.2 [4]. Автоколебания возникают в контуре, который состоит из высокочастотных элементов: СПР 1, направленных ответвителей 2 и 4, усилителей

с.в.ч. 3 и 7, фазовращателя 5, аттенюатора 6 и ферритового циркулятора 8.

Благодаря высокой добротности, СПР оказывает сильное стабилизирующее воздействие на частоту автоколебаний. Часть энергии колебаний, вырабатываемых автогенератором системы питания СПР, с помощью направленного ответвителя 4 отбирается и используется для синхронизации чоппера. При этом фаза синхросигнала определяется тем полем, которое установилось в СПР под воздействием всех факторов. В ошибке фазы сигнала синхронизации отсутствует составляющая, обусловленная нестабильностью собственной частоты СПР. Это отменяет необходимость стабилизации температуры резонатора, давления паров в термостате и иных мер, которые потребовались бы при использовании независимого задающего генератора.

Существенный недостаток варианта системы питания на основе автогенератора с ускоряющим СПР в цепи обратной связи состоит в большой чувствительности установившейся амплитуды колебаний в резонаторе к току ускоренного пучка. В результате выключения пучка избыточная энергия накапливается в резонаторе, что означает многократное возрастание амплитуды поля в нем. При замыкании петли обратной связи автогенератора данное явление лишь усиливается, поскольку нарастание поля в резонаторе в этом случае сопровождается ростом поступающей в него мощности.

Указанный недостаток компенсирует дополнительный контур регулирования амплитуды, который замыкается через направленный ответвитель 2, амплитудный детектор 9, дифференциальный усилитель сигнала ошибки 10 и аттенюатор 6. Если амплитуда колебаний, существующих в СПР, не совпадает с заданной, то сигнал ошибки через аттенюатор 6 компенсирует обнаруженное отклонение независимо от причины его возникновения.

Мощность сигнала обратной связи при номинальном уровне поля в резонаторе составляет 2..3 мВт. Допустимая статическая погрешность регулирования амплитуды – 5% при изменениях переходного ослабления СПР до 13 дБ.

Уровень сигнала синхронизации чоппера, снимаемого с направленного ответвителя 4, при номинальной амплитуде колебаний на входе ответвителя 2 – не менее 3 мВт. Допустимая нестабильность сдвига фазы между входом подсистемы низкого уровня и выходом синхронизации чоппера не более 1°.

### Система питания резонатора чоппера

Функциональная схема системы ВЧ-питания чоппера приведена на рис.3. Она содержит два контура регулирования: амплитуды и фазы поля в резонаторе.

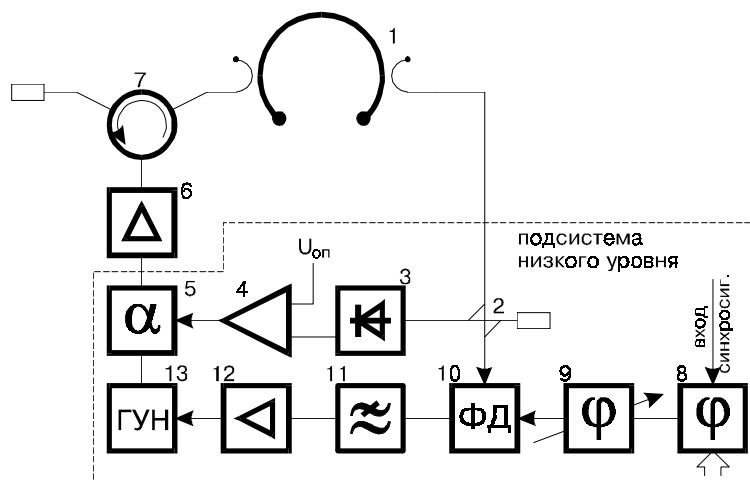


Рис. 3. Система стабилизации амплитуды и фазы поля в чоппере.

Контур регулирования амплитуды построен аналогично схеме рис.2. Его назначение состоит в том, чтобы стабилизировать уровень напряженности ВЧ-поля в резонаторе чоппера и обеспечить его регулировку с целью установки оптимального режима чоппирования. Он представляет собою цепочку элементов 1..7 рис.3. Стабилизация уровня СВЧ-сигнала обратной связи (вход направленного ответвителя поз.2 рис.3) осуществляется со статической погрешностью не более 5% при изменении ослабления, вносимого резонатором чоппера, до 10 дБ. Регулировка уровня поля осуществляется путем изменения напряжения постоянного тока на опорном входе дифференциального усилителя 4.

Контур регулирования фазы построен в виде системы ФАПЧ СВЧ-генератора 13, работающего в непрерывном режиме. Кроме генератора он включает фазовый детектор 10, фильтр нижних частот 11, УПТ 12 и цепочку элементов 5..7. Блок фазовращателей 8,9 позволяет устанавливать желаемое значение сдвига фазы между полями в резонаторе чоппера и СПР.

Генератор 13 обеспечивает уровень сигнала, достаточный для получения максимальной мощности питания резонатора при затухании, вносимом аттенуатором 5, до 10 дБ. Предполагаемый коэффициент усиления окончательного каскада равен 50 дБ и требуемый уровень входной мощности генератора  $\geq 0,12$  Вт.

## Список литературы

- [1] A.I.Ageev, V.V.Alimov, L.M.Sevryukova, O.A.Voinalovich. Development of Production Technology for Weldless Copper Shells of Superconducting Cavities.- Proc. of the 6 - th Workshop on RF Superconductivity. CEBAF, Newport News, USA, v.2, p. 802-808.
- [2] О.В. Матвеева, А.А. Наумов, Л.М. Севрюкова. Исследование возможностей метода гальванопластического формообразования медных оболочек сверхпроводящих ускоряющих СВЧ - структур сложной конфигурации без сварных швов.- Труды XIV Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ, Протвино, окт.1994, т.1, с.133-136.
- [3] A.A.Vasiliev, O.A.Voinalovich, A.A.Glazkov, A.D.Koliaskin, A.G.Ponomarenko, L.M.Sevryukova, S.S.Chermenin. The Project of Technological Superconducting Linear Electron Accelerator for 5 MeV Energy. - Proc. of the VII Workshop on RF Superconductivity. DAPNIA/SEA, Caley, France, Oct, 1995, p.683-688
- [4] A.A.Vasiliev, O.A.Voinalovich, A.A.Glazkov, A.D.Koliaskin, A.G.Ponomarenko, L.M.Sevryukova, I.A.Zvonarev. Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP). - Proc. of the European Conference on Accelerator Linac. EPAC- 96, Barselona, Spain, June 10-14, 1996 p.153