

621.38 К
17-99

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



Е. Г. Пятнов, Н. П. Собенин

КОНСТРУКЦИИ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

МОСКВА 1985

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

621.38

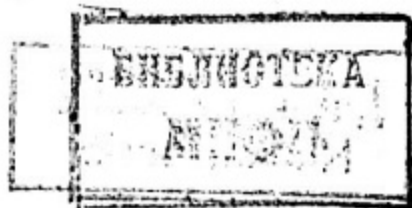
П-99

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Е. Г. Пятнов, Н. П. Собенин

КОНСТРУКЦИИ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

*Утверждено
редсоветом института
в качестве учебного пособия*



Москва 1985

Пятнов Е. Г., Собенин Н. П. Конструкции высокочастотных и радиотехнических систем линейных ускорителей: Учебное пособие. — М.: Изд. МИФИ, 1985. — 60 с.

В пособие вошел материал, посвященный высокочастотным и радиотехническим системам линейных ускорителей ионов. Рассмотрены основы выбора конструкций и размеров ускоряющих структур типа двухпроводных линий, H-резонаторов, структур с трубками дрейфа, бипериодических структур. Даются сведения об особенностях конструкций ускорителей с высокочастотной фокусировкой. Приводятся схемы высокочастотного питания линейных ускорителей ионов.

Пособие рассчитано на студентов специальностей 0632 и 0631, а также студентов радиофизических и технических факультетов других вузов.

Рецензенты:

В.Г. Станкевич, В.П. Марин, Н.И. Веников

© Московский инженерно-физический институт, 1985 г.

Редактор *Е.Г. Станкевич*
Техн. редактор *Н.М. Воронцова*
Корректор *И.Н. Маркина*

Тем. план 1985 г., поз. 71 (37)

Л.- 62520
Формат 60x84 1/16
Тираж 200 экз.

Подписано в печать 7/1-86
Объем 3,75 п.л. Уч.-изд.л. 3,5
Цена 25 коп. Изд. № 050-1
Заказ 2540

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
1.1. Общее устройство ЛУИ	5
1.2. Выбор основных параметров ЛУИ	7
2. Ускоряющие структуры линейных ускорителей ионов	10
2.1. Основные электродинамические характеристики ускоряющих структур	10
2.2. Классификация ускоряющих структур	12
2.3. Ускоряющие структуры с малой фазовой скоростью	14
2.3.1. Ускоряющие структуры типа двухпроводной линии	14
2.3.2. Ускоряющие структуры с волнами типа H (H-резонаторы)	18
2.3.3. Спиральные структуры	20
2.4. Ускоряющие структуры с трубками дрейфа	20
2.4.1. Выбор размеров структуры	22
2.4.2. Стабилизация характеристик ускоряющих структур	26
2.5. Бипериодические ускоряющие структуры	30
2.6. Высокочастотная фокусировка	33
2.6.1. Фазопеременная фокусировка	33
2.6.2. Высокочастотная квадрупольная фокусировка с пространственно-периодической структурой	35
2.6.3. Пространственно-однородная квадрупольная фокусировка	38
3. Система ВЧ-питания ЛУИ	42
3.1. Требования к разработке системы	42
3.2. Система ВЧ-питания с независимым возбуждением	45
3.3. Автоколебательная система ВЧ-питания	47
3.4. Элементы конструкций системы ВЧ-питания	50
4. Примеры конструкций ЛУИ	53
4.1. Линейный ускоритель протонов И-100	53
4.2. Ускоритель МEGАН	56
4.3. Нейтронный генератор на основе ЛУИ	59
Список литературы	60

1. ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители ионов (ЛУИ) нашли широкое распространение в ядерно-физических экспериментах непосредственно или как инжекторы кольцевых ускорителей на высокие энергии, а в последнее время они разрабатываются и в целях решения энергетических проблем на основе сильно-точных пучков. Под ЛУИ будем понимать как линейные ускорители протонов (ЛУП), так и линейные ускорители ионов, в том числе линейные ускорители тяжелых ионов (ЛУТИ) с массовым числом A от 40 до 232.

В настоящее время в научных центрах мира находятся в эксплуатации два десятка ЛУИ: прежде всего ЛУП с энергией от 10 до 800 МэВ и около десятка ЛУТИ с энергией от 4 до 10 МэВ/А. Большинство работающих ЛУП используется в качестве инжекторов протонных синхротронов (ПС) на сверхвысокие энергии. Среди них отметим ЛУП на 100 МэВ для ПС на 76 ГэВ в ИФВЭ (СССР), ЛУП на 200 МэВ для ПС на 400 ГэВ в ФНАЛ (США), ЛУП на 200 МэВ для ПС на 500 ГэВ в ЦЕРН (Швейцария). Наряду с указанными ЛУП со сравнительно небольшим средним током пучка создаются ЛУП со средним током до 1 мА. Это так называемые мезонные фабрики, одна из которых на базе ЛУП на 800 МэВ работает в Лос-Аламосе (США), а другая — МЕГАН — создается в нашей стране.

Новым этапом в развитии ЛУИ следует считать создание ускорителей со средним током в десятки и сотни мА для повышения технико-энергетического потенциала: осуществления инерционного термоядерного синтеза на основе высокоэнергетических пучков ионов; создания на базе сильноточного ЛУИ мощного генератора нейтронов (с потоком $10^{14} - 10^{15}$ нейтронов на см^2 в объеме 1 л.) с целью изучения конструкционных материалов "первой стенки" термоядерного реактора; создания ЛУИ на энергию 1,5 ГэВ и средний ток 300 мА для электроядерного метода получения расщепляющихся материалов.

Несмотря на существенное различие характеристик ускоренного пучка отмеченные ЛУИ конструктивно имеют много общего. Прежде всего это касается высокочастотной и радиотехнической систем, которые включают в себя ускоряющие системы (УС), системы высокочастотного (ВЧ) питания и др. Именно рассмотрению особенностей выбора и конструирования этих систем и посвящено настоящее учебное пособие. Основное внимание уделено ускоряющим системам, где происходит энергообмен ускоряемых ионов с электрической компонентой поля. Поскольку в ряде научных центров мира достигнуты значительные результаты по использованию высоко-

частотных полей не только для ускорения, но и фокусировки, то соответствующие системы так же рассмотрены в пособии.

1.1. Общее устройство ЛУИ

Рассмотрим основные системы ЛУИ, структурная схема которого представлена на рис. 1.1.

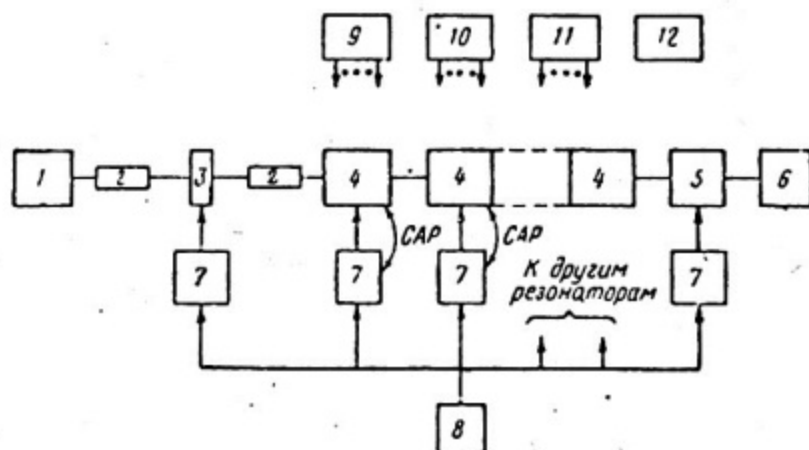


Рис. 1.1. Структурная схема линейного ускорителя ионов

Инжектор 1 состоит из источника ионов с системой питания и предварительного ускорителя. В предварительном ускорителе ионы ускоряются до энергий, при которых начинает работать основной ускоряющий канал линейного ВЧ-ускорителя. Обычно в протонных линейных ускорителях ускорение ВЧ-полем начинается при скоростях частиц $\beta \approx 0,03 \div 0,04$, что соответствует энергии 0,5 – 1 МэВ.

В качестве предварительного ускорителя до последнего времени использовался высоковольтный ускоритель прямого действия. В настоящее время для этих целей применяют структуры с фокусировкой ВЧ-полями.

Согласующий канал 2 служит для согласования эмиттанса пучка с акцептансом на входе ускоряющего ВЧ-канала с помощью системы фокусирующих линз. Группирователь (банчер) 3 и разгруппирователь (дебанчер) 5 служат для преобразования фазово-энергетических характеристик пучка, обеспечивая увеличение захвата предускоренного пучка и согласования фазового объема ускоренного пучка с акцептансом циклического ускорителя, если ЛУИ используется в качестве инжектора к последнему. Конструктивно группирователь и разгруппирователь выполняются в виде резонаторов, питающихся от ВЧ-генератора с частотой, равной основной частоте ВЧ-системы ЛУИ. Фазово-энергетические преобразования в пучках происходят за

счет взаимодействия с соответствующим образом сфазированной электрической компонентой электромагнитного поля резонаторов и движения в пространстве дрейфа.

Ускоряющая система 4 состоит из цепочки многозачорных резонаторов и служит для создания ускоряющих ВЧ-полей, удовлетворяющих условию резонансного ускорения. Так как частицы набирают энергию при однократном прохождении резонаторов, то ВЧ-поле в них должно быть сильным. Выбор типа ускоряющей системы для разных энергий частиц определяется многими факторами и, в конечном счете, ускоряющая система решающим образом влияет на стоимость сооружения ЛУИ и эффективность его эксплуатации.

Фокусирующая система служит для обеспечения устойчивого поперечного движения пучка. Как правило, она состоит из квадрупольных электромагнитных линз, размещаемых в трубках дрейфа внутри резонаторов или между резонаторами. В последнее время стали внедрять также методы, обеспечивающие фокусировку пучка ВЧ-полями, и применять для фокусировки сверхпроводящие соленоиды и квадрупольные линзы с постоянными магнитами.

Оконечные устройства 6 обеспечивают лучшее использование ускоренных пучков (например, накопители — группирователь и растяжитель в ускорителе МEGAN).

Система ВЧ-питания включает в себя ВЧ-каналы возбуждения резонаторов 7, задающее устройство со стабилизированным ВЧ-генератором 8, а также разветвленную фидерную систему с фазовращателями для установления требуемых фаз ВЧ-полей в резонаторах. В импульсных линейных ускорителях усилители мощности ВЧ-каналов питаются от импульсных модуляторов. Система автоматического регулирования (САР) предназначена для автоматической стабилизации амплитуды и фазы ВЧ-поля в резонаторах с высокой точностью (погрешность около 1% и 1° соответственно). Эта система также обеспечивает настройку резонаторов в резонанс и в случае необходимости регулирует характеристики ВЧ-поля.

Система измерения параметров пучка 9 служит для измерения тока, энергии, энергетического разброса, эмиттанса, а также поперечного положения пучка.

Вакуумная система 10 обеспечивает высокий вакуум (10^{-3} — 10^{-5} Па) в предварительном ускорителе, основной ускоряющей системе и в каналах транспортировки. Вакуумные системы ЛУИ многоступенчаты, имеют форвакуумную и высоковакуумную аппаратуру для безмасляной откачки, многочисленные вакуумные соединения и разветвленную систему вакуумопроводов с металлическими уплотнениями, с дистанционно управляемыми затворами и автоматизированными системами метрологии.

Система управления 1.1 производит сбор и обработку информации о работе всех систем ускорительного комплекса, о выходных характеристиках его пучка, выдает управляющие сигналы, обеспечивающие автоматически режим работы ЛУИ с заданными параметрами пучка. Системы управления ЛУИ строятся по иерархическому принципу и имеют несколько уровней управления и контроля.

Юстировочный комплекс 12 служит для точной установки элементов ускоряющей и фокусирующей систем и для наблюдения за их положением в процессе эксплуатации.

Опорные конструкции и, соответственно, фундаменты должны обеспечивать очень стабильное положение основных элементов ускоряющего и фокусирующего каналов. Это требование, так же как необходимость защиты персонала и аппаратуры от радиоактивного излучения, относится к специальным требованиям, предъявляемым к строительному комплексу.

Конструкции ускоряющих, фокусирующих и других элементов, находящихся в условиях сильной радиации, усложняются в связи с требованиями повышенной надежности. В них допустимо применение лишь радиационно стойких материалов.

Система охлаждения основных элементов ускоряюще-фокусирующего тракта и система кондиционирования должны быть рассчитаны на большое тепловыделение в ускоряющих структурах при жестких допусках на стабильность температуры.

Естественно, что схема ускорителя и технические решения его систем могут изменяться в зависимости от назначения ускорителя и требуемых характеристик пучка. Увеличение интенсивности и энергии ускоряемого пучка изменяют приведенную схему ускорителя. Многоззорные резонаторы могут быть заменены одноззорными с увеличением числа каналов ВЧ-питания. Это, в свою очередь, может привести к блоковой схеме построения системы ВЧ-питания или даже к реализации способа генерирования ВЧ-колебаний в ускоряющей системе при помощи пучка релятивистских электронов. Увеличение интенсивности пучка может привести и к каскадному построению линейного ускорителя, в котором в качестве первого (первых) каскада может использоваться многолучевой ускоритель.

1.2. Выбор основных параметров ЛУИ

При конструировании ЛУИ стремятся получить заданные параметры пучка, высокую надежность и эффективность работы ускорителя при разумных затратах на сооружение и эксплуатацию установки. Характеристики пучка ЛУИ зависят от выбора длины волны λ , амплитуды продольной составляющей напряженности ускоряющего поля на оси резонатора E_0 , энергии инъекции $W_{инж}$ или скорости инжектируемых частиц $\beta_{инж}$, а

также от конструкции УС, фокусирующих устройств, схемы и мощности системы ВЧ питания.

В первом приближении, параметры λ , E_0 и $\beta_{\text{шхс}}$ связаны с предельным током пучка $I_{\text{пр}}$ соотношением вида $I_{\text{пр}} \approx E_0 \beta_{\text{шхс}}^2 \lambda$.

Выбор всех трех величин, входящих в это произведение, произволен: каждая из них имеет свои ограничения.

1. Напряженность поля определяет темп ускорения ΔW_1 , т.е. увеличение энергии на единице длины, и естественно желание выбрать наибольшее значение E_0 . Однако в условиях ЛУИ предельное значение E_0 ограничивается пробивной напряженностью в вакууме и высокочастотным пробоем.

Из-за многофакторности процессов пробоя и электрической прочности вакуума строгих данных по величине пробивной напряженности $E_{\text{пр}}$ поля нет. Для грубых оценок можно определить пробивную напряженность поля в ускоряющей системе из соотношения:

$$E_{\text{пр}} \approx A \lambda^{-1/2}, \quad \text{где} \quad A = 18 \frac{\text{МВ}}{\text{м}^{1/2}}$$

Пробивная напряженность сильно зависит от качества вакуума (парциального состава газов), конструкционного материала УС, технологии обработки и очистки ее внутренней поверхности. Величина $E_{\text{пр}}$ изменяется от 15 до 100 МВ/м в диапазоне длин волн от 2 до 0,05 м.

Кроме физических ограничений, связанных с электрической прочностью УС, выбор величины напряженности поля влияет на технические и экономические характеристики ЛУИ, связанные с темпом ускорения. Без учета коэффициента пролетного времени ΔW_1 можно выразить из соотношения

$$\Delta W_1 = Ze \bar{E} \cos \varphi_S, \quad (1.1)$$

где Ze — заряд иона, \bar{E} — средняя по длине резонатора L_p амплитуда напряженности электрического поля, φ_S — равновесная фаза.

Увеличение темпа ускорения, с одной стороны, приводит к сокращению длины ЛУИ с заданной конечной энергией, а следовательно, к уменьшению его стоимости, с другой — к увеличению ВЧ-потерь на единице длины и, как результат, к удорожанию системы ВЧ-питания, САР и системы теплоотвода. На увеличение темпа ускорения накладываются также ограничения со стороны возможностей фокусирующей системы, надежности ЛУИ, стоимости его эксплуатации и других факторов. Для наиболее крупных ЛУИ темп ускорения и соответствующая ему максимальная напряженность поля на поверхности трубок дрейфа $E_{S \text{ макс}}$ лежат в пределах 0,9 — 2,5 МэВ/м и 14 — 25 МВ/м.

С повышением равновесной фазы φ_S растет интенсивность ЛУИ (увеличивается продольный захват), но при этом растут погонные потери

ВЧ-мощности в стенках резонатора. В существующих сильноточных ЛУИ с квадрупольной магнитной фокусировкой ψ_s не превышает 40° :

2. Остановимся теперь на вопросе выбора энергии инжекции. С учетом выражения для E_{np} , можно оценивать предельный ток по формуле $I_{np} \approx \approx \frac{1}{2} U_{инж} \lambda^{1/2}$, где $U_{инж}$ — напряжение инжекции в МВ, ток — в А, λ — в м.

Очевидно, чем выше энергия инжекции, тем больше предельный ток и легче решаются задачи фокусировки, уменьшается число дрейфовых трубок в начальной части ЛУИ, что облегчает конструкционные и монтажно-наладочные работы по самой сложной начальной части ЛУИ.

Дополнительным аргументом в пользу наибольшей энергии инжекции служит и то обстоятельство, что амплитуда гармоники ускоряющей волны для частиц, двигающихся вдоль оси, сильно зависит от ее скорости. Действительно, распределение напряженности поля по радиусу $E_z(r) \sim I_0 \left(\frac{2\pi r}{\beta \delta \lambda} \right)$, где r — текущее значение радиуса, $\beta = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, I_0 — модифицированная функция Бесселя, которая при больших значениях ее аргумента близка к экспоненте. Очевидно, что амплитуда поля падает по мере удаления от краев апертуры ускоряющего канала ($r = a$) к его оси ($r = 0$), причем с уменьшением $\beta_{инж}$ возрастает неравномерность поля по сечению пучка.

Практически энергию инжекции выбирают таким образом, чтобы инжектор по конструкции и габаритам был не сложнее самого ЛУИ.

В настоящее время намечается переход на энергии инжекции 75 — 100 кэВ при использовании высокочастотной фокусировки.

3. Выбор длины волны проводят с учетом многих взаимно конкурирующих факторов, находя оптимальное значение на этапе разработки проекта. Длина волны определяет геометрические масштабы ЛУИ, особенности системы ВЧ-питания и оказывает сильное влияние на размеры и конструкцию УС, характеристики фокусирующей системы.

Общие энергетические соображения говорят в пользу выбора малой длины волны. Действительно, для геометрически подобных УС, изготовленных из материала с одинаковым сопротивлением, шунтовое сопротивление $R_{ш} \sim \lambda^{-1/2}$, а ВЧ-мощность в импульсе P , создающая заданную амплитуду ускоряющего поля, пропорциональна квадрату поперечных размеров УС, т.е. λ^2 .

Таким образом, с точки зрения стоимости ВЧ-оборудования, которая определяется в основном мощностью, желательно применять малые значения λ .

Однако это может привести к резкому уменьшению интенсивности, потому что аксептанс ЛУИ с трубками дрейфа в диапазоне энергии 0,7 — 200 МэВ приблизительно пропорционален λ^3 .

При обсуждении выбора энергии инжекции было указано на резкое увеличение поля по радиусу из хода функции $I_0 \left(\frac{2\pi r}{\beta \gamma \lambda} \right)$ при больших аргументах. Аналогична зависимости от λ .

С учетом приведенных соображений длина волны для ЛУИ с энергией до 200 МэВ выбирается в диапазоне $\lambda = 1,5 \div 2$ м ($f = 200 \div 150$ МГц); для энергии свыше 200 МэВ $\lambda = 0,3$ м; для ускорителей тяжелых ионов $\lambda = 4 \div 12$ м. Большая длина волны для ЛУИ позволяет конструктивное совмещение магнитных линз системы фокусировки с дрейфовыми трубками, размеры которых при этих λ достаточно велики. Этим обеспечивается высокое $R_{ш}$ резонатора и относительно равномерное распределение электрического поля в ускоряющем зазоре.

Выбор основных параметров ЛУИ в указанных выше диапазонах обеспечивает получение сравнительно больших импульсных токов в ЛУИ.

2. УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

2.1. Основные электродинамические характеристики ускоряющих структур

Дисперсионная зависимость. Для идеальной периодической структуры, в которой отсутствуют возмущения и потери в стенках, имеется ряд собственных функций, которые описывают спектр волн в структуре. Каждой такой волне соответствует своя собственная частота. Зависимость собственных частот от сдвига фаз на периоде структуры $\varphi(K_{z0}L)$ называется дисперсионной зависимостью, или дисперсионной характеристикой (рис. 2.1).

