

C-284

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-94-225

На правах рукописи

УДК 621.3.032.266

**СЕДЫХ**  
Сергей Николаевич

**ТРАНСПОРТИРОВКА  
ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ  
В ПРОТЯЖЕННЫХ КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ  
СТРУКТУРЫ ПРИ ПОМОЩИ МАГНИТНЫХ  
ПЕРИОДИЧЕСКИХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ**

**Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Дубна 1994

Работа выполнена в Московском Радиотехническом институте РАН.

**Научный руководитель:**  
доктор технических наук, профессор

Ф.А.Водопьянов

**Официальные оппоненты:**  
доктор технических наук  
(МРТИ РАН, Москва)  
доктор технических наук  
(ОИЯИ, г. Дубна)

Г.И.Кленов

И.А.Шелаев

**Ведущая организация:**  
Институт Теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита состоится " " 1994 года в часов на заседании  
специализированного совета Д 047.01.06 при ЛСВЭ ОИЯИ по адресу: 141980,  
г.Дубна, ЛСВЭ, ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1994 года.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
Д 047.01.06 при ЛСВЭ ОИЯИ  
к.ф.-м.н., с.н.с.,

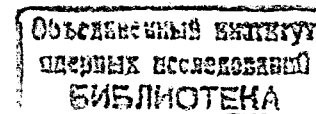
В.Г.Кривохижин

## 1 . ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей транспортировки интенсивных сплошных цилиндрических стационарных электронных пучков в протяженных каналах сложной структуры. Кроме того, рассматриваются некоторые вопросы транспортировки сгруппированных пучков. Под интенсивными в работе понимаются пучки, на динамику которых оказывают существенное воздействие как силы объемного заряда, так и эмиттанс, а их первенс ниже электростатического предела вакуумной транспортировки. Структура канала транспортировки может включать многочисленные ускорительные зазоры, СВЧ резонаторы, фланцевые соединения, откачные патрубки и т.д., а также участки поворота пучка. Магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) создают в канале осесимметричное распределение продольного магнитного поля с многократным изменением направления. Предполагается, что параметры пучка при его транспортировке через последовательность неоднородностей канала меняются адиабатически.

**Актуальность темы.** Рассматриваемая проблема лежит на пересечении двух тенденций развития ускорительной техники – увеличения интенсивности пучков, получаемых в традиционных ускорителях, и разработка новых типов ускорителей с целью уменьшения их размеров и массы, повышения КПД, улучшения эксплуатационных характеристик. Первая тенденция часто сопровождается необходимостью использования дополнительных средств фокусировки пучка (например, различные варианты сильноточного бетатрона), вторая – усложнением структуры канала транспортировки пучка (рейстрекковые индукционные ускорители и индукционные ускорители с винтовой орбитой).

Все более широкое использование электронных пучков в других областях техники и увеличение их интенсивности выдвигает повышенные требования к эффективности транспортировки пучков. Это связано как со стремлением получить высокий КПД всего устройства, так и со сложностью отвода тепла от элемен-



тов, в которых часть пучка теряется. Такая проблема встает, например, при разработке систем передачи энергии на большие расстояния электронным пучком.

Большое значение имеет эффективность транспортировки электронного пучка и для разрабатываемого в настоящее время СВЧ генератора нового поколения – релятивистского клистрона с системой преобразования энергии в виде цепочки несвязанных резонаторов. Один из вариантов генератора предусматривает группировку пучка в поворотном магнитном поле. Канал транспортировки пучка включает ускорительные зазоры, модулирующий СВЧ резонатор, группирователь пучка в поворотном магнитном поле, многорезонаторную систему преобразования энергии, фланцевые соединения.

Из приведенных примеров видно, что задача обеспечения эффективной транспортировки интенсивных электронных пучков по протяженным каналам сложной структуры является актуальной.

#### Состояние вопроса.

Магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС), более тридцати лет применяются для транспортировки интенсивных электронных пучков, главным образом в СВЧ приборах. Они допускают встраивание СВЧ элементов в канал транспортировки с минимальными нарушениями распределения фокусирующего поля. Данные математического моделирования свидетельствуют о смене направления дрейфа электронов на поворотных участках, в результате чего суммарный дрейф должен быть незначительным. Однако, сведения о практической реализации поворота интенсивного электронного пучка в канале с МПФС отсутствуют. При разработке МПФС для прямолинейных каналов также возникает ряд проблем.

