

Система ВЧ-питания линейного ускорителя УРАЛ-30М – нового инжектора в бустер ИФВЭ

А.Н. Воробьев, О.И. Кислый, Е.В. Мазуров, И.Г. Мальцев, В.А. Тепляков,
Б.В. Хайруллин, Н.А. Черный

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель с ВЧ-фокусировкой УРАЛ-30М на выходную энергию 30 МэВ состоит из начальной части (НЧУ) и четырех секций основной части ускорителя (С1÷С4 - ОЧУ). Ускоритель и его система ВЧ-питания рассчитаны на ускорение импульсных пучков протонов (H^+) и ионов H^- с токами 120 и 25 мА соответственно. Ускоряющая система построена на базе модификаций Н-резонатора [1,2]. Некоторые радиотехнические и энергетические параметры ускоряющей системы приведены в табл.1.

Таблица 1.

| № | Параметр | Величина | | | | |
|---|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | НЧУ | ОЧУ | | | |
| | | | С1 | С2 | С3 | С4 |
| 1 | Прирост энергии, МэВ | 1,7 | 5,45 | 7,85 | 7,22 | 7,68 |
| 2 | Длительность импульса тока пучка: - H^+ , мкс - H^- , мкс | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 3 | Режим работы пакетно-импульсный: - число импульсов в пакете - частота следования импульсов в пакете, Гц - частота повторения пакетов, Гц | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 4 | Рабочая частота ВЧ-поля, МГц | 148,5 | 148,5 | 148,5 | 148,5 | 148,5 |
| 5 | Собственная добротность резонатора | $13 \cdot 10^3$ | $7,7 \cdot 10^3$ | $9,1 \cdot 10^3$ | $9,1 \cdot 10^3$ | $9,1 \cdot 10^3$ |
| 6 | Мощность собственных потерь в резонаторе, кВт | 200 | 500 | 740 | 820 | 900 |
| 7 | Нестабильность амплитуды ВЧ-поля не более, % | ± 2 | ± 2 | ± 2 | ± 2 | ± 2 |
| 8 | Нестабильность фазы ВЧ-поля не более, град. | ± 2 | ± 2 | ± 2 | ± 2 | ± 2 |

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ВЧ-ПИТАНИЯ

В отличие от системы ВЧ-питания действующего инжектора УРАЛ-30 [3] рассматриваемая система (рис. 1) имеет разветвление ВЧ-каналов на низком уровне мощности. Это позволяет регулировать амплитуду и фазу ВЧ-поля в резонаторе путем изменения амплитуды и фазы напряжения возбуждения канала усиления мощности с помощью маломощных электронных регуляторов при фиксированных напряжениях анодного питания ВЧ-каскадов. При этом ВЧ-каналы более просто адаптируются к системе автоматизированного управления ускорителем.

Структура каждого из пяти ВЧ-каналов ВЧ1÷ВЧ5 включает в себя: канал усиления мощности в составе оконечного усилителя ОУ и предвозбудителя ПВ, модулятор анодных напряжений МАН, системы авторегулирования амплитуды АРА и фазы АРФ, исполнительные органы АРА и АРФ – быстродействующие аттенуатор-фазовращатель А-Ф и фазовращатель Ф.

Возбуждение ВЧ-каналов осуществляется от стабилизированного задающего устройства ЗУ, имеющего пять выходов по 1 Вт для возбуждения ВЧ-каналов и пять выходов опорной фазы по 0,5 Вт для АРФ.