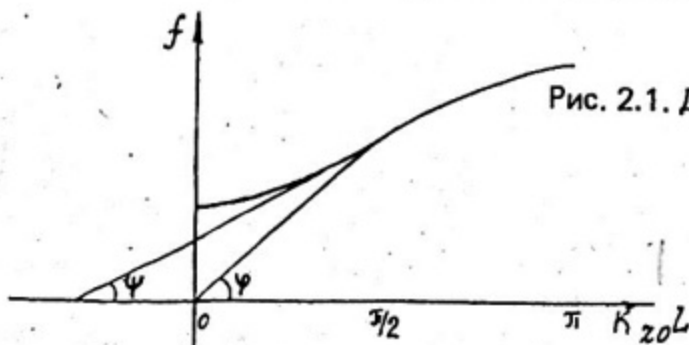


Рис. 2.1. Дисперсионная зависимость

Тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат в точку дисперсионной кривой, обозначающей одну из волн спектра, характеризует его фазовую скорость v_ϕ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f}{K_{z0}L} = \frac{v_\phi}{2\pi L} \quad (2.1)$$

Здесь K_{z0} — продольная фазовая постоянная основной гармоники; L — период структуры.

Тангенс угла наклона касательной к кривой в этой точке определяет групповую скорость v_{gp} :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{df}{d(K_{z0}L)} = \frac{v_{gp}}{2\pi L} \quad (2.2)$$

Групповая скорость характеризует скорость переноса энергии (для структур без потерь).

Коэффициент связи $K_{св}$ ускоряющей структуры определяется в виде

$$K_{св} = \frac{f_{\pi} - f_0}{\frac{f_{\pi} + f_0}{2}} \approx \frac{f_{\pi} - f_0}{f_{\pi/2}}, \quad (2.3)$$

где f_{π} , $f_{\pi/2}$ и f_0 — частоты видов колебаний π , $\pi/2$ и 0.

Эффективное шунтовое сопротивление $Z_{эфф}$ выражает связь между приростом энергии частиц с зарядом Ze на единице длины резонатора ΔW_1 и потерями высокочастотной мощности в стенках резонатора единичной длины P_1 , при нулевой равновесной фазе:

$$Z_{эфф} = \frac{\Delta W_1^2}{Z^2 e^2 P_1} = 2R_{ш} T^2 \quad (2.4)$$

где

$$\Delta W_1 = Ze \bar{E} T = Ze \frac{1}{L_p} \int_0^{L_p} E_0 \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda \beta_s}\right) dz, \quad (2.5)$$

$$T = \frac{\int_0^{L_p} E_0 \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda \beta_s}\right) dz}{\int_0^{L_p} |E_0| dz}; \quad (2.6)$$

$$R_{ш} = \frac{\bar{E}^2}{2P_1} = \frac{1}{2P_1} \left[\frac{1}{L_p} \int_0^{L_p} |E_0| dz \right]^2 \quad (2.7)$$

(T — коэффициент пролетного времени или коэффициент взаимодействия;

$R_{ш}$ — шунтовое сопротивление, обычно применяемое для структур, работающих в режиме бегущей волны);

$$P_f = \frac{P}{L\rho}; \quad (2.8)$$

$$P = \frac{R_s}{2} \int_S H_s^2 ds \quad (2.9)$$

(S — площадь поверхности резонатора, H_s — напряженность магнитного поля у стенки, R_s — удельное поверхностное сопротивление материала стенок);

$$R_s = \frac{1}{\sigma\delta} = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}, \quad (2.10)$$

где σ — удельная проводимость материала стенок; δ — глубина проникновения.

В ряде случаев представляет интерес значение отношения $R_{ш}/Q$, которое зависит от размеров ускоряющего резонатора;

$$Q = \frac{2\pi f W_p}{P}; \quad (2.11)$$

$$W_p = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V E^2 dV = \frac{\mu_0}{2} \int_V H^2 dV \quad (2.12)$$

(V — объем резонатора).

2.2. Классификация ускоряющих структур

Провести исчерпывающую классификацию весьма затруднительно, поскольку разработка новых ускоряющих структур и всестороннее исследование известных структур интенсивно продолжается и в настоящее время, что, в свою очередь, говорит об отсутствии на сегодня структур, удовлетворяющих все возрастающим запросам ускорительной техники. При выборе того или иного типа ускоряющих структур обращают внимание прежде всего на величину эффективного шунтового сопротивления, стабильность выходных характеристик ускоренного пучка к изменению параметров структуры и ВЧ-генератора, высокую электрическую прочность, малые габариты, стоимость, технологичность и эксплуатабельность. Можно провести сравнение структур по значению эффективного шунтового сопротивления, пред-

варительно разбив все структуры по величине фазовой скорости волны на три класса, в каждом из которых наибольшее $Z_{эфф}$ имеют те или иные структуры. Каждый класс характеризуется и своей рабочей длиной волны. Соответствующие данные приведены в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Характеристика	Малые β_g , I	Средние β_g , II	Большие β_g , III
β_g $\lambda, м$	0,005 – 0,1 4 – 12	0,04 – 0,5 1,5 – 2,5	0,5 – 1,0 0,3 – 0,4
Тип частиц	Тяжелые ионы	Протоны, дейтроны	Протоны и другие легкие частицы
Тип ускоряющей структуры	Резонаторы из отрезков длинных линий, H – резонаторы, спиральные структуры	Структуры с трубками дрейфа и их модификации	Резонаторы в виде цепочки связанных ячеек

На рис. 2.2 показано, как меняется эффективное шунтовое сопротивление в функции фазовой скорости волны для структур, относящихся соответственно к I, II и III классам, причем I – на основе H-резонаторов, II – резонаторов Альвареца, а III – бипериодических структур.

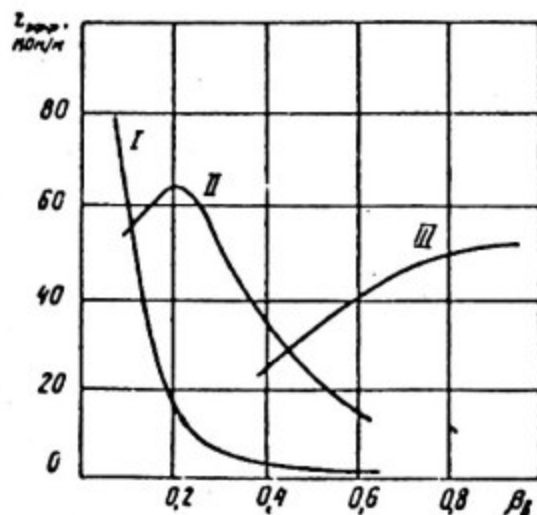


Рис. 2.2. График изменения эффективного шунтового сопротивления в функции фазовой скорости волны для различных ускоряющих структур

В пределах отдельных классов структуры могут быть реализованы как с синфазным распределением поля (колебания вида 0), так и с противофазным (колебания вида π).

2.3. Ускоряющие структуры с малой фазовой скоростью

Известно большое многообразие структур для ускорения протонов с малой фазовой скоростью ионов и с низким зарядовым состоянием (большим отношением $\frac{A}{Z}$). Можно все ускоряющие структуры с малой фазовой скоростью отнести к одной из следующих трех групп: структуры типа двухпроводной линии, структуры с волнами типа Н и спиральные структуры.

2.3.1. Ускоряющие структуры типа двухпроводной линии

В структурах этого типа многократно используется разность потенциалов, развиваемая на участках двухпроводной линии. Известны модификации такой структуры: структура Видероз, в которой в качестве одного из проводников используется наружный цилиндр, структура в виде четвертьволновой линии и структура со встречными вибраторами.

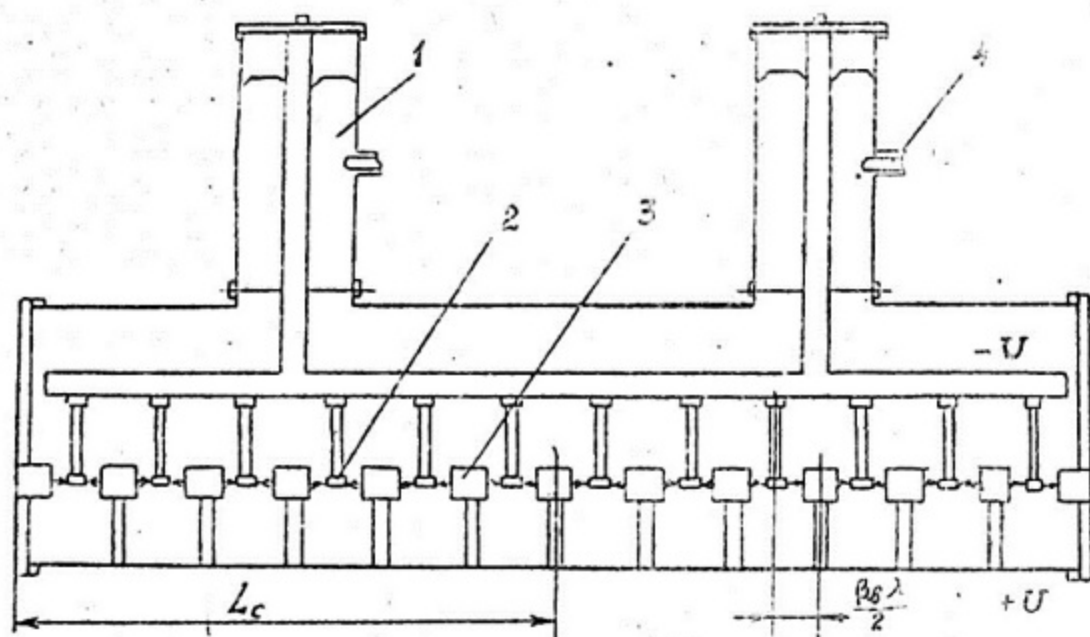


Рис. 2.3. Структура Видероз:

1 — шлейфы; 2 — короткие дрейфовые трубки; 3 — дрейфовые трубки с квадрупольями; 4 — петли связи

На рис. 2.3 представлена структура Видероз, которую можно рассматривать как коаксиальную линию со смещенным внутренним проводником, нагруженную встречными штырями с трубками дрейфа на концах. Электрическую длину трубок дрейфа обычно выбирают равной π , а иногда в

начальной части для размещения линз даже 3π . Участок структуры длиной L_c со шлейфом посредине рассматривается как одна секция. Внутренний проводник структуры крепится с помощью шлейфов, которые служат для настройки системы в резонанс на данной частоте, а также для получения необходимого распределения напряжения вдоль оси резонатора. Внешний корпус, опоры-шлейфы и внутренняя структура делаются из мягкой стали с нанесенным гальванически медным покрытием толщиной 0,2 — 0,3 мм, а короткие дрейфовые трубки (без квадруполей) — из алюминия с гальванически нанесенным слоем меди. Конструкция позволяет юстировать ось трубок дрейфа с погрешностью 0,1 мм. Петли связи сдвигаются для контроля амплитуды и фазы поля. В длинных трубках дрейфа размещены квадруполи.

Структура является широкополосной, значение эффективного шунтового сопротивления составляет 50 МОм/м на длине волны 12 м при добротности 10^4 . Тот факт, что с помощью шлейфов можно перестраивать структуру в широких пределах и получать любой закон распределения напряжения по длине резонатора, позволяет использовать ее прежде всего для предускорения тяжелых ионов.

К недостаткам структуры следует отнести наличие габаритных выступающих частей, что затрудняет применение фокусировки сверхпроводящими соленоидами, и сравнительно небольшое значение эффективного шунтового сопротивления.

Система Видероз реализована на двух ускорителях — Унилак (ФРГ) и Суперхилак (США). Унилак рассчитан для ускорения ионов с минимальным отношением заряда к массе 11/238 от 11,6 кэВ/нуклон до 1,405 МэВ/нуклон, а Суперхилак — для ускорения ионов U^{++} от 12 кэВ/нуклон до 113 кэВ/нуклон. Резонаторы того и другого ускорителей имеют по три шлейфа. Структуры работают на частотах 27,1 МГц и 23,4 МГц соответственно. Начальное значение $\beta_0 = 0,005$. Диаметр апертуры в ускорителе Суперхилак меняется от 1,25 до 1,75 см.

В ускоряющих структурах со встречными вибраторами можно получить наилучшую в сравнении с другими структурами равномерность электрического поля по длине. Известны варианты таких структур с двумя и четырьмя вибраторами. На рис. 2,4 изображен резонатор с двумя встречными вибраторами и распределение напряжения между вибраторами в некоторый момент времени. Из-за встречного расположения вибраторов пучность напряжения на одном вибраторе приходится на узел напряжения на другом и наоборот. Поэтому разность напряжений по всей длине резонатора велика и распределение ускоряющего напряжения равномерно. Этим такая структура выгодно отличается от двухпроводной длинной линии, работающей на стоячей волне, где пучности и узлы ВЧ-напряжения на проводниках совпадают и распределение напряжения синусоидально.

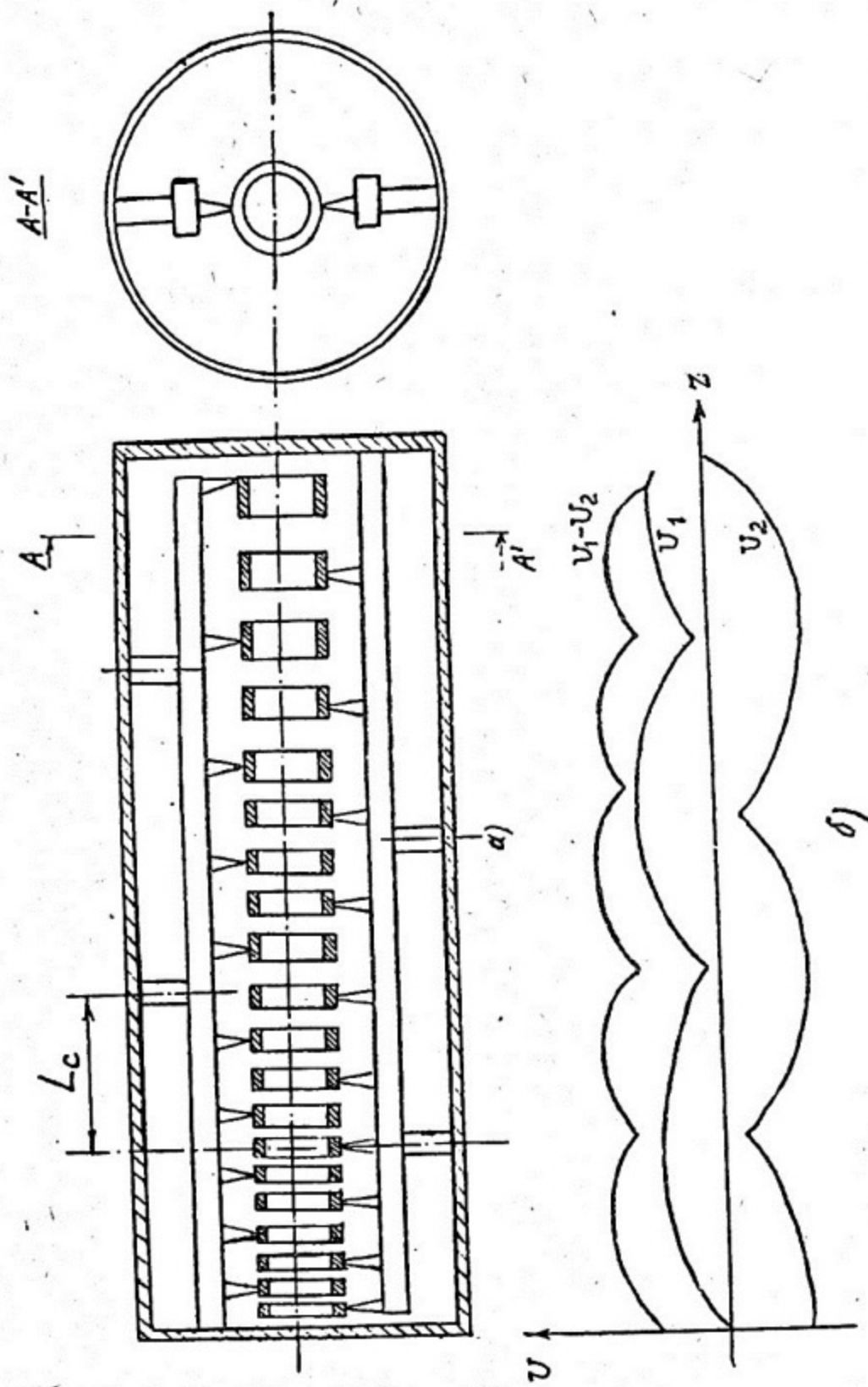


Рис. 2.4. Структура со встречными вибраторами (а) и распределение напряжения на вибраторах и между вибраторами в фиксированный момент времени (б).

Каждый вибратор подсоединен к кожуху с помощью опор. Расстояние между соседними опорами одного вибратора примерно $\lambda/2$ (с учетом электрического "ускорения" из-за влияния емкостей между трубками и емкостей вибраторов на корпус), а опоры одного вибратора сдвинуты относительно опор другого на $\lambda/4$. Участок между соседними опорами L_c — длина секции ускоряющего резонатора.

В начальных секциях, где период расстановки трубок дрейфа $L = \beta_g \lambda/2$ изменяется, для поддержания постоянного значения напряженности ускоряющего поля увеличивают значение напряжения по длине резонатора. Изменением положения опор можно регулировать распределение поля по длине резонатора. Так, для увеличения напряжения на выходном конце резонатора следует сдвинуть опору к входному концу, т.е. необходимо увеличить длину секции там, где нужно увеличить напряжение.

Ускоряющая структура с двумя вибраторами имеет поперечную составляющую электрического поля в ускоряющих зазорах. Свободна от этого недостатка структура с четырьмя вибраторами. Одна пара вибраторов, расположенных с разных сторон от оси, прикреплена к одному днищу, а другая — к другому. Каждая дрейфовая трубка прикрепляется к двум вибраторам. Получается комбинация из двух "лестниц", вставленных одна в другую. Опоры к каждой паре вибраторов расположены через $\lambda/2$, а между собой сдвинуты на $\lambda/2$ (с учетом "укорочения"): Электрическое поле в канале носит уже квадрупольный характер, поэтому на оси нет поперечного поля.

Принято при расчете таких структур пользоваться квазистационарным методом с привлечением эквивалентных схем. Задача при этом разбивается на две части. Сначала находят распределение электрического поля методами электростатики и определяют эквивалентные параметры резонатора. Затем на основе найденных эквивалентных параметров методом эквивалентных схем рассчитывают электродинамические параметры резонатора.

Для составления эквивалентной схемы резонатора нужно найти емкость между дрейфовыми трубками $C_{т.т}$ и между вибраторами $C_{б.б}$, емкость вибратора на корпус $C_{б.к}$ и индуктивность вибратора $L_{б}$.

Величина емкости рассчитывается разностным методом. Для определения погонной индуктивности используют соотношение

$$L_n = \frac{1}{c^2 C_c},$$

где C_c — погонная емкость вибраторов, соединенных между собой ($U_1 = U_2$),
 c — скорость света.

2.3.2. Ускоряющие структуры с волнами типа H (H-резонаторы)

Известны следующие модификации таких структур: структура в виде гребенки (волны H_{111} и H_{11N}), структура типа встречных штырей (волна H_{111}); структура с фокусировкой высокочастотным полем (волна H_{011}); структура с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (волна H_{211}).

Одно из основных преимуществ H-резонаторов в сравнении с резонаторами на E_{010} -волне состоит в меньших поперечных размерах структуры, что весьма важно для начальной части ускорителей, особенно ускорителей тяжелых ионов.

На рис. 2.5,а и б представлены модификации двухкамерных H-резонаторов, один из которых (б) изображен без трубок дрейфа. Можно рассматривать первый резонатор (а) как структуру типа "встречные штыри", возбуждаемую на колебаниях вида π (волна H_{111}), а второй — как структуру на волне H_{011} . Главным резонирующим элементом в структуре (рис. 2.5,б) является цилиндр с продольной щелью по образующей, где сосредоточено электрическое поле.

В структуре рис. 2.5,а трубки дрейфа попеременно электрически подсоединены к противоположным стенкам резонатора. Магнитное поле параллельно оси резонатора и токи в стенках поперечные (изображены на рисунке). Период структуры $L = \frac{1}{2} \beta_g \lambda$. Интересно проследить, как меняется частота и эффективное шунтовое сопротивление в такой структуре в функции скорости частиц (от 0,01 до 0,1 с) и относительной ширины зазора между дрейфовыми трубками $2b/L$ ($2b$ — ширина зазора). Частота $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_p C_p}}$, где L_p — индуктивность резонатора, которая мало меняется от β_g и $2b/L$, а C_p определяется емкостью между соседними трубками дрейфа, емкостью между трубками дрейфа и противоположной средней частью корпуса и емкостью пустого резонатора. Частота уменьшается с уменьшением $2b/L$ или с уменьшением β_g (с увеличением числа зазоров), так как увеличивается C_p . Эффективное шунтовое сопротивление при данном $\frac{2b}{L}$ падает с ростом β_g , так как уменьшается число ускоряющих зазоров. При данной β_g эффективное шунтовое сопротивление максимально при $2b/L = 0,5$. Малые $2b/L$ не позволяют из-за большой емкости иметь высокие напряжения на зазорах, а при больших $2b/L$ падает $Z_{эфф}$ из-за уменьшения коэффициента пролетного времени. Анализ структур на основе волны H_{111} , структуры Видероз, спиральных и структуры Альвареца в диапазоне $0,01 \beta_g < 0,1$ показал, что $Z_{эфф}$ для первой структуры в три раза выше.

В ускорителях с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой нашли распространение также трехкамерные (рис. 2.6,а) и четырехкамерные (рис. 2.6,б и в) H-резонаторы. Структура поля в трехкамерном резонаторе аналогична структуре поля в двухкамерном, если разделить его

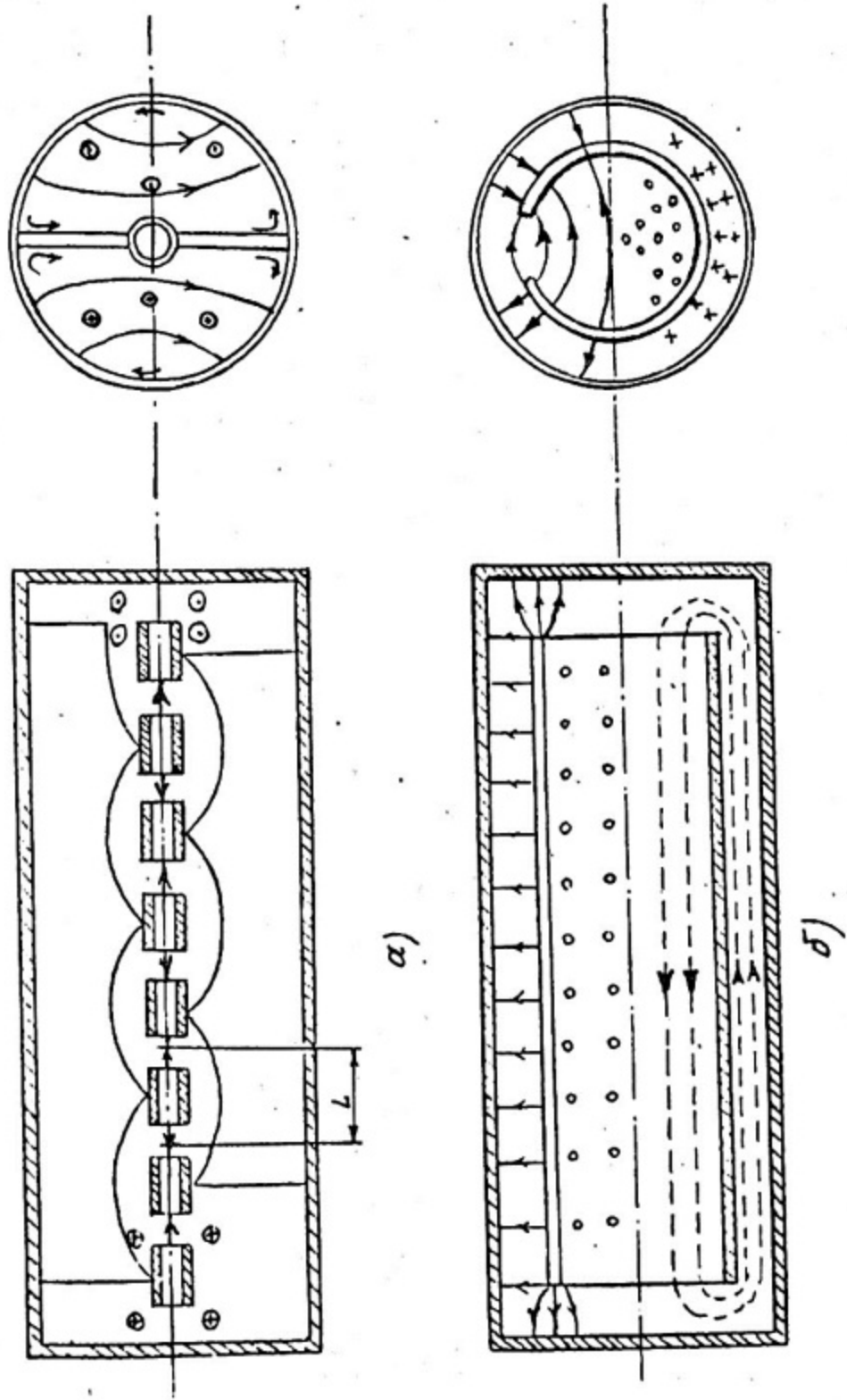


Рис. 2.5. Двухкамерные N-резонаторы на волнах H_{1n} (а) и H_{01} (б) (сплошные линии — силовые линии электрического поля, а пунктирные — магнитного поля)

горизонтальной плоскостью. Замыкание магнитного поля также происходит у торцов резонатора, до которых не доходят межкамерные перегородки. К краям разрезов труб крепятся ускоряющие электроды. Аналогичные замечания можно сделать и по отношению к четырехкамерным резонаторам, причем рис. 2.6,б соответствует осесимметричному случаю, а рис. 2.6,в — типа "клеверный лист". В случае (б) резонатор представляет собой цилиндр, разделенный идентичными радиальными перегородками, не доходящими до оси резонатора. Здесь поверхность резонатора совпадает с координатными поверхностями системы, поэтому упрощается расчет методом разделения переменных.

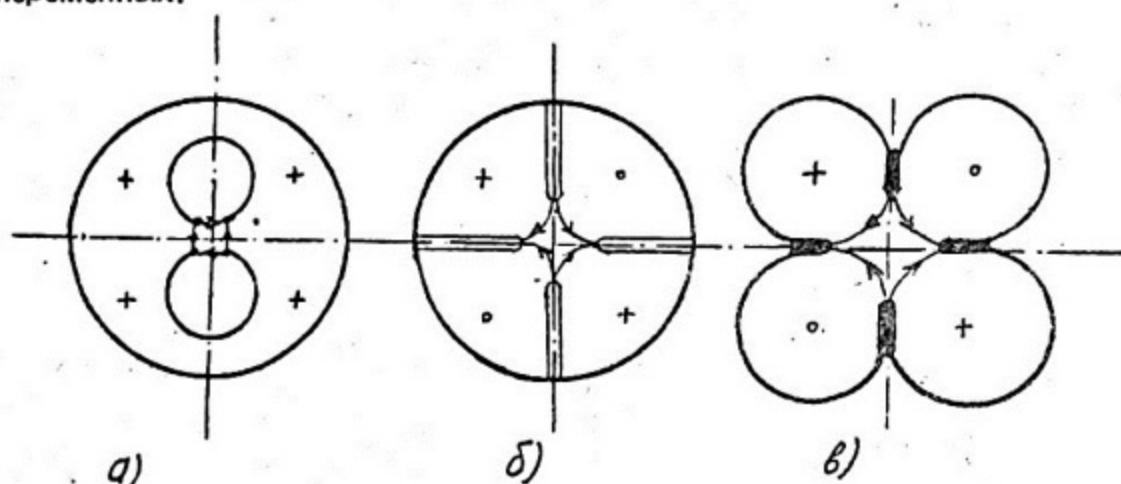


Рис. 2.6. Трехкамерный (а) и четырехкамерные (б, в) Н-резонаторы

2.3.3. Спиральные структуры

С помощью таких структур можно получить большие коэффициенты замедления при малых размерах. На рис. 2.7,а приведена структура типа "спираль с проводящим кожухом". Трудности использования его — малая электрическая прочность и малая механическая жесткость конструкции.

Однако спиральные элементы применяются в ускоряющих структурах с трубками дрейфа, с двухпроводными линиями и с другими типами замедляющих структур. Длины спиралей, поддерживающие трубки дрейфа или длинные линии, выбираются меньше четверти длины волны. Для сокращения поперечных размеров У.С. спиральным держателям придают плоскую форму (рис. 2.7,б).

2.4. Ускоряющие структуры с трубками дрейфа

Эта структура широко применяется в ЛУИ как для ускорения протонов, так и тяжелых ионов. Ее можно представить как резонатор, в котором

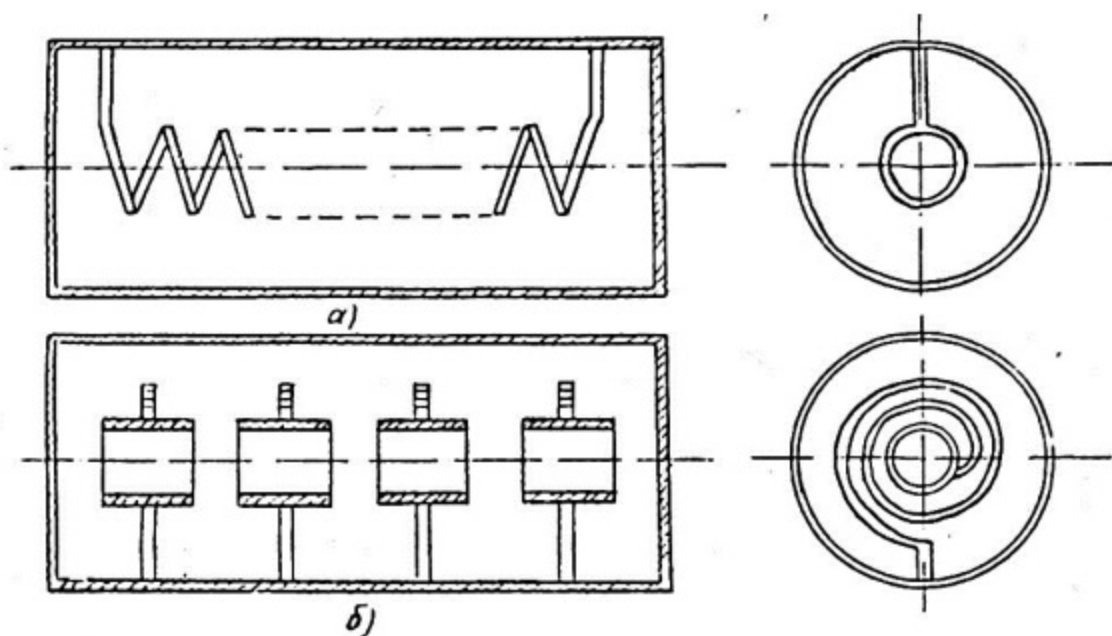


Рис. 2.7. Ускоряющие структуры спирального типа

размещены полые цилиндры, называемые дрейфовыми (пролетными) трубками (рис. 2.8). В резонаторе возбуждаются колебания вида E_{010} . Необходимые для резонансного ускорения фазовые соотношения в зазорах трубок обеспечиваются соответствующим изменением длины трубок: частицы ускоряются в зазоре между трубками и экранируются от поля, когда оно имеет противоположное направление. Расстояние между серединами смежных трубок равно $2h = k\beta_0 \lambda$, где k — целое число, определяющее кратность длины периода ускорения.

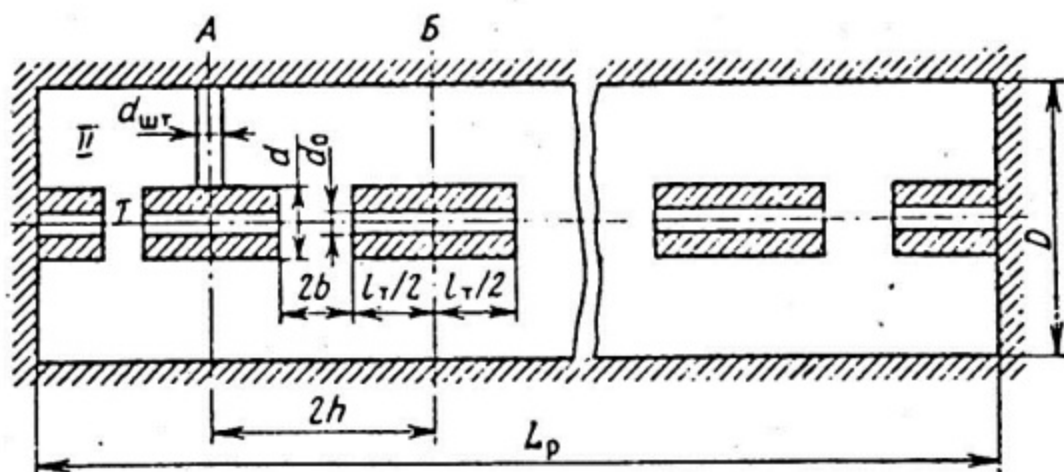


Рис. 2.8. Ускоряющая структура с трубками дрейфа

Обычно дрейфовые трубки в ЛУИ оказывают малое влияние на резонансную частоту всего резонатора и распределение поля в нем, исключая область вблизи оси. Для расчета резонатора его представляют в виде последовательно сильно связанных единичных тороидальных резонаторов (единичных отсеков), настроенных на одинаковую частоту. Эти резонаторы можно выделить из структуры, если представить проводящие плоскости А и Б, проходящие через середины смежных трубок нормально к линиям электрического поля.

Разбивая резонатор на центральную область I между трубками дрейфа и периферийную II, занимающую остальной объем, можно из решения уравнения Максвелла, сшивая поля на границе раздела, получить дисперсионное уравнение.

Дисперсионное уравнение получается для некоторой идеализированной модели ячейки и обычно для окончательного определения размеров резонатора, как и в случае других УС, используются результаты экспериментальных исследований, проводимых на реальных моделях ускоряющей структуры.

2.4.1. Выбор размеров структуры

При проектировании резонатора УС с трубками дрейфа необходимо определить размеры отдельных ячеек: длину ячейки ($2h$), расстояние между трубками дрейфа (2δ), внутренний диаметр трубок дрейфа (d_0), наружный диаметр (d), внутренний диаметр бака резонатора (D), длину резонатора (L_p).

Указанные размеры должны обеспечить равенство частот единичных отсеков по всей длине резонатора, наибольший темп ускорения (в сильноточных ЛУИ выбор темпа ускорения имеет ряд особенностей). При высокой эксплуатационной надежности ЛУИ последнее условие выполнимо, если напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа не будет превышать допустимую величину ВЧ-пробоя. Темп ускорения определяется коэффициентом пролетного времени T , который зависит от коэффициента зазора $\alpha = \frac{\delta}{h}$.

Величина T , характеризующая уменьшение прироста энергии за время пролета зазора 2δ , для равномерного распределения поля в зазоре, определяется формулой:

$$T = \frac{\sin \alpha \pi}{\alpha \pi} \quad (2.13)$$

Первым выбирается коэффициент зазора α , который обеспечивал бы лучшее использование ВЧ-мощности. Из выражения для приращения энергии на единицу длины ускорителя (2.5), а также из выражения для мощности ВЧ-потерь на единицу длины (2.7), получим такое соотношение:

$$\frac{(\Delta W_1)^2}{(Ze)^2 \rho_1} = 2T^2 R_w \cos \varphi_s. \quad (2.14)$$

Отсюда видно, что при выбранной φ_s , наилучшее использование ВЧ-мощности будет при максимальном значении эффективного шунтового сопротивления $Z_{эфф} = 2R_w T^2$. Значение оптимального коэффициента зазора, при котором $Z_{эфф}$ имеет максимальное значение (максимум не резкий) для разных значений диаметра трубки d/λ в зависимости от β_g приведен на рис. 2.9. График построен на основании расчетных и экспериментальных данных и может использоваться для определения $\alpha_{опт}$. Вследствие однозначной связи между размерами ячейки и резонансной длиной волны для структуры, работающей на колебаниях $2\pi(2h = \beta_g \lambda)$, можно получить большое $Z_{эфф}$, либо увеличивая α по мере роста β_g при постоянных D/λ и d/λ , либо уменьшая d/λ с ростом β_g при постоянных D/λ и α . В разных ускорителях решения различные:

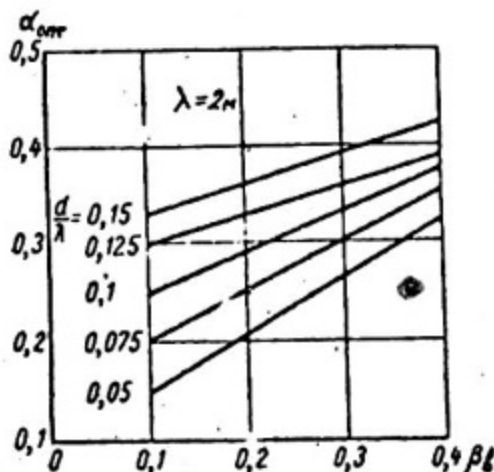


Рис. 2.9. Зависимость оптимального коэффициента зазора $\alpha_{опт}$, при котором $Z_{эфф}$ имеет максимум, от относительной скорости волны

После выбора α , нужно задаться d/λ в одном из концевых отсеков резонатора и рассчитать D при известной для этого конца β_g .

Для расчета можно использовать эмпирическую формулу:

$$\lg \Delta = 0,64 - 1,7\alpha + 2,11 \lg \frac{2d + h}{D}, \quad (2.15)$$

где $\Delta = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda}$ — расстройка частоты цилиндрического тороидального резонатора, вызванная введением дрейфовой трубки; $\lambda, \lambda_0 = 1,307 D$ — длины волн резонатора с трубкой и без трубки дрейфа соответственно. Величина расстроек Δ для разных геометрических размеров изменяется в пределах 5 — 50%.

При расчетах в каждом конкретном случае величина Δ выбирается с учетом данных, накопленных при проектировании резонаторов и приве-

денных в литературе в удобном для инженерных расчетов виде (семейство экспериментальных графиков и таблиц). С учетом этих данных, соотношения между размерами и резонансной длиной волны определены с погрешностью до $\pm 0,1\%$.

После определения D в одном концевом отсеке, определяют d в другом концевом отсеке, считая β_g и D известными. Расчет повторяется до получения такого d , которое обеспечивает лучшее использование ВЧ-мощности и при котором устройства фокусировки размещаются в трубках. Размеры всех других ячеек определяются после нахождения размеров конечных отсеков с учетом увеличения длины ячеек с ростом β_g , при сохранении равенства частоты каждой ячейки резонансной. Изменение размеров с увеличением β_g осуществляется за счет изменения коэффициента зазора α или диаметра трубок дрейфа d . Зависимости $\alpha(\beta_g)$ и $d(\beta_g)$ при длине $2h = \beta_g \lambda$ в пределах одного резонатора, как правило, линейны и часто приводятся в виде таблиц и полуэмпирических формул. Данные позволяют определить размеры с погрешностью по частоте не хуже $\pm 0,1\%$. Если ЛУИ имеет несколько резонаторов, то для получения оптимальных параметров УС диаметры резонаторов в одном ЛУИ выбирают разными.

После определения размеров ячеек выбирается длина одного резонатора L_p . Выбранный темп ускорения ΔW_1 определяет ориентировочно длину ускорителя $L_y = W / \Delta W_1$, где W — среднее приращение энергии частиц в резонаторной части ЛУИ. ЛУИ с энергией порядка 50 МэВ и выше состоят, как правило, из нескольких резонаторов.

Выбор длины одного резонатора определяется следующими соображениями.

Во-первых, обеспечением требуемой из расчета динамики частиц в ЛУИ распределения амплитуды и фазы поля вдоль оси резонатора. Степень равномерности амплитуды и фазы поля вдоль оси определяется отклонениями частот единичных отсеков от среднего значения, наличием потерь ВЧ-мощности, деформациями резонатора и температурной расстройкой. Величина отклонения поля от среднего значения пропорциональна квадрату электрической длины резонатора: $(L_p/\lambda)^2$. Обычно отклонения частот отсеков устраняют при первоначальной настройке резонатора и, следовательно, не играют решающей роли на выбор L_p . Но при работе ускорителя остаются температурные возмущения. Если допустить температурный перепад вдоль резонатора не больше $\pm 1^\circ$ и отклонение амплитуды поля не более $\pm 1\%$, то, исходя из имеющего место соотношения $\frac{\delta E_0}{E_0} \approx \left(\frac{L_p}{\lambda}\right)^2 \frac{\delta f}{f}$, длина медного резонатора L_p ($K = 1,65 \cdot 10^{-5}$ — коэффициент линейного расширения меди) не должна превышать примерно 10λ . В связи с этим для поддержания постоянства амплитуды вдоль его оси предъявляются жесткие требования к системе термостабилизации резонатора (с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$).