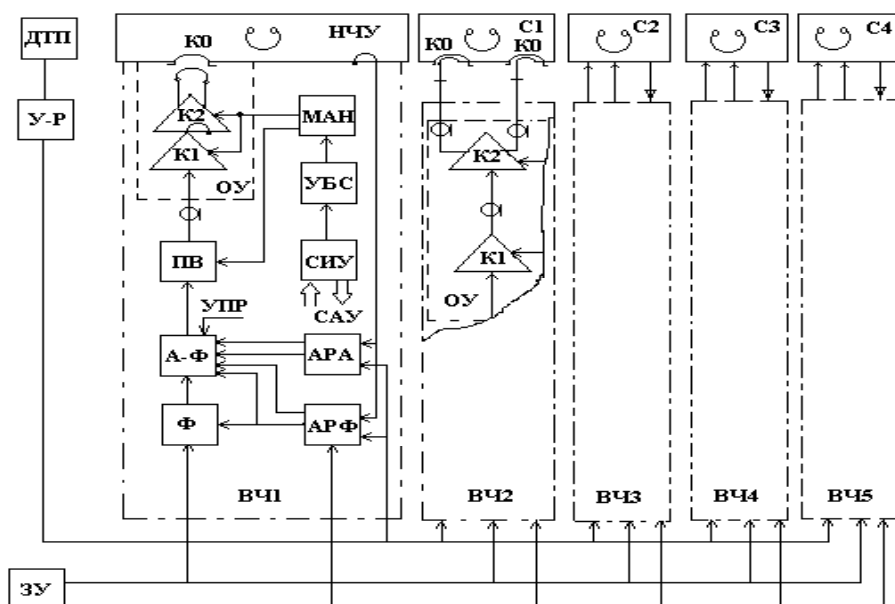


Рис.1. Структурная схема системы ВЧ-питания УРАЛ-30М

ВЧ-каналы имеют автономные устройства УБС, измерений и управления СИУ. Эти устройства обеспечивают возможность гибкого управления по командам системы автоматизированного управления ускорителем САУ.

Предусмотрена возможность управления амплитудой и фазой ВЧ-поля по программе, заданной устройством программного регулирования УПР.

2. КАНАЛЫ УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Мощность в резонаторы вводится через вакуумноплотные окна КО с помощью индуктивных петель связи, расположенных вне вакуумного объема. Это позволяет возбуждать резонатор как от отдельного оконечного усилителя с передачей мощности по фидеру связи, так и от усилителя, непосредственно установленного на резонаторе.

Резонатор НЧУ возбуждается от двухкаскадного ОУ, конструктивно объединенного с контейнером ускоряющей системы. Оконечный каскад К2 связан с резонатором симметричной петлей связи, которая является индуктивным плечом анодного контура каскада и погружена в колпачковое керамическое окно. Такая связь эквивалентна связи через фидер с электрической длиной $\pi/2$. Каскад выполнен по двухтактной схеме с общей сеткой на 12 триодах ГИ-39Б [4]. Предварительный каскад К1 имеет индуктивную связь с каскадом К2 и выполнен по аналогичной схеме на двух триодах ГИ-39Б. Максимальная установленная мощность оконечного усилителя составляет 600 кВт при напряжениях анодного питания каскадов 12 кВ.

Секции ОЧУ возбуждаются от отдельно установленных двухкаскадных оконечных усилителей. Связь с резонатором секции осуществляется двумя петлями связи, погруженными в колпачковые керамические окна. Мощность от оконечного каскада К2 передается по двум воздушным коаксиальным фидерам с размерами 110/48 мм и электрической длиной $(2k+1)\pi/2$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. Предварительный каскад К1 связан с каскадом К2 кабельной линией связи. Каскады К1 и К2 однотипны по конструкции. Конструкция каскада имеет полуволновый анодный контур и выполнена по схеме с общей сеткой на лампе ГИ-27АМ. Прототип такого каскада длительное время эксплуатируется в системе ВЧ-питания действующего инжектора, где он работает с выходной мощностью до 5 МВт при связи с резонатором через направленный ответвитель [3,5].

В рассматриваемой ВЧ-системе реализуется прямая связь с резонатором секции. В этом случае имеют место повышенные перенапряжения в анодном контуре и узлах вывода мощности оконечного каскада при переходных процессах в резонаторе в процессе авторегулирования. С целью повышения надежности и ре-

сурса работы каскада прототип был модернизирован. Были разработаны узлы вывода мощности с повышенной электрической прочностью и снижено напряжение анодного питания каскада.

Максимальная установленная мощность оконечного усилителя ВЧ-канала секции составляет 2,5÷3 МВт при напряжении анодного питания каскада К1 – 22 кВ и каскада К2 – 32 кВ.

Предвозбудители ПВ всех ВЧ-каналов имеют одинаковую структуру и состоят из двух каскадов на лампах ГИ-39Б, возбуждаемых от широкополосного транзисторного усилителя. Предвозбудитель обеспечивает на выходе до 30 кВт импульсной мощности при напряжении анодного питания ламповых каскадов 12 кВ.

Полоса пропускания канала усиления мощности НЧУ составляет 1 МГц, а канала усиления мощности секции ОЧУ – 1,2 МГц.

3. МОДУЛЯТОРЫ АНОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Каждый ВЧ-канал содержит один модулятор МАН, общий для всех ламповых каскадов канала. Структурная схема модулятора (рис. 2) включает в себя: блок формирования импульсов БФИ, блок сложения напряжений БСН, блок питания БП, блок дискретного регулирования БДР, блок импульсного управления БИУ.

В модуляторе использован принцип сложения выходных напряжений n параллельно включенных тиристорных ячеек (ТЯ) с помощью импульсных трансформаторов ИТ [6].

Напряжение модулятора регулируется дискретно путем включения или выключения необходимого количества тиристорных ячеек с шагом, равным напряжению одной ячейки.

Диоды Д шунтируют выходные цепи выключенных тиристорных ячеек. Требуемые напряжения питания каскадов снимаются с соответствующих высоковольтных выходов В. Вторичные обмотки ИТ изолированы от первичных на величину максимального выходного напряжения.

Разработана тиристорная ячейка на мощность 170 кВт при напряжении на выходе ИТ -1 кВ, которая формирует импульсы длительностью 80 мкс с частотой следования 25 Гц. Для формирования импульса в схеме ячейки используется цепь из последовательного соединения емкостного накопителя с времязадающей формирующей линией, которая коммутируется на нагрузку тиристором. Другим тиристором в паузе между импульсами осуществляется перезаряд формирующей линии. Схема по своим энергетическим характеристикам эквивалентна схеме с частичным разрядом емкостного накопителя. Амплитуда импульса на первичной обмотке ИТ равна напряжению на емкостном накопителе и составляет 400 В. Длительность импульса регулируется за счет отсечки тока нагрузки с помощью тиристора, включенного параллельно первичной обмотке ИТ. Возможность дистанционного регулирования длительности импульса позволяет использовать часть ячеек модулятора для программного регулирования анодных напряжений каскадов при включении пучка. Заряд емкостного накопителя осуществляется с помощью активного зарядно-дозировочного устройства, работающего в импульсном режиме с частотой 10 кГц. Это устройство обеспечивает стабилизацию напряжения на накопителе при изменении частоты посылок и нагрузки модулятора.

Модулятор ВЧ-канала секции ОЧУ на установленную мощность 5 МВт содержит 32 тиристорные ячейки с дискретным регулированием напряжения от 16 до 32 кВ. Требуемая мощность модулятора ВЧ-канала НЧУ составляет 1МВт. Для унификации оборудования модуляторов в ВЧ-канале НЧУ предполагается использовать часть модулятора ВЧ-канала секции ОЧУ из 12 ячеек с регулированием напряжения от 6 до 12 кВ при максимальной мощности до 2МВт. Модуляторы построены на низковольтной элементной базе и не содержат маслонаполненных высоковольтных устройств, что упрощает технологию их изготовления.