Во-вторых, частотным разделением основного и ближайшего к основному видов колебаний, обратно пропорциональным квадрату электрической длины резонатора ($\delta f = \frac{f_{011} - f_{010}}{f_{010}} = \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{L_p} \right)^2$). Если ориентировочно принять, что частотное разделение на два порядка больше полосы пропускания ($1/Q$), то при $Q = 50\,000$ длина резонатора получается примерно равной 8λ .

Наконец, если ЛУИ имеет несколько резонаторов, длина каждого выбирается с учетом конструктивно-технологических возможностей обеспечения оптимальных электродинамических характеристик отдельного резонатора. По этим соображениям длина первого резонатора, где из-за быстрого увеличения скорости частиц геометрии единичных отсеков существенно различны, делается обычно меньше длины последующих.

И еще одно обстоятельство учитывается при выборе длины резонаторов: в резонаторе не должны возбуждаться колебания вида $H_{11\rho}$, где ρ — число полуволн на длине резонатора.

Однако в большинстве случаев решающим фактором при выборе длины резонатора является соображение по осуществлению питания резонатора от одного (реже двух) ВЧ-генератора. Это упрощает построение системы ВЧ-питания и автоматического регулирования параметров ускоряющего поля.

При определенном темпе ускорения, заданных мощности генератора P_r и токе пучка I_n длину резонатора можно выбирать так, чтобы удовлетворялось неравенство

$$P_r N \geq \int_0^{L_p} \left[\frac{\Delta W_1^2}{(Z e \cos \varphi_s)^2 \xi_{эфф}} + \frac{I_n \Delta W_1}{Z e} \right] dx, \quad (2.16)$$

где N — число генераторов, возбуждающих резонатор. Например, при возбуждении резонатора, в котором ускоряются протоны ($Z = 1$) от одного генератора мощностью 3 МВт при $\Delta W_1 = 1,5$ МэВ/м, $\xi_{эфф} = 40$ МОм/м и $I_n = 50$ мА, длина резонатора составит около 10λ (20 м).

В начальной части ускорителя, где скорость частиц мала и быстро меняется, иногда устанавливают относительно короткие резонаторы ($L_p = 5 - 10$ м), чтобы облегчить наладку этой обычно наиболее сложной части ускоряющей системы.

Сделаем замечания о конкретных значениях параметров для современных ЛУИ с ускоряющими структурами с трубками дрейфа при $\lambda = (1,5 - 2)$ м.

Внутренний диаметр трубки дрейфа d_0 определяется размерами пучка от инжектора. Обычно d_0 лежит в пределах 20 — 30 мм для современных сильноточных ЛУИ.

Коэффициент зазора α для резонаторов ЛУП до 10 МэВ ($\beta_\delta=0,144$) обычно делают приблизительно постоянным по длине, равным 0,25 — 0,255. В этой части резонатора наружный диаметр трубки дрейфа изменяется в пределах $d/\lambda=0,12 - 0,05$ при увеличении их длины l_T в соответствии с соотношением $l_T = \beta_\delta (1 - \alpha) \lambda$. Диаметр трубок изменяется при этом примерно от 250 до 100 мм.

В других резонаторах выбирают обычно $d/\lambda = const$ и равной около 0,12, а α изменяется в пределах 0,185 — 0,300. Внешний диаметр резонатора D/λ обычно изменяется в пределах 0,7 — 0,5, составляя 1400 — 1000 мм.

Ускоряющая система с трубками дрейфа имеет в области $\beta_\delta=0,1 - 0,5$ шунтовое сопротивление от 60 до 20 МОм/м. Так, при $\lambda = 1,5$ м, $d/\lambda=0,1$, для $\beta_\delta=0,1$ и $\alpha=0,25$ $Z_{шунт} = 40$ МОм/м, а для $\beta_\delta=0,5$ и $\alpha=0,4$ $Z_{шунт} = 20$ МОм/м. При $\beta_\delta < 0,03$ резко уменьшается коэффициент пролетного времени T .

При увеличении скорости $\beta_\delta > 0,5$, когда длина трубок становится сравнимой с радиусом резонатора, ускоряющая система начинает напоминать коаксиальную линию передачи, и волна E_{01} вырождается в поперечную волну типа T ; силовые линии электрического поля замыкаются на цилиндрические стенки резонатора; за счет обогащения электрического поля поперечной составляющей, его продольная составляющая, определяющая $Z_{эфф}$, падает, поэтому ускорение протонов и ионов в диапазоне скоростей больших $\beta_\delta=0,4 - 0,5$ должно осуществляться в УС другого типа.

2.4.2. Стабилизация характеристик ускоряющих структур

Основными характеристиками любой УС, определяющими выходные параметры пучка, являются распределения амплитуды и фазы ускоряющего поля по длине ЛУИ. Отклонение этих характеристик от расчетных порождается возбуждением нерабочих видов колебаний E_{01n} , имеющих продольные компоненты электрического поля. Влияние нерабочих видов колебаний E_{01n} на процесс ускорения зависит от частного разделения их от основного вида колебаний E_{010} . Величина частотного разделения определяется геометрией резонаторов и точностью их изготовления. Эти же факторы могут приводить к связи между ближайшими по частоте видами колебаний, что также вызывает возмущение в распределении ускоряющего поля по длине УС.

Выдержать с большой точностью расчетные характеристики поля можно, если задать жесткие допуски на геометрические размеры элементов УС и использовать специальные методы стабилизации поля. Величину допусков на размеры, обеспечивающие распределение амплитуды и фазы поля с задан-

ной точностью можно рассчитать методом собственных колебаний или методом эквивалентных схем. Допуски на геометрические размеры отдельных ускоряющих ячеек и резонатор в целом довольно жесткие. Так, допуски на диаметр резонаторов составят десятые доли миллиметра, а допуск на длину — единицы миллиметров при диаметре резонатора 1 — 2 м и длине 10 — 20 м.

Для снижения допусков на геометрические размеры и стабилизации распределения поля основного E_{010} вида колебаний в резонаторах с трубками дрейфа используются резонансные стержни или штанги. Эти стержни перпендикулярны оси резонатора и закреплены на его стенке. Такие структуры с дополнительными поперечными стержнями называют стабилизированными структурами, а методы, основанные на их применении, — методами стабилизации поля. Физическая суть метода состоит в следующем. Резонансный стержень, расположенный, например, в середине цилиндрического резонатора можно представить как четвертьволновый вибратор, собственная частота колебаний которого f_S определяется условием равенства его длины l_S , четверти длины волны этого колебания: $l_S = \frac{\lambda_S}{4}$. На рис. 2.10 показана упрощенно конфигурация полей колебания стержня S и колебания

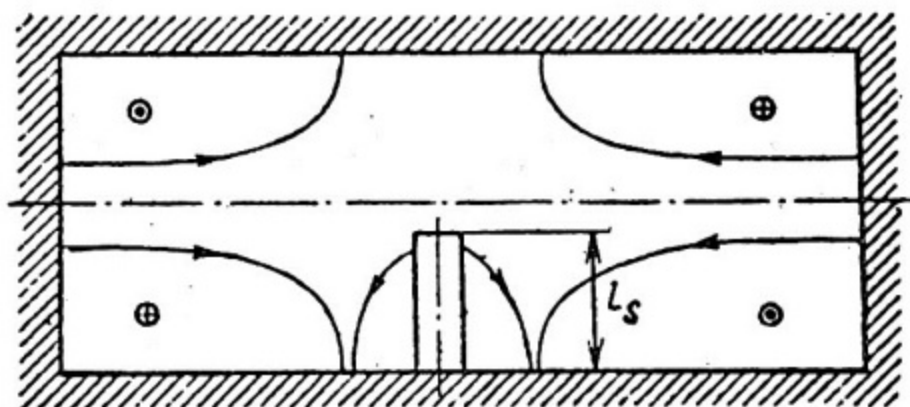


Рис. 2.10. Конфигурация полей в резонаторе с стержнем связи

резонатора E_{011} . Видно, что у колебаний S и E_{011} есть общие составляющие электрического и магнитных полей, что приводит к их взаимодействию и образованию двух гибридных колебаний ES и SE . Поле гибридных колебаний в общем случае содержит поля собственных колебаний резонатора E и H и собственных колебаний стержней S . В частности для случая, показанного на рис. 2.10, поле гибридных колебаний представляет собой сумму полей колебаний E_{011} и S , соотношение между которыми зависит от их частотного разделения. Изменение частот колебаний при увеличении длины стержня l_S показано на рис. 2.11 (настроечная характеристика). Параметром, влияющим на частотное разделение колебаний, является коэффициент

взаимодействия колебаний S и E_{01n} , определяющий степень компенсации влияния колебаний E_{01n} на распределение ускоряющего поля волны E_{010} . Взаимодействия колебания S с рабочим колебанием E_{010} не происходит, хотя у них и имеются общие составляющие полей, ибо направления силовых линий таково, что коэффициент взаимодействия равен нулю. По этой причине частота колебаний E_{010} остается постоянной при изменении l_S .

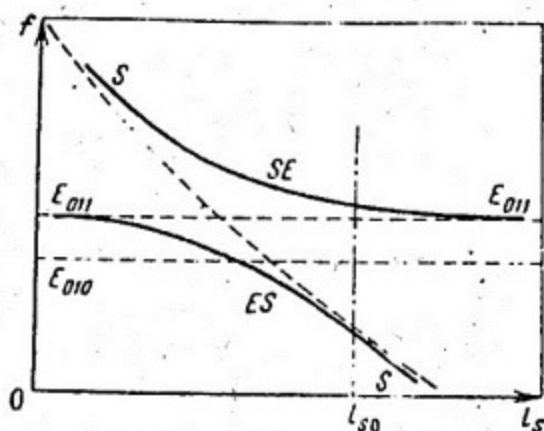


Рис. 2.11. Настроечная характеристика

Максимальное взаимодействие колебаний E_{01n} и S имеет место в том случае, если стержень находится в пучности радиальной составляющей электрического поля колебаний E_{01n} . Как показали экспериментальные исследования, коэффициент взаимодействия зависит и от положения стержня по азимуту: он максимален, когда стержень находится в плоскости штанг держащих трубки дрейфа с противоположной стороны от них. Заметим также, что колебания S взаимодействуют с колебаниями типа H , имеющими такую ориентацию полей, при которых электрическое поле направлено вдоль стержня. При этом коэффициент взаимодействия может быть значительно больше, чем для E -колебаний. Подбирая геометрические размеры стабилизирующих стержней (длину и диаметр), их число и расположение вдоль оси резонатора и по азимуту в поперечной плоскости, можно добиться, что частоты ближайших нерабочих колебаний будут располагаться дальше от частоты колебания E_{010} , чем в резонаторе без стержней, а частоты гибридных колебаний расположатся с разных сторон от рабочей частоты. В этом случае дисперсионная характеристика УС будет иметь наибольшую крутизну вблизи рабочей частоты. Для сравнения УС по стабильности поля пользуются коэффициентом стабилизации $K_{ст}$, который показывает, во сколько раз в стабилизированной структуре наклон поля меньше, чем в нестабилизированной, при одинаковых возмущениях частоты на торцах резонатора.

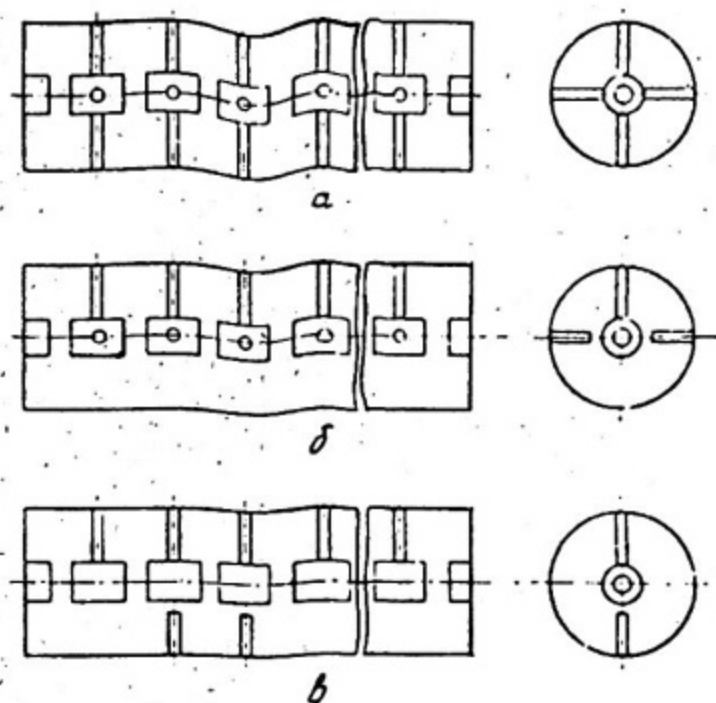


Рис. 2.12. Схемы стабилизированных структур

Схемы стабилизированных УС наиболее крупных ЛУИ приведены на рис. 2.12. Многоштанговая структура (рис. 2.12,а) использовалась в ЛУП на энергии 200 МэВ-инжекторе брукхейвенского протонного синхротрона. При трех-четырёх штангах на каждой трубке дрейфов соответствующим подбором диаметра штанг можно получить очень крутую дисперсионную характеристику с коэффициентом стабилизации, лежащим в диапазоне от 10 до 100.

Структуры со стержнями связи имеют несколько вариантов. В одном из них стержни устанавливаются в плоскости, проходящей через ось резонатора и перпендикулярной штангам трубок дрейфа (рис. 2.12,б). Число стержней равно числу трубок дрейфа, и они расположены поочередно с разных сторон. Такая структура применена в ЛУП на энергию 200 МэВ-инжекторе ускорительного комплекса на энергию 500 ГэВ Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми и начальной части линейного ускорителя LAMPF на энергию 800 МэВ. Дисперсионная характеристика регулируется изменением длины стержня, что удобнее, чем подбор диаметра штанг. В другом варианте, разработанном в Физико-техническом институте АН УССР, стержни устанавливают в плоскости, проходящей через штанги (рис.2.12,в), причем исследования показали, что можно получить высокий коэффициент стабилизации при числе стержней, значительно меньшем числа трубок дрейфа. УС такого типа использована в резонаторах начальной части МEGАН. В резо-

наторе, содержащем 70 трубок дрейфа, 12 стабилизирующих стержней позволяют получить $K_{ст} = 100$.

Заметим в заключение, что стержни позволяют не только стабилизировать, но и создавать нужное распределение поля на отдельных участках. Так, стержень на торцевой стенке, параллельный оси резонатора, сильно влияет на ускоряющую компоненту поля и тем самым позволяет регулировать энергию пучка ЛУИ.

2.5. Бипериодические ускоряющие структуры

С ростом фазовой скорости волны до величин более 0,4 скорости света структура Альвареца становится малоэффективной из-за низкого значения шунтового сопротивления. Если перейти к цепочке связанных резонаторов, период которых $\lambda/2$, т.е. вид колебаний π , то эффективное шунтовое сопротивление возрастет, поскольку вдвое сократится длина ускоряющей ячейки. При этом связь между ячейками может быть как электрической (через пролетные отверстия в центре ускоряющих промежутков), так и магнитной (через щели связи в месте концентрации магнитного поля), однако на π -виде колебаний мала связь между ячейками, особенно в случае электрической связи, в результате чего распределение поля весьма чувствительно к возмущениям. Увеличение коэффициента связи приводит к уменьшению эффективного шунтового сопротивления.

Выходом из такого положения является переход к виду колебаний $\pi/2$ с одновременным уменьшением длины ячейки, в которой отсутствует поле (ячейка связи) или вынесением ее на периферию. В результате приходим к так называемым бипериодическим ускоряющим структурам (БУС). Примеры таких структур представлены на рис. 2.13, а, б, в, г, где а, б соответствует БУС с внешними резонаторами связи, в — с внутренними, г — с шайбами и диафрагмами. Особенностью первых трех структур является то, что ячейки имеют омегаобразную форму, которая получается в результате оптимизации по шунтовому сопротивлению. Применение трубок дрейфа для структур с магнитной связью увеличивает коэффициент пролетного времени и, следовательно, эффективное шунтовое сопротивление. В результате всех принятых мер удается получить эффективное шунтовое сопротивление 70 — 80 МОм/м при коэффициенте связи 0,04 — 0,06. Приятное исключение составляет структура с шайбами и диафрагмами (структура Андреева В.Г.), для которой коэффициент связи достигает 0,52. Такой высокий коэффициент связи обеспечивает высокую стабильность распределения ускоряющего поля и не требует индивидуальной настройки ячеек.

Внешние резонаторы связи для структуры (см. рис. 2.13, а) представляют собой тороидальные резонаторы, возбуждаемые на волне E_{010} . Магнитная связь осуществляется через окно, форма и размеры которого окон-

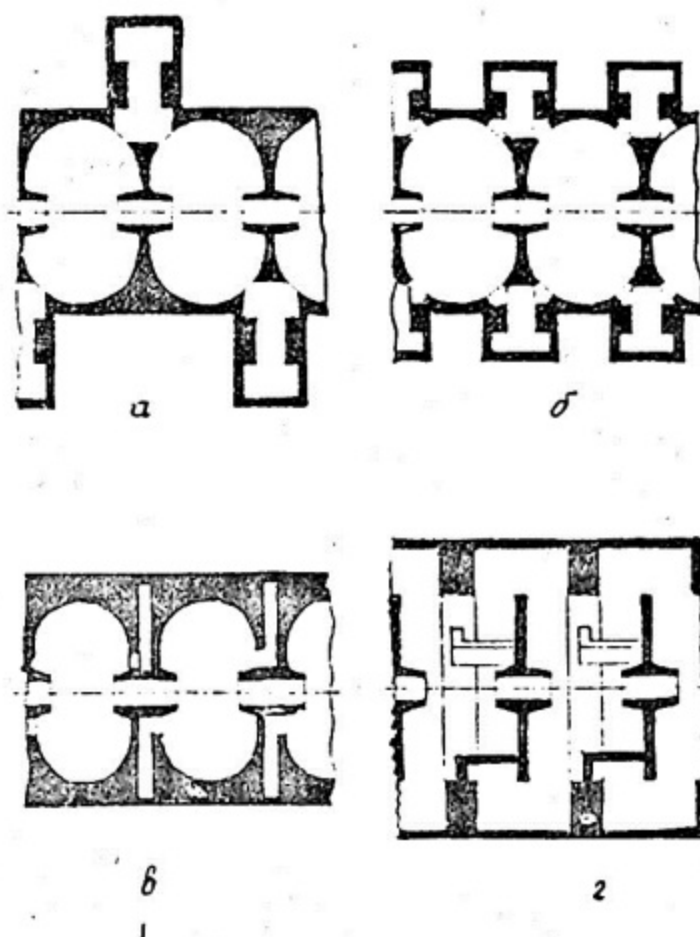


Рис. 2.13. Бипериодические ускоряющие структуры с внешними резонаторами связи (а, б), с внутренними резонаторами связи (в) и с шайбами и диафрагмами (г)

чательно подбираются экспериментальным путем. Известен вариант выполнения резонаторов связи в виде внешнего кольцевого резонатора Н-образного профиля (см. рис. 2.13,б). В местах максимума электрического поля предусмотрены выступы для уменьшения внешнего диаметра резонатора связи. Более простыми в конструктивном выполнении являются структуры с внутренними ячейками связи, где связь с ускоряющими ячейками обеспечивается по магнитному полю. Такие структуры имеют меньший диаметр, что выгодно отличает их от других структур.

В последнее время предметом широкого исследования и применения в ЛУИ на энергию выше 100 — 150 МэВ является структура с шайбами и диафрагмами. В ней нет четких границ между ускоряющими ячейками и ячейками связи, и связь в структуре осуществляется через кольцевые зазоры между шайбами и диафрагмами. Поскольку площадь зазора велика, коэффициент связи весьма значителен и достигает 0,5. В отличие от других БУС,

работающих на колебаниях E_{01n} , в данной структуре рабочими являются колебания вида E_{02n} .

Важным конструктивным элементом структур с шайбами и диафрагмами являются штанги, поддерживающие шайбы и обеспечивающие подвод к ним охлаждающей жидкости. Последнее связано с тем, что более половины потерь ВЧ-мощности приходится на шайбы. Выбор места расположения штанг и их количества влияет на электродинамические характеристики системы, в частности — на смещение рабочей частоты и величину добротности. Причиной этого является возникновение межтиповой связи рабочей $\pi/2$ волны с нерабочими колебаниями, имеющими вариации по азимуту. Известны две разновидности штанг: 1) невозмущающие, горизонтальная часть которых параллельна оси резонатора и находится в узле высокочастотного поля (см. рис. 2.13,г); 2) возмущающие радиальные штанги, которые находятся в области сильного электрического поля рабочего вида колебания. И в этом и в других случаях с целью уменьшения потерь ограничиваются минимальным числом штанг круглого сечения.

Известны два подхода к расчету электродинамических характеристик ускоряющих структур типа цепочки связанных объемных резонаторов: моделирование цепочкой связанных радиотехнических контуров и электродинамическое моделирование. Модель связанных контуров, несмотря на большую наглядность и относительно простой алгоритм, применяется при расчете таких структур весьма редко. Одна из причин этого — ограничение одномодовым представлением поля в резонаторных системах.

В качестве иллюстрации возможностей метода связанных контуров приведем дисперсионное соотношение, полученное этим методом для БУС

$$K_{cb}^2 \cos^2(q\pi/N) = \left(1 - \frac{\omega_y^2}{\omega_q^2} + K_y \cos\left(\frac{2q\pi}{N}\right)\right) \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_q^2} + K_c \cos\left(\frac{2q\pi}{N}\right)\right). \quad (2.17)$$

Здесь ω_y , ω_c — собственные частоты ускоряющих ячеек и ячеек связи; ω_q — собственная частота цепочки резонаторов; K_y , K_c — коэффициенты связи между двумя ближайшими ускоряющими ячейками или ячейками связи; N — число ячеек; q — номер вида колебаний.

На рис. 2.14 представлена дисперсионная характеристика БУС. При соответствующей настройке ускоряющих ячеек и ячеек связи разрыв дисперсионной кривой на виде колебаний $\pi/2$ может быть устранен.

Полную картину электродинамических процессов позволяет получить электродинамическое моделирование. Электродинамические характеристики в этом случае определяются электромагнитным полем свободных колебаний цепочки связанных резонаторов, т.е. при решении системы однородных уравнений Максвелла, удовлетворяющих граничным условиям.

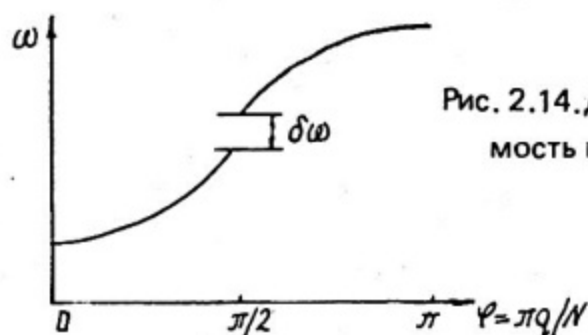


Рис. 2.14. Дисперсионная зависимость ненастроенной БУС

2.6. Высокочастотная фокусировка

Известно, что в отсутствии фокусирующего поля пучок ионов расширяется и причинами такого расширения являются неупорядоченный разброс поперечных тепловых скоростей, электростатическое расталкивание между одноименными заряженными частицами, погрешности изготовления и сборки структур, рассеяние на остаточном газе и дефокусирующее действие высокочастотного поля в зазоре дрейфовых трубок. Для фокусировки частиц в резонансных линейных ускорителях могут быть применены сетчатая и фольговая фокусировка, фокусировка продольным магнитным полем, квадрупольная фокусировка с помощью электромагнитов и постоянных магнитов с высокой удельной магнитной энергией и фокусировка с помощью высокочастотного поля. Последний вид фокусировки получил широкое развитие в последнее время в связи с созданием сильноточных ускорителей при значительном уменьшении энергии инжекции. Именно на высокочастотной фокусировке, включающей фазопеременную фокусировку (ФПФ), высокочастотную квадрупольную фокусировку с пространственно-периодической структурой и пространственно-однородную квадрупольную фокусировку (ПОКФ), мы и остановимся в этом разделе. Такой выбор материала в настоящем пособии по фокусирующим системам для резонансных линейных ускорителей оправдан, поскольку вопросы фокусировки за счет специальной конфигурации высокочастотных полей находятся в тесной связи с вышеизложенными сведениями о ускоряющих высокочастотных структурах.

2.6.1. Фазопеременная фокусировка

Одновременно обеспечить устойчивость продольных и поперечных колебаний частиц можно путем периодического изменения знака равновесной фазы. В результате вдоль ускорителя возникают знакопеременные фоку-

сирующие силы, которые приведут к устойчивым колебаниям по всем степеням связи. Очевидно, для изменения равновесной фазы от значения φ_{1S} до φ_{2S} (знаки φ_{1S} и φ_{2S} разные) следует изменить расстояние между центрами двух смежных зазоров, т.е. необходимо нарушить периодически монотонный закон изменения длин трубок дрейфа. Так, для изменения равновесной фазы от φ_{1S} до φ_{2S} ($\varphi_{1S} < 0$) расстояние между центрами зазоров должно быть $(K + \frac{\varphi_A}{2\pi})\beta g \lambda$, а для возвращения от фазы φ_{2S} к φ_{1S} — расстояние между зазорами уменьшается до $(K - \frac{\varphi_A}{2\pi})\beta g \lambda$. Здесь $\varphi_A = \frac{1}{2}(\varphi_{2S} - \varphi_{1S})$ — полуразмах изменения равновесной фазы, а $K\beta g \lambda$ — расстояние между центрами ускоряющих зазоров в структуре без фазопеременной фокусировки.

Фазопеременная фокусировка в указанном виде, когда меняется лишь знак равновесной фазы, не позволяет получить достаточно протяженную область захвата частиц. Однако этого можно добиться, если ввести асимметрию в продольное строение ускоряюще-фокусирующего периода при сохранении осевой симметрии самих полей. Асимметрию создают либо изменением абсолютного значения равновесной фазы, либо изменением постоянной составляющей равновесной фазы φ_0 ($\varphi_0 = |\varphi_{1S}| + \varphi_A$), либо изменением амплитуды ускоряющего поля. Введение такой асимметрии, наряду с периодическим изменением знака равновесной фазы, создает дополнительную управляемую степень свободы взаимосвязи между фазирующей и фокусирующей компонентами ускоряющего поля.

Структуры с фазопеременной фокусировкой требуют повышенных затрат высокочастотной мощности для обеспечения заданного темпа ускорения, и по этой причине они могут быть использованы лишь в начальной части ускорителя. Действительно, прирост энергии равновесной частицы на одном полупериоде ускорения есть

$$\Delta W_{1S} = \frac{1}{2} S e E_0 T \cos \varphi_{S1} = \frac{1}{2} S e E_0 T \cos (\varphi_0 - \varphi_A),$$

а на другом —

$$\Delta W_{2S} = \frac{1}{2} S e E_0 T \cos \varphi_{S2} = \frac{1}{2} S e E_0 T \cos (\varphi_0 + \varphi_A)$$

(S — период фокусировки, равный $2K\beta g \lambda$).

Среднее значение темпа ускорения

$$\frac{dW_S}{dz} = (\Delta W_{1S} + \Delta W_{2S})/S = e E_0 T \cos \varphi_A \cos \varphi_0. \quad (2.18)$$

Чтобы получить значительный темп ускорения, необходимо выбрать малый размах изменения равновесной фазы φ_A . Однако с уменьшением φ_A значительно понижается частота поперечных колебаний $\mu_{rS} \sim \sin \varphi_A$, что отрицательно сказывается на захвате частиц.

Достоинство применения фазопеременной фокусировки — уменьшение ограничений на радиус апертуры. Можно увеличить радиус закругления у трубок и поднять напряжение в зазорах.

2.6.2. Высокочастотная квадрупольная фокусировка с пространственно-периодической структурой

Если отказаться от аксиальной симметрии высокочастотного поля в зазорах между трубками дрейфа, перейти к так называемым системам с квадрупольными электродами, то можно обеспечить наряду с продольной и поперечную устойчивость движения частиц.

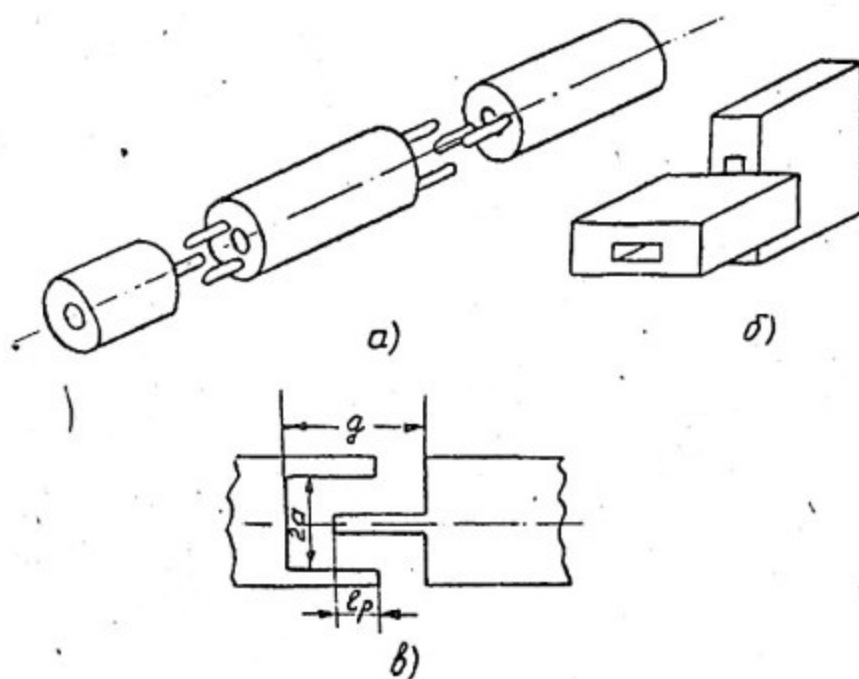


Рис. 2.15. Конфигурации электродов в ускоряющих зазорах пространственно-периодических структур с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (а) и (б) и геометрия "рогатых" электродов (в)

На рис. 2.15,а,б представлены конфигурации электродов в ускоряющих зазорах, потенциалы поля в которых удовлетворяют следующим соотношениям, вытекающим из условий симметрии:

$$U(x, y, z) = U(-x, y, z) = U(x, -y, z), \quad (2.19)$$

так как имеются две плоскости симметрии xOz и yOz ;

$$U(x, y, z) = -U(x, -y, -z), \quad (2.20)$$

так как переход от точки с координатой z к симметричной относительно середины ускоряющего промежутка ($z = 0$) к точке с координатой $-z$ и с одновременным поворотом на 90° в поперечной плоскости меняет лишь знак потенциала.

С учетом сделанных замечаний в отношении симметрии поля и полагая, что продольные колебания устойчивы, можно из уравнений поперечного движения прийти к следующим выводам об устойчивости поперечных колебаний. Оказывается, что высокочастотный зазор с квадрупольной симметрией поля приблизительно эквивалентен магнитной квадрупольной линзе, жесткость которой K связана с параметрами зазора соотношением

$$K^2 \cong \frac{eU}{\beta_g^2 W_0} T_g K_g \cos \psi. \quad (2.21)$$

Основные параметры высокочастотного зазора (коэффициент пролетного времени T_g и коэффициент асимметрии K_g) представляются в виде

$$T_g = \int_g G(z) \cos \frac{2\pi z}{\beta_g \lambda} dz / \int_y G(z) dz; \quad (2.22)$$

$$K_g = \frac{1}{E_g} \int_g G(z) dz. \quad (2.23)$$

где функция $G(z) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} \right]$ обеспечивает квадрупольную фокусировку, W_0 — энергия покоя.

Если аппроксимировать функцию $G(z)$ на длине ℓ_p , соответствующей участку с точной квадрупольной симметрией поля в зазоре, в виде $\frac{V}{\alpha^2}$, то

$$T_g = \frac{\sin(\pi \ell_p / \beta_g \lambda)}{\pi \ell_p / \beta_g \lambda}; \quad (2.24)$$

$$K_g = \frac{g \ell_p}{\alpha^2}. \quad (2.25)$$

В этом приближении часто и проводится анализ устойчивости поперечных колебаний. В частности, можно сделать вывод, что в структуре Альвареса с "рогатыми" электродами при фиксированном темпе ускорения фокусирующее действие растет с увеличением энергии частиц ($U \sim \beta_g E_0$). Желательно, с точки зрения повышения электрической прочности такой структуры,

увеличивать расстояние между "рогами" $2a$ и длину "рогов". Одновременно при увеличении $\frac{L_p}{\beta_{gr} r}$ растет жесткость фокусировки. Однако структуры с длинными зазорами обладают пониженным коэффициентом пролетного времени. Выходом из этого положения является структура с двумя зазорами на каждом периоде ускорения, причем один зазор с квадрупольной симметрией поля, а другой — с аксиальной. В такой структуре можно выбрать фазу, при которой равновесная частица проходит центры фокусирующего и ускоряющего зазоров так, чтобы оптимально сочетать ускорение с высокочастотной квадрупольной фокусировкой.

Ускоряющая структура с двойным зазором на основе структуры Альвареца не является в этом случае оптимальной с точки зрения темпа ускорения при заданном среднем поле на оси. Переход от волны "0" к волне " π " позволяет расставить ускоряющие зазоры вдвое чаще и одновременно уменьшить период фокусировки. Удачным вариантом реализации такой структуры является Н-резонатор, длинный цилиндр которого разрезан по образующей, и к краям разреза попеременно подключены трубки дрейфа. Поскольку напряжение на зазорах сохраняется постоянным независимо от скорости частиц, то повышается электрическая прочность зазоров. В то же время из-за постоянства напряжения на зазорах темп ускорения будет падать с ростом скорости частиц. По этой причине такие структуры на волне " π " считаются эффективными для частиц с $\beta_{gr} \leq 0,3$.

На рис. 2.16 представлен вариант конструкции структуры с двумя зазорами на периоде ускорения. В одной половине зазора есть "рога", а в другой аксиально-симметричной половине зазора промежуточный электрод имеет кольцо, которое частично экранирует основной электрод. Зазор между кольцами и втулкой основного электрода выбран равным радиусу апертуры из условия равной электрической прочности.

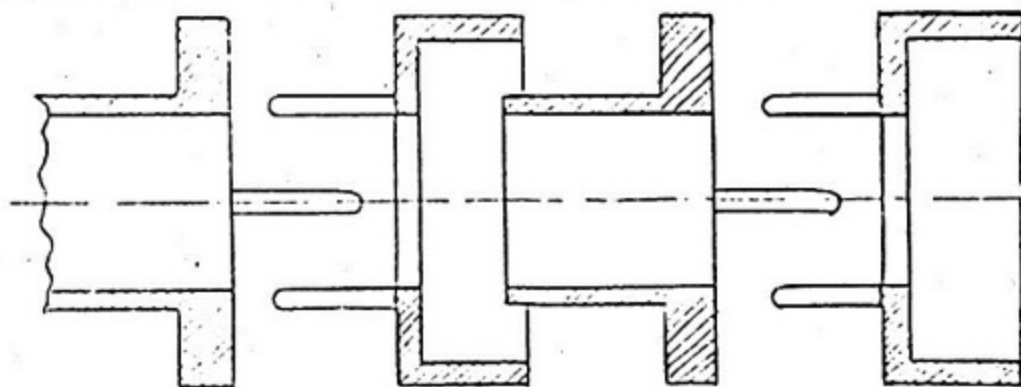


Рис. 2.16. Структура с двумя зазорами на период ускорения

Итак, Н-резонатор с "рогатыми" электродами имеет при малых габаритах высокую пропускную способность, технологически прост и не требует питания фокусирующих устройств.

26.3. Пространственно-однородная квадрупольная фокусировка

Можно создать систему квадрупольных фокусирующих электродов в однородной вдоль оси ускорителя структуре в виде четырехпроводной линии, если использовать переменное во времени напряжение (рис. 2.17 а). Частицы, движущиеся вдоль оси структуры, последовательно испытывают действие поперечных полей с чередующимися знаками градиента. Это приводит к появлению эффекта квадрупольной фокусировки. Однако ускорения в такой системе нет. Чтобы возникла продольная компонента электрического

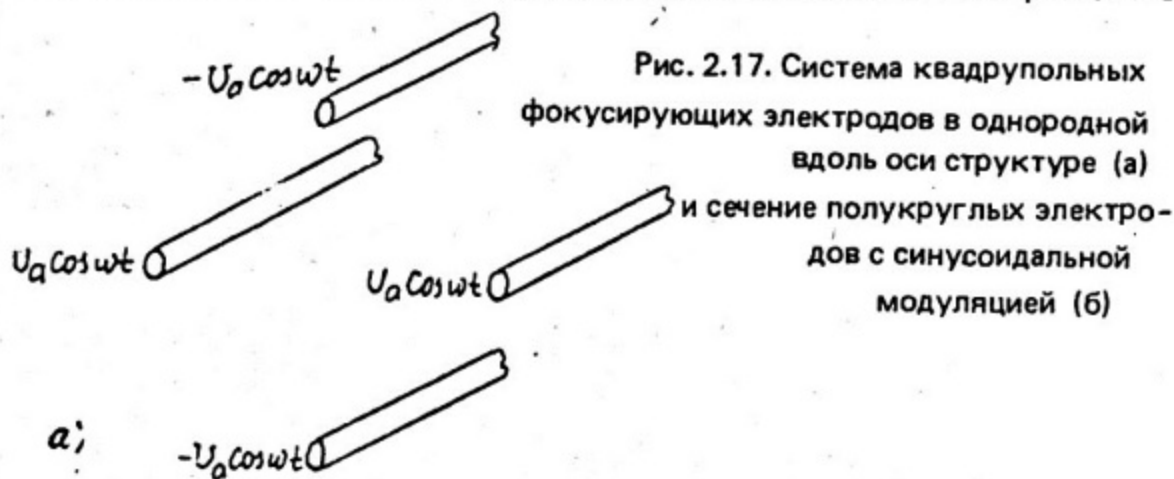
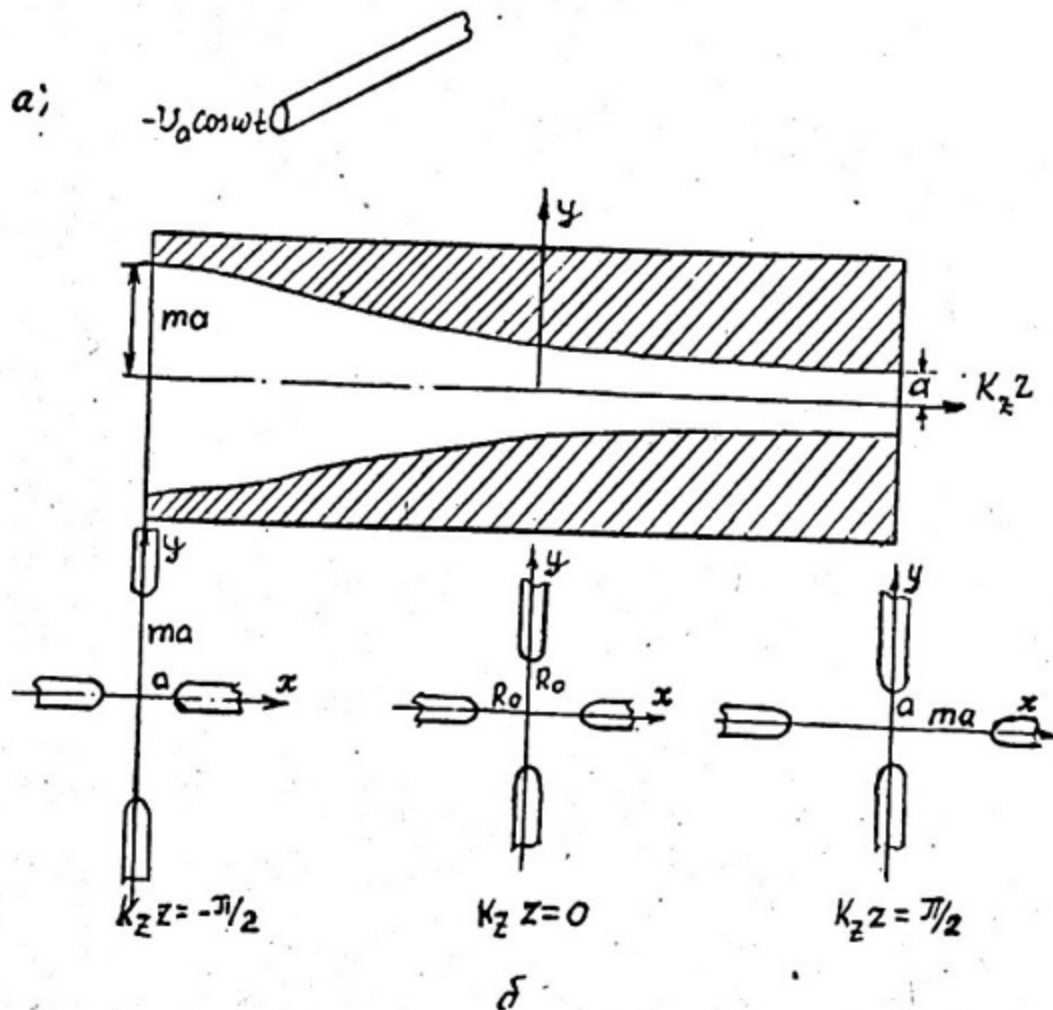


Рис. 2.17. Система квадрупольных фокусирующих электродов в однородной вдоль оси структуре (а)

и сечение полукруглых электродов с синусоидальной модуляцией (б)



поля, необходимо периодически вдоль оси изменять расстояние между противоположными электродами одной полярности. Пространственный период изменения расстояния между электродами должен равняться пути, который пролетает равновесная частица за период высокочастотных колебаний. Очевидно, в перпендикулярных плоскостях должен быть сдвиг по фазе на полпериода.