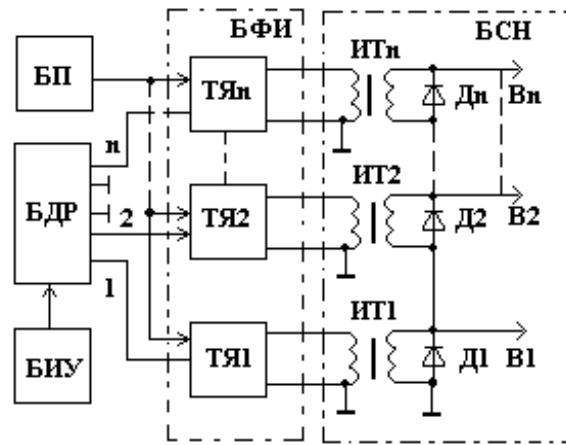


Рис.2. Структурная схема модулятора анодных напряжений

4. НАГРУЗКА ПУЧКОМ И МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЧ-ПОЛЕЙ

Для минимизации возмущений ВЧ-поля ускоряемым пучком в схеме ввода мощности в резонатор осуществляется подбор параметров связей и режима оконечного усилителя. Оконечный усилитель работает в недонапряженном режиме при "настроенной" системе ввода мощности и заданном запасе по установленной мощности.

Оценки нагрузки пучком, на основании которых были сформулированы требования к системам авто-регулирования, были проведены по методике, изложенной в работе [7]. Наибольшие возмущения амплитуды и фазы ожидаются в секциях С2÷С4 из-за достаточно высокого КПД резонаторов по пучку и наименьшего запаса по установленной мощности оконечных усилителей. Результаты оценок максимальных возмущений ВЧ-полей и требования к системам авторегулирования приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что ускорение пучка ионов Н⁺ может быть осуществлено только за счет подбора параметров связей и режима в системе ввода мощности в резонатор, а ускорение пучка протонов требует применения быстродействующих систем АРА и АРФ. Системы АРА и АРФ имеют двухконтурную структуру (рис. 3). Основной контур АРА по сигналу из резонатора содержит амплитудный детектор АД, схему сравнения СС, источник опорного напряжения ИОН, ПИД-регулятор, аттенюатор-фазовращатель А-Ф и канал усиления мощности.

Таблица 2.

| № | Параметр | Величина | |
|---|--|----------------|------------------|
| | | Н ⁺ | Н ⁻ |
| 1 | Коэффициент запаса по мощности в оконечном усилителе не менее | 2,5 | |
| 2 | Возмущения параметров ВЧ-поля и ускоренный ток пучка без систем АРА и АРФ: - возмущение амплитуды, % - возмущение фазы, град. - ускоренный ток пучка в конце импульса, мА | 8 2 50 | 2,1 0,8 24 |
| 3 | Требуемый диапазон регулирования: - амплитуды - фазы, град. | 1,2 6 | - - |
| 4 | Максимально-допустимое запаздывание сигнала регулирования: - амплитуды, мкс - фазы, мкс | 1 2,5 | - - |
| 5 | Требуемый коэффициент стабилизации: - амплитуды, не менее - фазы, не менее | 10 3 | - - |
| 6 | Верхняя граничная частота полосы пропускания системы: - АРА, кГц - АРФ, кГц | 160 50 | - - |

Технически достижимая полоса пропускания такого контура составляет 80÷100 кГц, что ограничивает статический коэффициент стабилизации величиной 6÷8. Для повышения устойчивости и предельного коэффициента стабилизации контура регулирования осуществляется коррекция его частотных характеристик с помощью ПИД-регулятора. Достижение требуемого динамического коэффициента стабилизации под пучком обеспечивается дополнительным контуром регулирования по сигналу с датчика тока пучка ДТП, который усиливается регулируемым усилителем РУ и поступает на отдельный вход аттенюатора-фазовращателя.

Дискретный регулятор ДР1 предназначен для компенсации медленных возмущений ВЧ-поля. По сигналу с таймера Т регулятор анализирует ошибку в момент времени перед включением пучка и в паузе между ВЧ-импульсами изменяет управляющее воздействие на фиксированную величину, если ошибка превысила допусковое значение. Дискретный регулятор ДР2 регулирует коэффициент усиления РУ по сигналу ошибки при включенном пучке.