На рис. 2.17,б представлено сечение полукруглых электродов с синусоидальной модуляцией. Через промежутки длиной $\frac{B_0 R}{2}$ располагаются сечения, где расстояние от оси до электродов одинаково: α — минимальное расстояние от оси до электрода, m — глубина модуляции, равная отношению максимального расстояния к минимальному, R_0 — расстояние до электродов в сечении с точной квадрупольной симметрией.

В квазистационарном приближении потенциал электрического поля в приосевой области имеет вид

$$U(z, \varphi, z, t) = U_0(z, \varphi, z) \cos \omega t, \quad (2.26)$$

где
$$U_0(z, \varphi, z) = -U_\alpha [F_0(z, \varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(z, \varphi) \sin(2n-1)K_z \cdot z] \quad (2.27)$$

Функция $F_0(z, \varphi)$ задает распределение потенциала в сечениях, где поле имеет точную квадрупольную симметрию ($K_z \cdot z = \ell\pi$, $\ell = 0, 1, 2, \dots$), а $F_n(z, \varphi)$ — коэффициенты при гармониках пространственной модуляции расстояний между электродами, причем $F_1(z, \varphi)$ описывает аксиально симметричную составляющую потенциала и в дальнейшем ее только и будем учитывать.

Энергия, которую приобретают частицы на участке длиной $\frac{B_0 R}{2}$ (волна π -типа), есть

$$\Delta W = \frac{1}{2} \pi e U_\alpha F_1(z, \varphi) \cos \varphi = e U_L T \cos \varphi. \quad (2.28)$$

Здесь φ — фаза поля в момент времени, когда частица проходит сечение с точной квадрупольной симметрией; $U_L = 2U_\alpha$ — амплитудное значение напряжения между смежными электродами; $T = \frac{\pi}{4} F_1(\alpha, \varphi)$ — аналогично коэффициенту пролетного времени для частиц, движущихся по оси.

Учитывая факт, что полупериод пространственной модуляции электродов много короче длины волны, можно в рамках квазистационарного приближения потенциала получить следующее выражение поперечных колебаний

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{e U_L}{2 m_0} \left[\frac{\partial F_0}{\partial x} \cos \omega t - \frac{1}{2} \frac{\partial F_1}{\partial x} \sin \varphi \right]. \quad (2.29)$$

Таким образом, ускорение и дефокусировка зависят от $F_1(z, \varphi)$, и фокусировка — от $F_0(z, \varphi)$. Эти функции в рамках сделанных предположений можно записать в виде

$$F_1(\tau, \psi) = \left(\frac{4T}{\pi}\right) I_0(K_Z \cdot \tau); \quad (2.30)$$

$$F_0(\tau, \psi) = \varkappa \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^2 \cos 2\psi, \quad (2.31)$$

где \varkappa зависит от глубины модуляции электродов m .

Точный расчет T и \varkappa проводится численными методами для электродов конкретной формы. Приближенные значения этих величин получаются, если подставить в выражение потенциала U_0 указанные выражения F_0 и F_1 и записать уравнения для поверхности электродов в виде ($U_0 = U_a$ на поверхности электродов):

$$\tau^2 \cos 2\psi = \left(\frac{\alpha^2}{\varkappa}\right) \left[\pm 1 - \left(\frac{4T}{\pi}\right) I_0(K_Z \cdot \tau) \sin K_Z \cdot Z \right]. \quad (2.32)$$

Полагая, что $\tau = \alpha$, $\psi = 0$, $Z = \frac{\pi}{2H}$; $\tau = m\alpha$, $\psi = 0$, $Z = \frac{3\pi}{2H}$, получим

$$T = \frac{\pi}{4} \frac{(m^2 - 1)}{m^2 I_0(K\alpha) + I_0(mK\alpha)} \quad (2.33)$$

$$\varkappa = 1 - \frac{4T}{\pi} I_0(K\alpha). \quad (2.34)$$

Очевидно, в однородной линии $m=1$, $T=0$, $\varkappa=1$, т.е. эффект ускорения отсутствует, а эффект фокусировки максимален. С ростом m растет эффективность ускорения, но падает эффективность фокусировки.

Расстояние от оси до электродов меняется в соответствии с выражениями

$$x = R_0 \left[1 + \frac{m-1}{m+1} \sin K_Z \cdot Z \right]; \quad (2.35)$$

$$y = R_0 \left[1 - \frac{m-1}{m+1} \sin K_Z \cdot Z \right]$$

причем $R_0 = R_z$

Апертура канала, определяющая его пропускную способность, $\alpha = \frac{2R_0}{m+1}$.

Жесткость фокусировки можно увеличивать постепенным уменьшением среднего расстояния от электродов до оси. Это особенно важно на начальном участке для согласования пучка по поперечным координатам.

Поскольку полупериод модуляции электродов, равный периоду ускорения $\frac{v_g \lambda}{2}$, можно конструктивно выбрать весьма коротким, то система с ПОКФ позволяет ускорять частицы при малых напряжениях инжекции (70 — 100 кВ). Другим достоинством ПОКФ является значительный захват частиц в процессе ускорения (почти 100%), что связано с независимостью жесткости фокусировки от фазы частицы относительно высокочастотного поля. Можно в начале ускорителя выбрать равновесную фазу, близкой к -90° . Сгустки следуют почти вплотную друг к другу и средний ток захваченных частиц близок к пиковому значению.

В то же время следует отметить, что с ростом энергии снижается предельный ток из-за продольного расталкивания, снижается и темп ускорения

$$\frac{dW_s}{dz} = \left(\frac{dW_s}{dz} \right)_{z=0} \cdot \left(\frac{W_s}{W_H} \right)^{-1/2} \quad (2.36)$$

Длина секции, в которой частицы ускоряются от начальной энергии W_H до W_H' , есть

$$l = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\lambda W_0}{\Delta W_s} \left[\left(\frac{W_H'}{W_0} \right)^{3/2} - \left(\frac{W_H}{W_0} \right)^{3/2} \right], \quad (2.37)$$

где ΔW_s — прирост энергии равновесной частицы на периоде ускорения.

Система с ПОКФ может быть рекомендована при создании сильноточных ускорителей ионов до энергии 2 — 3 МэВ/нуклон.

Важной задачей при конструировании ускорителей с ПОКФ является выбор профиля сечения электродов, обеспечивающих необходимое распределение ускоряюще-фокусирующего поля в сочетании с приемлемой технологией изготовления. Наряду с электродами плоской формы со скруглен-

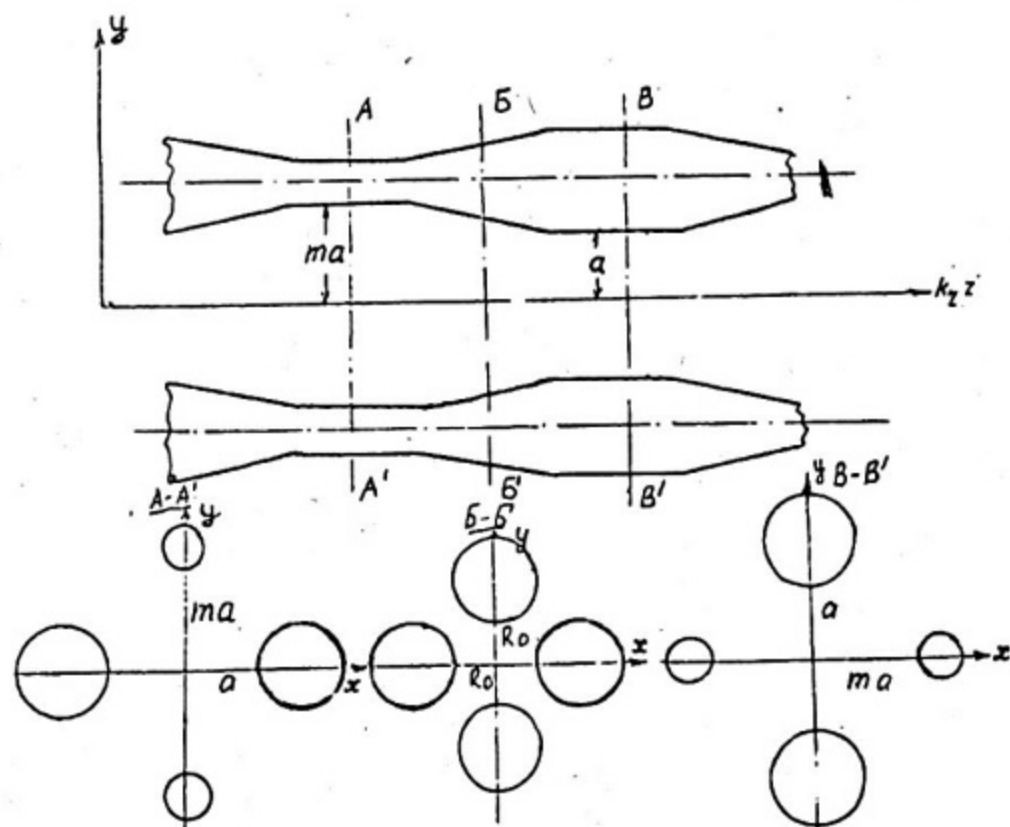


Рис. 2.18. Сечения электродов конической формы

ными кромками, изображенными на рис. 2.17,б, применяются электроды круглого сечения с изменяющейся толщиной вдоль оси ускорителя и электроды конической формы. Электроды плоской формы изготавливаются на стенках с программированным управлением и с двумя шпинделями. По этому принципу изготовлены электроды для импульсного протонного прототипа сильноточного ускорителя (ИТЭФ) на частоте 148,5 МГц. Электроды круглого сечения просты в изготовлении на токарном станке с высокой точностью, их легко свинчивать и спаивать. Они были использованы для начальной части инжектора ускорителя ИФВЭ. Электроды конической формы (рис. 2.18) имеют преимущество перед электродами круглого сечения при переходе к более высокой рабочей частоте, поскольку в этом случае проще обеспечить их механическую устойчивость в процессе обработки без увеличения сечения. (Лос-Аламос, США – на 425 МГц).

Электроды указанных форм устанавливаются в объемных резонаторах, изображенных на рис. 2.6. Эти резонаторы возбуждаются на Н-волнах.

3. СИСТЕМА ВЧ-ПИТАНИЯ ЛУИ

3.1. Требования к разработке системы

При создании ЛУИ разработка системы ВЧ-питания составляет одну из важнейших задач. Система ВЧ-питания предназначена для возбуждения в резонаторах ЛУИ сильных ускоряющих, а в последнее время и фокусирующих полей, и поддержания их амплитуд и фаз с высокой точностью. В систему ВЧ-питания входят следующие устройства: высокочастотный задающий генератор, несколько каскадов предварительного усиления и оконечные усилители мощности; фидерные устройства передачи электромагнитной энергии и устройства ввода мощности в резонаторы ЛУИ; устройства автоматики и дистанционного управления генератором с соответствующей измерительной аппаратурой для контроля амплитуды и фазы поля; импульсные модуляторы для питания анодных и сеточных цепей ВЧ-генератора и каскадов усиления. Самостоятельной системой, тесно связанной с системой ВЧ-питания, является система автоматического регулирования, стабилизирующая амплитуды и фазы ускоряющих полей и их частоту, что существенно улучшает выходные параметры ускоренного пучка.

Технические условия на разработку системы ВЧ-питания и ее подсистем формируются после расчета ЛУИ с учетом требований, предъявляемых к параметрам пучка и их стабильности.

В целом система ВЧ-питания должна удовлетворять следующим требованиям.

Импульсная мощность ВЧ-генераторов выбирается из расчета обеспечения необходимого значения амплитуды ускоренного поля. (сред-

нее по длине значение амплитуды поля должно быть на уровне мегавольт на метр), расхода мощности на ускорение пучка и компенсации потерь мощности на внутренних поверхностях резонаторов ЛУИ. Величина импульсной мощности, вводимой в каждый резонатор, составляет единицы мегаватт. Величина средней ВЧ-мощности зависит от скважности и в проектах ЛУИ непрерывного действия с большим ускоренным током может достигать десятки мегаватт.

Динамический диапазон регулирования мощности в импульсных ЛУИ должен обеспечить ее удвоение или утроение при включении пучка. Полоса перестройки частоты генераторов должна быть при этом от нескольких сот килогерц до единиц мегагерц.

Требования к стабильности амплитуд и фаз полей в резонаторах ЛУИ (мощностная и частотная стабильность системы ВЧ-питания) определяются допустимой потерей частиц при ускорении из-за нарушения условий продольной устойчивости. Если ЛУИ состоит из цепочки однозазорных резонаторов, то требования к стабильности амплитуд и фаз "мягкие", вследствие того, что статистические отклонения амплитуд и фаз в отдельных резонаторах компенсируют друг друга и частицы не выходят за пределы сепаратрисы (в предположении малости ускоряющего действия поля одного зазора).

Более жесткие требования к стабильности указанных величин предъявляют ЛУИ, состоящие из нескольких резонаторов, каждый из которых имеет много ускоряющих зазоров (резонатор — "длинный", если, ускоряясь, частицы совершают в нем более периода фазовых колебаний). Так, к примеру, для ЛУИ, состоящего из трех таких резонаторов, задавшись величиной потерь тока в 20%, можно из анализа области продольной устойчивости ЛУИ рассчитать допуски на стабильность амплитуды и фазы полей в резонаторах. Для равновесной фазы $\varphi_r = 30^\circ$ они составляют $\pm 1\%$ и $\pm 4^\circ$ по амплитуде и фазе соответственно. При больших уровнях мощности это достаточно жесткие требования к стабильности параметров системы ВЧ-питания. Дополнительно требования к стабильности частоты определяются также из условий обеспечения устойчивой работы генератора на узкополосную резонансную нагрузку. Этой нагрузкой является резонатор ЛУИ с высокой добротностью, равной десяткам тысяч. Для обеспечения устойчивости колебаний на рабочей частоте необходимо, чтобы максимальные отклонения частоты были меньше частотного разделения рабочего и нерабочих видов колебаний, которое для длины цилиндрических резонаторов лежит в пределах десятых и сотых долей процента от рабочей частоты.

В итоге, общая относительная стабильность частоты для систем ВЧ-питания ЛУИ оценивается величинами порядка $10^{-5} - 10^{-6}$, а относительная стабильность мощности — порядка единиц процентов при выходных уровнях мощности 2 — 5 МВт.

Требования к разработке выходных каналов усиления, фидерной

системе и устройству ввода в ЛУИ ВЧ-мощности также имеют свои особенности. Из-за высокой добротности резонаторов эти системы должны проектироваться с учетом двух-трех кратных перенапряжений, которые возникают при переходных процессах, а также при пробоях в ВЧ-тракте и резонаторах.

Кроме того, дополнительные требования налагаются на разработку фидерной системы. Изменение электрической длины фидерной системы, вследствие ряда причин и при ее большой протяженности, приводит к заметному возмущению в уравнении баланса фаз и, следовательно, служит дестабилизирующим фактором, влияющим на частотную стабильность системы ВЧ-питания. Для компенсации величины дестабилизирующего фактора прибегают к термостатированию фидерной системы и к использованию в системе фазостабильных кабелей. Выбор генераторных ламп и разработка системы их электропитания также проводится с учетом влияния дестабилизирующих факторов на амплитудно-частотные характеристики колебаний. Обычно требуется, чтобы нестабильность питающих напряжений анодно-сеточных цепей не превышала долей процента от номинальных значений.

Длительность ВЧ-импульса генератора ЛУИ составляет обычно 100 — 300 мкс. Она складывается из времени установления колебаний в резонаторе и длительности импульса тока. Время установления колебаний в 2 — 3 раза превышает длительность токового импульса, также из-за высокой добротности резонатора ЛУИ. При выборе схемы ВЧ-питания и разработке ее систем необходимо предусмотреть устройства для подавления низковольтного вторично-электронного резонансного ВЧ-разряда (мультипакторный эффект). Мультипакторный эффект в ЛУИ может возникнуть при медленном нарастании ВЧ-поля в резонаторах ЛУИ, связанных с высокой добротностью резонаторов ЛУИ.

И, наконец, важнейшим требованием разработки системы ВЧ-питания является обеспечение большого КПД и высокой надежности отдельных узлов и системы в целом, так как выход из строя одного канала и резонатора ЛУИ нарушает работу всего комплекса, ухудшая его эксплуатационные характеристики. Для наилучшей реализации отмеченных требований применяют различные схемы генерации ВЧ-колебаний. Как известно из курса радиотехники, генераторы синусоидальных колебаний делятся на генераторы с независимым возбуждением и автогенераторы. На генераторы с независимым возбуждением подаются колебания извне, как правило, от высокостабильных маломощных задающих генераторов. Таким образом, эти генераторы являются по существу усилителями, состоящими из предварительных и окончательных каскадов усиления мощности. Число каскадов и коэффициент усиления их выбирают так, чтобы обеспечить необходимый для надежной работы ЛУИ уровень ВЧ-мощности.

В автогенераторах могут существовать незатухающие колебания при отсутствии воздействия на них колебаний извне. Иногда автогенераторы называют автоколебательными системами (АС) или генераторами с самовозбуждением. В большинстве современных ЛУИ применяются генераторы с независимым возбуждением.

3.2. Система ВЧ-питания с независимым возбуждением

Эта система применяется в ЛУИ, состоящем из двух и больше резонаторов. Для правильного построения такой системы ВЧ-питания, при известных требованиях к стабильности фаз и амплитуд полей в резонаторах ЛУИ, необходимо знать причины, которые приводят к возмущению этих параметров. Основными из них являются: изменение собственной частоты резонатора ускорителя, обусловленное температурными и другими изменениями; возмущение амплитуды и фазы в ВЧ-генераторах и передающих линиях из-за нестабильности питающих напряжений генераторов, температурных изменений, механических деформаций элементов генераторов и передающих линий; изменение тока ускоряемых частиц в случае ускорителя, сильно нагруженного этим током, а также изменение паразитной нагрузки резонаторов вторичными частицами.

Изменение тока вызывает возмущение амплитуды и фазы поля в резонаторе, а следовательно, и его входного сопротивления со стороны питающего ВЧ-генератора, что, в свою очередь, изменяет режим работы последнего. Это приводит к изменению тока пучка, и резонатор, нагруженный большим током, становится сильно связанным с ВЧ-генератором. Разбор этих сложных, самосогласованных процессов выходит за рамки пособия. Поэтому рассмотрим первые два фактора. Сделаем оценки фазового смещения от температурного возмущения. Если корпус резонатора и трубки дрейфа выполнены из одного материала и температурные изменения Δt° их одинаковы, то изменение собственной частоты равно $\Delta f/f = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = -k \Delta t^{\circ}$, где k — коэффициент линейного расширения материала. Расстройка резонатора $\Delta f/f$ вызывает изменение фазы поля в нем $\Delta \psi$ равные:

$$\Delta \psi = \arctg(2 \cdot \Delta f/f \cdot Q) = \arctg(-2k \cdot Q \cdot \Delta t^{\circ}).$$

Оценка, сделанная по этой формуле для медного резонатора с добротностью $Q = 50\,000$, показывает, что изменение температуры на один градус вызывает смещение фазы, равное 58° , что превышает допустимое на порядок. При этом сильно изменяется и амплитуда поля. Этот возмущающий фактор является наиболее сильным. Смещение фазы в передающей линии короткой длины из-за температурных изменений мало. Если длину линии

выразить как $\ell = n\lambda$, то для $n = 5, \Delta t = 30^\circ, K = 1,6 \cdot 10^{-5}$ смещение фазы $\Delta\varphi = n \cdot K \Delta t \cdot 360^\circ \approx 1^\circ$.