Система АРФ отличается от системы АРА только измерительной частью, которая состоит из датчика фазы ДФ и фазодвигающего устройства ФУ. Сигнал ошибки по фазе выделяется фазовым датчиком относительно опорной фазы ЗУ. Исполнительным органом канала медленного регулирования является отдельный фазовращатель Ф.

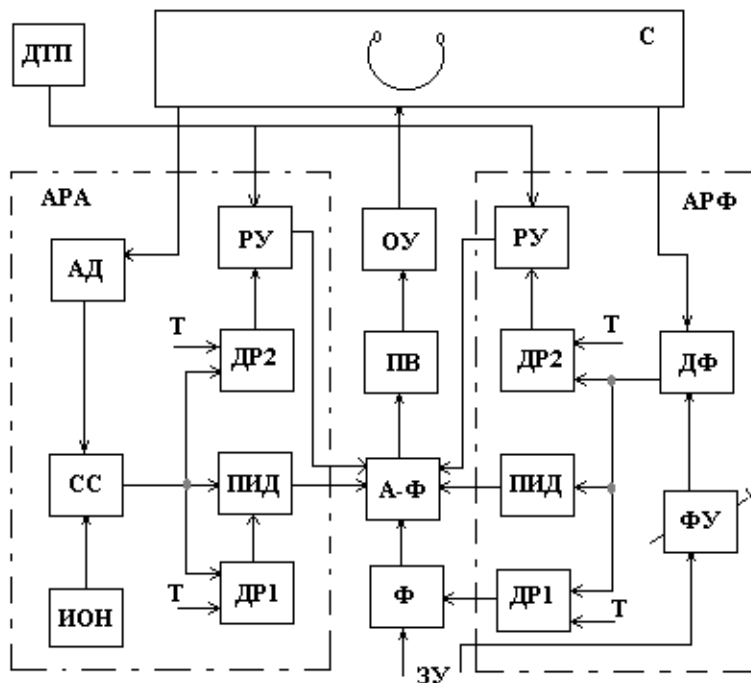


Рис. 3. Структурные схемы систем АРА и АРФ

Для снижения медленных возмущений ВЧ-полей предусмотрены дополнительные меры, включающие в себя: стабилизацию питающих напряжений, выравнивание длин линий связи, термостатирование и автоподстройку частоты резонаторов.

5. СОСТОЯНИЕ РАБОТ

К настоящему времени на стенде ускорителя работают ВЧ-каналы НЧУ и секции С1 без систем АРА и АРФ, подготовлен к работе ВЧ-канал секции С2.

Рабочий модулятор на мощность 5 МВт находится в стадии конструирования, а питание действующих ВЧ-каналов осуществляется от лабораторных макетов в режиме 1 Гц.

Осуществлен выбор технических решений и разработаны принципиальные схемы основных радиоэлектронных узлов системы АРА и АРФ.

На первом этапе ускорение интенсивного пучка протонов предполагается осуществлять с использованием программного регулирования амплитуды и фазы ВЧ-поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.А. Зенин и др. Препринт ИФВЭ 93-147. – Протвино, 1993.
2. О.К. Беляев и др. – Труды XVI Совещания по ускор. заряд. частиц. Протвино, 1998, т.1, с.110.
3. И.Г. Мальцев. Препринт ИФВЭ 80-4. – Протвино, 1980.
4. О.И. Кислый и др. – Труды XIV Совещания по ускор. заряд. частиц. Протвино, 1994, т. 3, с. 50.
5. Е.В. Мазуров и др. Препринт ИФВЭ 77-122. – Серпухов, 1977.
6. И.Г. Мальцев и др. Препринт ИФВЭ 94-66. – Протвино, 1994.
7. Е.В. Мазуров и др. Препринт ИФВЭ 81-125. – Серпухов, 1981.