О действии второго фактора. Нестабильность питающих напряжений мощных усилителей вызывает обычно изменение комплексного входного сопротивления лампы и, следовательно, возмущение фазы в уравнении баланса фаз. К примеру быстрые изменения анодного напряжения на 20% вызывают в двух каскадах усилителя с входной импульсной мощностью 500 кВт смещение фазы, не превышающее $4 - 7^\circ$. При жестком монтаже элементов каскадов усилителя быстрые, случайные отклонения фазы, обусловленные механическими деформациями, также малы и не превышают $1 - 3^\circ$.

Таким образом, при стабильности питающих напряжений, обеспечение которой не вызывает технических затруднений, быстрые возмущения фазы в каскадах мощного усилителя лежат в допустимых пределах. Это обстоятельство позволяет компоновать структурную схему ВЧ-питания с разветвлением ВЧ-тракта по каналам питания отдельных резонаторов не на низком уровне мощности, на котором удобно осуществить быстродействующее электронное управление фазами полей в резонаторах, а на высоком уровне мощности, что упрощает систему ВЧ-питания. Кроме того, уменьшение числа каскадов в канале от точки разветвления до резонатора уменьшает возможные возмущения фазы в нем. Структурные схемы с таким построением системы ВЧ-питания использованы в большинстве современных много-резонаторных ЛУИ. В качестве примера на рис. 3.1 приведена структурная схема системы ВЧ-питания с независимым возбуждением ЛУП И-100 — инжектора к серпуховскому синхротрону ИФВЭ на 70 ГэВ.

Ускоритель И-100 состоит из трех резонаторов $P_1 - P_3$. Возбуждение на каждую пару оконечных усилителей $У$ подается от общего предварительного усилителя ПУ. В цепи возбуждения одного из оконечных усилителей каждой пары есть фазорегулятор, обеспечивающий оптимальные условия совместной работы двух оконечных усилителей и эксплуатационную надежность схемы сложения мощностей непосредственно в резонаторах И-100. Предварительные усилители возбуждаются от общего возбудителя В — с задающим генератором ЗГ стабильной частоты ($\Delta f/f = 10^{-6} - 10^{-7}$). Два фазорегулятора на входе ПУ обеспечивают установку и подстройку разности фаз между резонаторами. Фаза резонатора P_2 принимается за опорную. Оконечные и предварительные усилители мощности получают электропитание от однотипных импульсных модуляторов. В оконечных и предо-конечных усилителях, а также в выходном каскаде возбудителя использованы лампы типа ГИ-27АИ. Оконечные усилители расположены над резонаторами, в специальных гнездах с диэлектрическими герметизирующими диафрагмами. Мощность генераторов при ускорении пучка увеличивается за счет

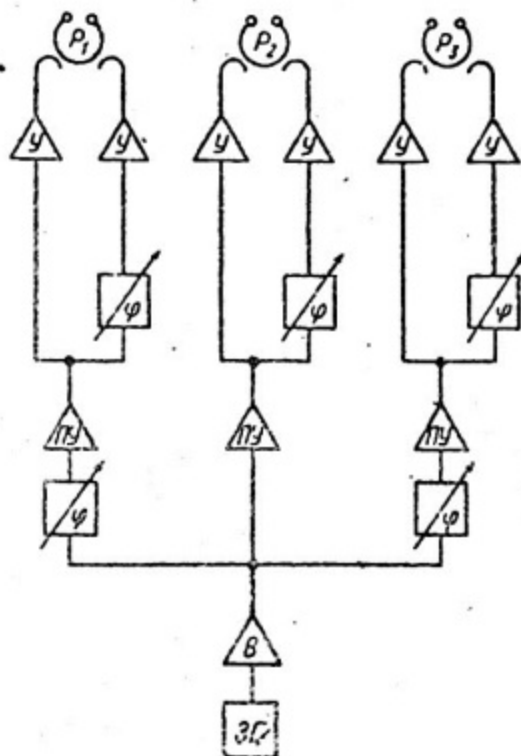


Рис. 3.1. Структурная схема системы ВЧ-питания с независимым возбуждением

двухступенчатой формы импульса анодного напряжения. Для обеспечения требуемой стабильности амплитуды и фазы поля в схемах ВЧ-питания с независимым возбуждением используют систему автоматического регулирования. В современных САР широко используется микропроцессорная техника и ЭВМ, где в качестве возмущающего воздействия управляющего САР служит сигнал отклонения амплитуды тока пучка от опорного уровня.

Системы ВЧ-питания с независимым возбуждением широко применяются в современных ЛУИ на большие энергии (мезонные фабрики LAMPF и МЕГАН). Отметим, что в таких ЛУИ, где много резонаторов, для повышения надежности и КПД ускорителя применяют генераторы повышенной мощности, сокращая их число до одного на резонатор:

3.3. Автоколебательная система ВЧ-питания

Эта система обычно применяется для ВЧ-питания однорезонаторных ЛУИ. Структурная схема автоколебательной системы АС ВЧ-питания с поло-

жительной обратной связью (α), а также с отрицательной обратной связью и усилителем ограничителем (УО) в цепи положительной связи (б) показана на рис.3.2. Усилитель мощности УМ, резонатор Р и четырехполюсник обратной связи с фазовращателем Ψ образуют автоколебательную (АС), которая позволяет генерировать ускоряющие поля на рабочем виде колебаний резонатора. Возможны два варианта построения схемы АС ВЧ-питания. В первой схеме используют генератор, самовозбуждающийся через резонатор ЛУИ и входящий при этом в цепь самовозбуждения как элемент с большой фиксирующей способностью: $-\omega \frac{\partial \varphi_p}{\partial \omega} \approx 2Q \cos^2 \varphi_p$, где φ_p — фазовый сдвиг в резонаторе, который представляют эквивалентным колебательным контуром. При сфазированной обратной связи АС работает на резонансе и нагрузка генератора активна. В такой схеме не возбуждаются паразитные колебания, и устанавливается частота рабочего вида колебаний резонатора, определяемая так же уравнением баланса фаз:

$$\varphi_H(\omega) + \varphi_S(\omega) + \varphi_P(\omega) = 2\pi n,$$

где $\varphi_H(\omega)$, $\varphi_S(\omega)$, $\varphi_P(\omega)$ — фазовые сдвиги при обходе контура, состоящего из цепи обратной связи, ламп усилителя мощности и резонатора. При этом частота автоколебаний $\omega \approx \omega_0$ (ω_0 — собственная частота резонатора). Возмущения, вносимые АС вследствие комплексного характера крутизны лампы φ_S и коэффициента обратной связи φ_H невелики, так как

$$\frac{\partial \varphi_p}{\partial \omega} \gg \frac{\partial \varphi_S}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_H}{\partial \omega}.$$

Стабилизация ω — достигается системой термостатированного охлаждения резонатора. Стабилизация режима генератора осуществляется стабильным электропитанием. Дрейф ω резонатора ЛУИ с добротностью порядка $Q \approx 5 \cdot 10^4$ определяется расстройкой импеданса резонатора по фазе порядка $\Delta \varphi \approx 10^\circ$, а нестабильность частоты автоколебаний при этом равна $\Delta \omega / \omega \approx \approx |\Delta \varphi_p / 2Q| \approx 2 \cdot 10^{-6}$.

В другом варианте схемы, когда автогенератор работает на резонатор ЛУИ через передающую линию, возникают паразитные колебания, которые нужно устранять, ибо при этих колебаниях энергия сосредотачивается в контуре генератора и передающей линии, а не в резонаторе ЛУИ. В этом варианте схемы ВЧ-питания для устранения "паразитных" колебаний в передающую линию включается гасящее сопротивление, которое в некоторой области частот вблизи основного вида колебаний делает систему одночастотной. Недостатком этого способа подавления "паразитных" видов колебаний является снижение высокочастотного КПД системы за счет того, что в гасящем сопротивлении поглощается часть ВЧ-мощности.

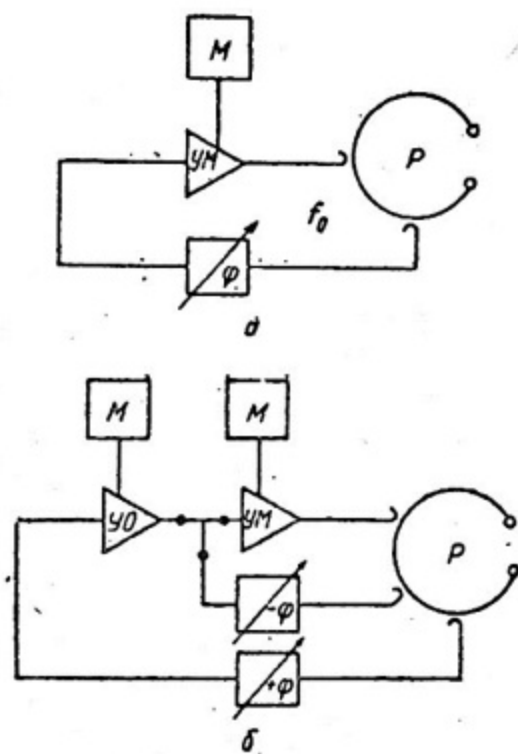


Рис. 3.2. Структурная схема автоколебательной системы ВЧ-питания

Другой способ подавления "паразитных" видов колебаний заключается в предварительном возбуждении резонатора на собственной частоте от вспомогательного генератора, работающего при низком уровне мощности. Такой генератор начинает работать раньше основных автогенераторов, которые в этом случае уже не имеют гасящих сопротивлений и захватываются на частоте уже возбужденных колебаний основного вида, увеличивая их уровень мощности до номинальной. Этот способ позволяет сократить число генераторов за счет устранения потерь в гасящих сопротивлениях.

Во всех случаях для борьбы с автоколебаниями на нерабочих видах цепь обратной связи подключают к резонатору в том месте, где уровень поля на рабочей частоте значительно больше такового на нерабочих видах колебаний.

Основные достоинства автоколебательной системы питания состоят в следующем: для включения генераторов не требуется предварительная точная настройка резонаторов, что упрощает систему АРУ и сокращает время ввода ЛУИ в рабочий режим; легче преодолевается область вторично-электронных разрядов за счет уменьшения времени установления стационарного

режима генерации; возможно применение упрощенной системы АРА, для чего можно использовать в цепи положительной обратной связи усилителя-ограничителя, а цепь отрицательной обратной связи из резонатора подать на вход мощного усилителя (см. рис. 3.2.б).

АС ВЧ-питания использовалась в ЛУИ с энергией 32 МэВ в Беркли в протонном ускорителе-инжекторе ЛУ-20, синхрофазотрона в Дубне на энергию 10 ГэВ, а также в ионных ускорителях "Марк-1" и др. Классической схемой ВЧ-питания однорезонаторного ЛУИ от автогенераторов была система питания ЛУИ в Беркли. Система состояла из девяти основных автогенераторов и трех предвозбудителей, каждый из которых был связан с резонатором отдельной передающей линией. Предвозбудители обеспечивали быстрый переход вторично-электронного резонансного разряда, возбуждая в резонаторе основной вид колебаний на низком уровне мощности, составляющем примерно 1% от рабочего. Они начинали работать за 30 — 100 мкс до включения основных автогенераторов. Автогенераторы отдавали общую мощность в импульсе 2,2 МВт на частоте 200 МГц.

Кроме отмеченных систем ВЧ-питания, разработана блоковая система ВЧ-питания, в которой группа генераторов с внешним возбуждением связана с группой резонаторов через общую фидерную систему. В этой системе ВЧ-питания есть резерв установленной мощности, который может быть использован при отказе одного или нескольких генераторов, что существенно повышает надежность системы в целом. Резерв создается за счет некоторого увеличения отдаваемой в общую фидерную систему мощности каждого из оставшихся в действии генераторов. Возможность использования блоковой системы рассматривалась при разработке некоторых проектов ЛУИ в СССР и США, но практического применения она пока не нашла.

3.4. Элементы конструкций системы ВЧ-питания

Из всех устройств (подсистем), входящих в систему ВЧ-питания ЛУИ, наибольший интерес представляют конструкции ВЧ-блоков усилителей мощности предварительных и окончательных каскадов усиления.

Рассмотрим эти конструктивные особенности на примере окончательного каскада первой части ускорителя МEGАН (рис. 3.3).

В системе ВЧ-питания первой части МEGАН используются шесть каналов усиления на частоте 198,2 МГц. В окончательном каскаде усилителя используется триод 6И-54А со следующими параметрами: мощность в импульсе — 5 МВт, анодное напряжение — 40 кВ, коэффициент усиления по мощности — 20, средняя мощность — 300 кВт. Катод из торированного карбидированного вольфрама потребляет ток накала (постоянный) — 4300 А, напряжение накала — 5 В. Крутизна характеристики не менее 1200 мА/В. Емкости:

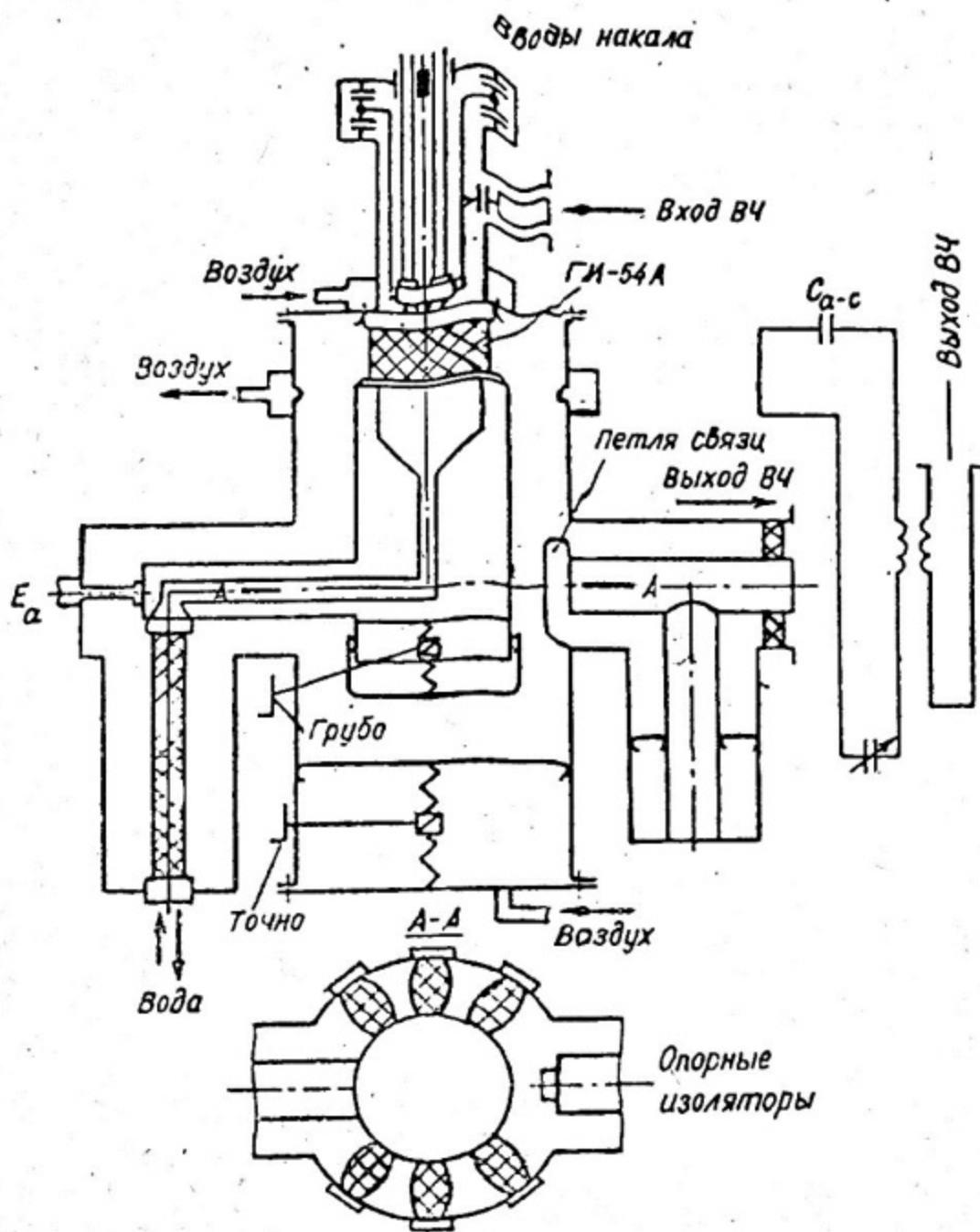


Рис. 3.3. Схема конструкции ВЧ блока ок онечного каскада первой части ускорителя МЕГАН

катод-сетка — 1000 пФ, анод-сетка — 120 пФ, анод-катод — 1 пФ. В оконечном усилителе предусмотрен режим работы с мощностью до 5 МВт, длительностью импульса 400 мкс при скважности 25, что с некоторым запасом соответствует требованиям ускорителя. Каскад выполнен по схеме с общей сеткой.

Триод ГИ-54А выполнен в коаксиальной конструкции с кольцевым выводом сетки, что конструктивно удобно для использования лампы в коаксиальных элементах генератора. Сетка имеет малую проницаемость для уменьшения возбуждения на паразитных частотах.

По режиму работы в наиболее трудных условиях находится анодно-сеточный контур. При амплитуде колебательного напряжения в лампе 36 — 40 кВ амплитуда тока через емкость анод-сетка составляет величину, равную 5500 А.

В коаксиальной конструкции анодно-сеточного контура с волновым сопротивлением около 30 Ом диаметр внутренней трубки равен 330 мм, диаметр наружной трубы — 550 мм. При этом ток в пучности составляет 6000 А, напряжение в пучности 200 кВ и напряженность поля 25 кВ/см. Следует учитывать также возможность перенапряжения на генераторе во время переходных режимов, обусловленных большой добротностью резонатора. Столь значительные ток и напряжение требуют разработки особо надежной конструкции. С этой целью анодный контур выполнен в виде разомкнутой коаксиальной линии без анодного разделительного конденсатора и герметизирован для работы со сжатым воздухом под давлением 3 атм. Вследствие большой емкости сетка-анод и больших размеров лампы первый узел напряжения оказывается непосредственно у лампы, и электрическая длина линии выбрана равной длине волны λ , чтобы иметь возможность расположить опорные изоляторы, вводы питания и охлаждения анода, а также выходное устройство с петлей связи в районе узла напряжения.

Подстройку частоты осуществляют перемещением днища, замыкающего наружную трубу. Конструкция контактов днища позволяет зафиксировать их, увеличивая контактное давление специальным нажимным устройством. Шесть изоляторов из фторопласта-4 поддерживают внутреннюю трубу с лампой. Они расположены радиально. Выходное устройство состоит из петли связи, коаксиального согласующего трансформатора, параллельного шлейфа и заканчивается фланцем для присоединения к коаксиальному фидеру (внешний диаметр 300 мм, внутренний — 130 мм).

Для охлаждения керамического изолятора лампы требуется принудительное воздушное охлаждение. Замкнутая система охлаждения имеет воздухоподувку и калориферное устройство, охлаждаемое водой. Анод, сетка и катод лампы охлаждаются особо чистой водой с удельным сопротивлением $1 \cdot 10^6$ Ом·см. Входное устройство генератора выполнено в виде короткозам-

кнутого коаксиального согласующего трансформатора, к которому через разделительный конденсатор в подходящей для согласования точке подключен фидер от предоконечного каскада. Во внутренней трубе коаксиального трансформатора проходят гибкие шины накала лампы.

В схемах ВЧ-питания ЛУИ, кроме генераторных ламп типа ГИ-27А, ГИ-54А, могут также использоваться другие ВЧ-генераторы. Так, в дециметровом диапазоне длин волн для ВЧ-питания резонаторов высокоэнергетической части ЛУП применяют клистронные усилители мощности (КИУ). Так, для питания второй части ускорителя МЕГАН будет использован специально разработанный КИУ-40 с параметрами: максимальная импульсная мощность 5 МВт; средняя мощность 90 кВт; мощность на входе 300 Вт, коэффициент усиления 42 дБ; анодное напряжение 75 кВ; КПД 40%; фокусировка — электромагнитная.

В дальнейшем, при развитии техники сильноточных ЛУИ, перспективно применение ВЧ-генераторов на релятивистских электронных пучках. Первые экспериментальные работы по созданию таких генераторов дают обнадеживающие результаты. В устройстве "ГИРАКОН", опытный образец которого создан в ИЯФ СО АН СССР, получены уникальные энергетические параметры: на частоте 181 МГц получена мощность в непрерывном режиме 5 МВт.

4. ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ ЛУИ

Структурная схема и общее устройство ЛУИ были описаны в 1.1. В этом разделе дается краткое описание конструктивно-технологических особенностей УС и схем ВЧ-питания на примерах ускорителя И-100 и МЕГАН. Общее описание конструкций этих ускорителей хорошо освещено в учебной литературе и здесь не приводится.

4.1. Линейный ускоритель протонов И-100

ЛУП И-100 — инжектор к синхротрону ИФВЭ на 70 ГэВ имеет следующие параметры ускоренного пучка: энергия — 100 МэВ, импульсный ток — 120 мА при длительности 10 — 40 мкс и частоте повторения импульсов 0,1 — 1 1/с. И-100, общей длиной 80 м, состоит из трех резонаторов: длиной 30 м, 28 м и 22 м, соответственно. Выбор длины обеспечил примерно равные ВЧ-потери в каждом резонаторе по 2 — 2,5 МВт, при мощности питания каждого около 5 МВт, на частоте 148,5 МГц. Диаметр первого резонатора И-100 равен 1,324 м, диаметр трубок дрейфа α изменяется в нем от 233 мм в начале до 100 мм в конце резонатора, с учетом изменяющейся длины трубок дрейфа. Это обеспечило приблизительное постоянство коэффициента зазора $\alpha = 0,250 - 0,255$.

Во втором и третьем резонаторах в целях унификации радиальных размеров квадрупольных линз, диаметр трубок α выбран постоянным, равным 100 мм. Это потребовало уменьшения диаметров второго и третьего резонаторов до 1,220 м и 1,087 м соответственно и постоянного сокращения относительной длины трубок дрейфа вдоль резонаторов. Как следствие этого, коэффициент зазора α получился возрастающим от 0,185 до 0,284 во втором резонаторе и от 0,222 до 277 в третьем.

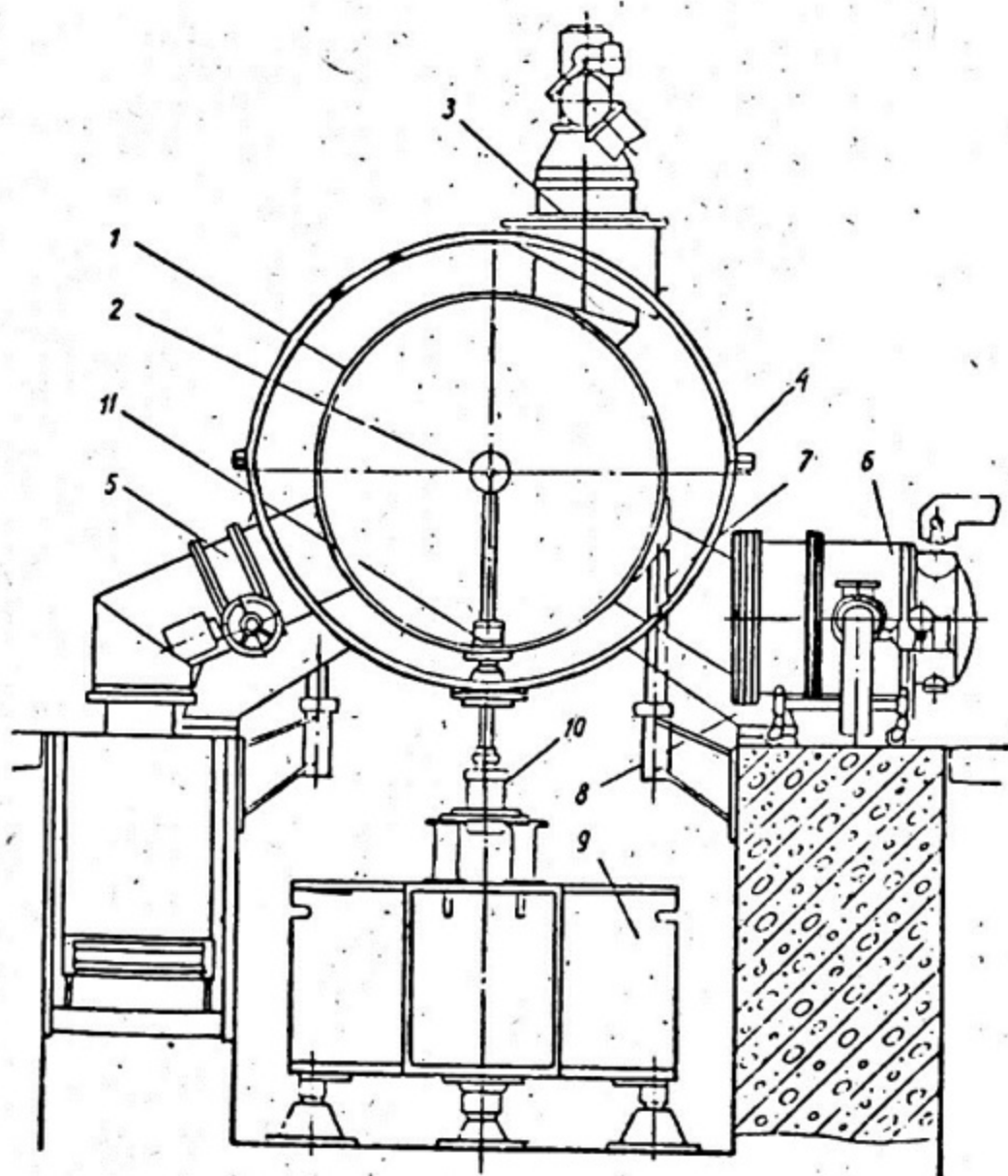


Рис. 4.1. Сечение ускорителя И-100

Связанное с этим уменьшение коэффициента пролетного времени T и, как следствие, "наклон поля", т.е. снижение амплитуды поля вдоль резонаторов, компенсируется специальными подстроечными пластинами, установленными по концам каждого резонатора. Пластины имеют размер 450x450 мм и ход ± 15 мм. Перемещение одной из пластин управляется дистанционно вручную, другая в это время перемещается автоматически системой АРФ в противоположную сторону, обеспечивая постоянство резонансной частоты резонаторов. Система позволяет регулировать наклон в пределах 10 — 20%.

Сечение ускорителя И-100 приведено на рис. 4.1. Резонаторы 1 с трубками дрейфа 2 получают ВЧ-питание от расположенных над ними мощных оконечных усилителей 3 на триодах ГИ-27А.

Резонаторы помещаются в общем стальном кожухе 4, который, принимая на себя давление атмосферы, используется и как форвакуумная камера и как защита от рентгеновского излучения, возникающего от потерь пучка в трубках дрейфа. В объеме между кожухом и резонаторами поддерживается давление 13 Па, резонаторы откачиваются до давления не хуже $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па электроразрядными сорбционно-ионными титановыми насосами 5 с использованием азотных ловушек, установленных непосредственно у форвакуумного кожуха 6. Система каскадного вакуума является особенностью И-100.

Резонаторы и кожух механически развязаны между собой посредством опор 7 и 8, укрепленных на бетонном фундаменте. На том же фундаменте расположены стальные опорные балки 9, положение которых можно корректировать домкратами. На балках, в юстировочных механизмах 10 закреплены концы штанг, поддерживающих трубки дрейфа. Штанги имеют диаметр 60 — 70 мм. Сильфоны 11 обеспечивают гибкое герметичное сочленение в местах прохода штанг через стенки кожуха и резонатора.

Основой конструкции УС И-100 является резонатор, который должен обладать высокой добротностью и механической жесткостью, для обеспечения постоянства резонансной частоты в течение длительного периода эксплуатации. Резонатор, сваренный из шестимиллиметровой листовой бескислородной меди, укреплен ребрами жесткостью из нержавеющей стали. Из-за примерного равенства коэффициентов температурного расширения меди и нержавеющей стали резонатор с ребрами жесткости при температурных изменениях ведет себя как единое целое. Для получения высокой добротности внутренней поверхности резонатора отполирована. При шероховатости поверхности порядка 1 мкм измеренная добротность лежит в пределах от $46 \cdot 10^3$ до $67 \cdot 10^3$.

В верхней части резонаторов расположены пластины для настройки и автоматического изменения резонансной частоты (на рис. 4.1 не показаны).

Пластины устанавливаются в прямоугольных люках, которые служат также для трубок дрейфа.

Схема системы ВЧ-питания И-100 была описана в разделе 3.2. Система автоматического регулирования обеспечивает стабильность фазы в пределах $\pm 1,5^\circ$, при общем допуске на изменение фазы $\pm 3^\circ$.

4.2. Ускоритель МЕГАН

В основе ускорительно-накопительного комплекса МЕГАН лежит линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода на энергию 600 МэВ, с плавной регулировкой в диапазоне 400 — 600 МэВ. Проектная величина суммарного импульсного тока составляет 50 мА, среднего — 0,5 мА, длительность импульса тока 100 мкс, частота следования импульсов 100 имп/с. Мощность пучка в импульсе 30 МВт, средняя — 300 кВт; КПД резонаторов 30 — 40%.

УС ЛУП состоит из двух частей. В первой части используется УС с трубками дрейфа и стабилизирующими стержнями, работающая на частоте 198,2 МГц, во второй, основной, — УС с проводящими шайбами и диафрагмами.

Конструктивно резонатор в первой части ускорителя отличается от резонаторов И-100. Он изготавливается по современной промышленной технологии из триметалла, разработанного в СССР и состоящего из меди, углеродистой стали и нержавеющей стали. В этой конструкции совмещены функции ВЧ-резонатора и вакуумного кожуха. Внутренний медный слой из бескислородной меди МБ, толщиной 4 мм, обеспечивает при соответствующей поверхностной обработке высокую добротность резонатора; слой углеродистой стали, толщиной 15 мм, улучшает условия теплоотвода из-за высокой теплопроводности стали; наружный слой из нержавеющей стали, толщиной 3 мм, позволяет иметь стойкие к коррозии каналы охлаждающей воды, которые образуются с помощью приваренных к нему коробов. Резонаторы, общей длиной 13 — 16 м, разбивают на отдельные подсекции длиной от двух до семи м, которые соединяются между собой или с помощью стяжных конструкций, или сваркой, когда необходимо обеспечить одновременно вакуумную плотность и хороший ВЧ-контакт.

В первую часть, где происходит ускорение до энергии 100 МэВ, входит 5 резонаторов; основная часть состоит из 28 резонаторов.

Не вдаваясь в подробное описание всего комплекса в целом, при разработке которого были решены и решаются сложные конструктивно-технологические и схемные задачи, рассмотрим систему ВЧ-питания ускорителя МЕГАН, от надежности работы которой определяющим образом зависит надежность работы всего комплекса.

Схема системы ВЧ-питания приведена на рис. 4.2. Характерной особенностью системы является применение оперативного резервирования ВЧ-каналов. В первой части ускорителя используется пять основных каналов КУ-1 и один резервный — КУР-1; во второй части 28 основных каналов КУ-2, разделенных на три сектора, в каждом секторе при этом имеется один резервный канал КУР-2. Подключение резервных генераторов вместо основных осуществляется специально разработанными для высокого уровня ВЧ-мощности: коаксиальными переключателями для первой части ускорителя ПК и волноводными переключателями ПВ — для основной части ускорителя. Эти переключатели на два положения и два направления не только подключают резервный генератор к резонаторам, но и подключают вышедший из строя генератор на эквивалентной нагрузке ЭН для настройки после устранения неисправности в нем.

Мощные задающие устройства ЗУ и резервные ЗУР состоят из задающего генератора (нестабильность частоты не более $\pm 5 \cdot 10^{-7}$), умножителей частоты и двух мощных возбудителей частоты на 198,2 и 991 МГц, работающих на 2 согласованных фидера с ответвителями, питающими входы генераторов.

Типовой канал усиления мощности в первой части ускорителя КУ-1 состоит из четырех каскадов усиления, построенных на лампах ГИ-54А, ГИ-51А, ГИ-37Б. Канал усиления КУ-2 состоит из клистронного усилителя КИУ-40, питаемого от трех каскадов усиления мощности на лампах ГС-34П. Каждый канал усиления возбуждает один резонатор.

Аппаратура ВЧ-питания ускорителя МЕГАН состоит из 1200 шкафов и других крупных устройств, расположенных вдоль ускорителя и отделенных от резонаторов биологической защитой. Длина фидеров от выхода каждого генератора до соответствующего резонатора равна примерно 40 м. В начальной части используют коаксиальные фидеры (внешний диаметр 300 мм, внутренний — 130 мм), в основной части — прямоугольные волноводные фидеры (размером 200x104 мм).

Наличие в составе ВЧ-системы большого количества сложной радиоаппаратуры потребовало обратить особое внимание на обеспечение надежности ее работы.

Предусмотрена возможность местного и дистанционного управления каждым генератором. Дистанционное управление производится на двух уровнях: с секторных пультов СПУ и на центральном пульте ЦПУ. ЭВМ секторных и центрального пультов используют для периодического и внеочередного контроля и регистрации параметров режима работы генераторов, диагностики и прогнозирования отказов. Число контролируемых параметров в каждом генераторе близко к 100.

Система электропитания генераторов включает в себя мощные распределительные устройства, повышающие и понижающие трансформаторы,

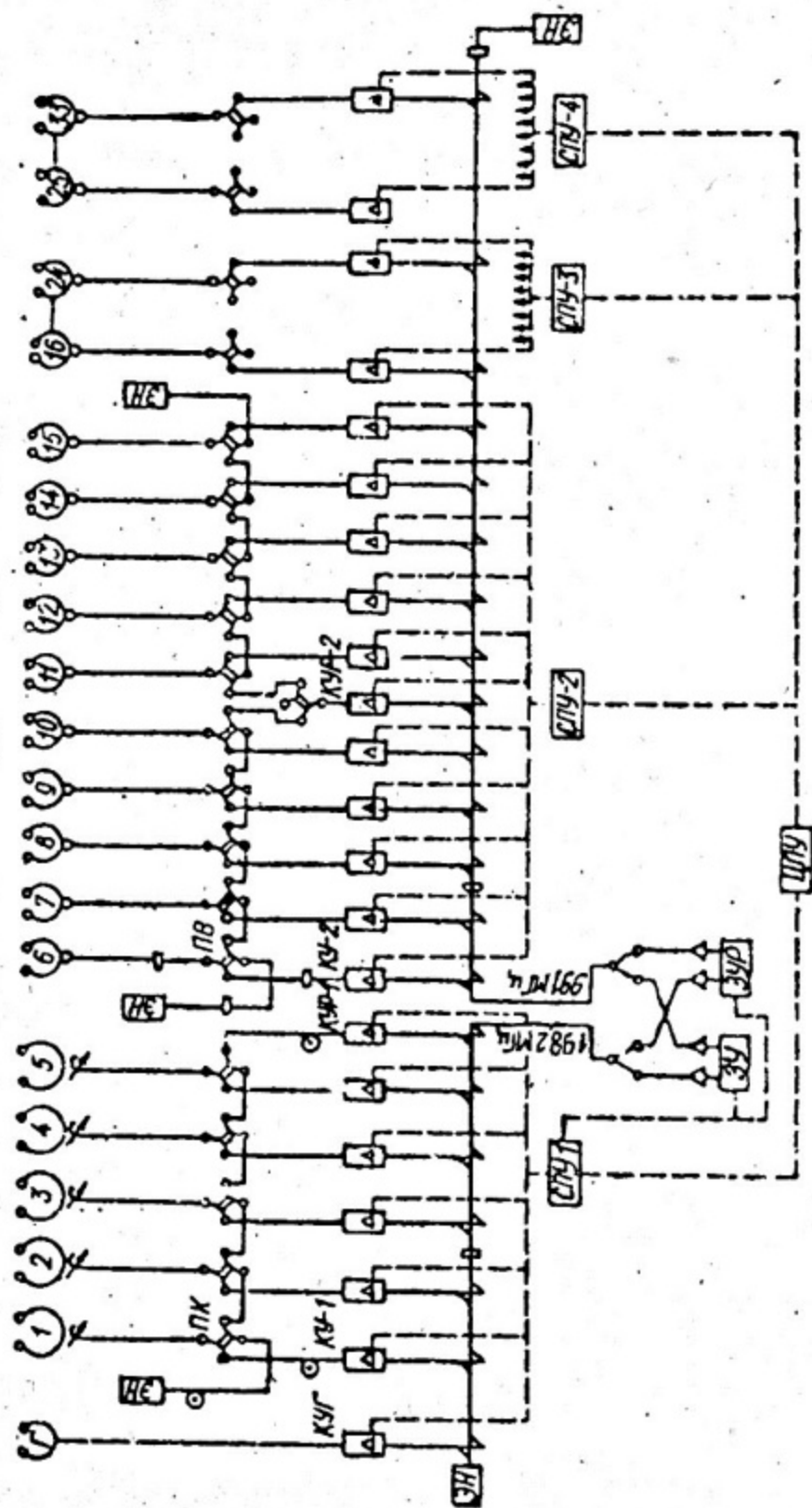


Рис. 4.2. Структурная схема системы ВЧ-питания ускорителя МЕГАН (Г — группирователь, КУГ — канал усиления группирователя)

регуляторы напряжения и преобразователи частоты питающей сети и другое оборудование. Общая мощность электропитания (ВЧ-системы при средней мощности пучка 300 кВт) достигает примерно 15 МВт.

4.3. Нейтронный генератор на основе ЛУИ

В связи с программой развития термоядерной энергетики появилась потребность в создании высокочастотного нейтронного генератора на базе ЛУИ. Так ускоритель дейтронов на энергию 35 МэВ и средний ток 100 — 200 мА позволит проводить исследования по радиационному материаловедению, связанному с созданием конструкционных материалов для "первой стенки" термоядерных реакторов и для других целей.

В ИТЭФ создается импульсный протонный прототип сильноточного ЛУ для указанных целей. Ускоритель включает: ионную пушку с напряжением 88 кВ, током 250 мА и длительностью импульса 25 мкс; начальную часть на энергию 3 МэВ в виде резонатора с волной H_{211} ; согласующий канал и основную часть с конечной энергией 10 МэВ на волне E_{010} . Рабочая частота начальной части 148,5 МГц, а основной части — в два раза выше. Максимальное значение среднего тока за импульс при фазовой плотности пучка 1 А/см²·рад составит 0,2 А. Длина периода ускорения в начальной и основной частях $0,5\beta_{gr}l$ и $\beta_{gr}l$, а длина периода фокусировки $\beta_{gr}l$ и $2\beta_{gr}l$ соответственно. Низкая энергия инжекции и практически полный захват частиц в процесс ускорения являются результатом использования ПОКФ в начальной части. Для фокусировки в основной части применяются магнитные квадрупольные.

В течение ряда лет в США создается сильноточный дейтронный ЛУ на энергию 35 МэВ с непрерывным током пучка 100 мА по проекту *FMIT* (*Fusion Material Irradiation Test Facility*). Ускоритель полной длиной 42,7 м состоит из двух резонаторов, причем в качестве начальной части выбрана структура с ПОКФ. Это позволило перейти от инжектора на 760 кВ к инжектору 100 кВ. Рабочая частота резонаторов 80 МГц. Общее число выходных каскадов на тетрадах по 500 кВт составляет 17. Средний темп ускорения 1 МэВ/М. Поскольку средний ток дейтронного пучка на три порядка выше, чем в лучших действующих ЛУ, то наряду с множеством проблем одной из основных является проводка пучка вдоль всего тракта с минимальными потерями.

Список литературы

1. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. — М.: Атомиздат, 1959.
2. Каретников Д.В., Сливков И.Н., Тепляков В.А. и др. Линейные ускорители ионов. — М.: Госатомиздат, 1962.
3. Линейные ускорители ионов/Под ред. Мурина Б.П., в 2-х т., — М.: 1978.
4. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. — М.: Энергоиздат, 1982.
5. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей, Т. 1. — 3. — М.: Энергоиздат, 1981 — 1983.