Аналитическая теория МПФС, основанная на сведениях параксиального уравнения огибающей пучка к уравнению Маттье, использует предположение о малости пульсаций огибающей, справедливое только внутри первой области устойчивости. Кроме то-

го, она рассматривает только синусоидальное распределение фокусирующего поля, не исследует поведение пучков с произвольным соотношением сил объемного заряда и эмиттанса. Эти ограничения преодолеваются при численном моделировании процессов транспортировки пучка, однако из-за большого числа рассматриваемых параметров и отсутствия способов наглядного представления результатов, аналогичного диаграмме Маттье, исследованы могут быть лишь небольшие области параметров. При этом отсутствует целостная картина, нет гарантий оптимальности выбранных параметров МПФС. Кроме того, распределение фокусирующего поля обычно описывается отрезком ряда Фурье, а вопрос о реализации выбранного распределения конкретной магнитной системой разработан недостаточно. Не исследованы также закономерности роста эмиттанса пучка при его транспортировке в канале с МПФС.

Данная работа была стимулирована разработкой системы транспортировки электронного пучка релятивистского СВЧ генератора с группировкой пучка в поворотном магнитном поле и системой преобразования энергии в виде цепочки несвязанных резонаторов. Особенности этой системы являются необходимость размещения элементов фокусирующей системы под различными потенциалами в ускорителе прямого действия, а также изменение в широких пределах параметров пучка при его транспортировке по основным системам генератора – энергии в ускорителе, мгновенного первеанса в группирователе, средней энергии и эмиттанса (вследствие "динамической расфокусировки") в системе преобразования энергии. При этом необходимо обеспечить устойчивость транспортировки пучка во всем диапазоне параметров, а также в широких пределах менять величину фокусирующего поля для поддержания согласования пучка с каналом транспортировки.

Цель диссертационной работы состояла в теоретическом и экспериментальном исследовании процессов, происходящих при транспортировке интенсивных электронных пучков в протяжен-

ных каналах с разрывами и поворотными участками, в разработке на этой основе рекомендаций по выбору оптимальных параметров МПФС, а также в исследовании возможности использования МПФС для транспортировки электронного пучка по основным функциональным узлам релятивистского СВЧ генератора с поворотным группирователем и многорезонаторной системой преобразования энергии.

В работе основное внимание было уделено:

- исследованию устойчивости транспортировки электронных пучков с произвольным соотношением сил объемного заряда и эмиттанса в МПФС с различными распределениями фокусирующего поля;

- исследованию возможностей и особенностей реализации различных распределений поля конкретными магнитными системами;

- разработке рекомендаций по оптимальному выбору основных параметров МПФС;

- практическому осуществлению поворота интенсивного электронного пучка в канале с МПФС;

- исследованию возможностей применения МПФС для транспортировки электронного пучка по ускорительной трубке, поворотному группирователю и многорезонаторной системе преобразования энергии релятивистского СВЧ генератора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен способ графического представления результатов численного интегрирования параксиального уравнения огибающей пучка, на его основе получены диаграммы устойчивости, аналогичные диаграмме Матье, но для пучков с произвольным соотношением сил объемного заряда и эмиттанса и для широкого класса распределений фокусирующего поля МПФС.

2. На основе представления поля МПФС в виде суперпозиции полей одиночных магнитных линз исследованы возможности реализации различных распределений поля и связь между параметрами магнитной системы и шириной области устойчивости

транспортировки пучка.

3. Обнаружено не описанное в литературе свойство МПФС – существование области параметров, в которой среднеквадратичное поле (и, следовательно, фокусирующая сила) слабо зависит от длины периода системы. Это свойство позволяет ослабить требования к точности установки линз МПФС, уменьшает градиент фокусирующего поля и связанный с ним градиентный дрейф электронов на поворотном участке.

4. Практически осуществлен поворот высокоперевансного электронного пучка на  $90^\circ$  в канале с МПФС. При энергии электронов 200 кэВ и токе пучка 190 А коэффициент токопрохождения поворотного участка составил 90%.

Практическая ценность.

1. Доказана возможность применения МПФС для фокусировки интенсивных электронных пучков при их транспортировке по протяженным каналам сложной структуры, включающим поворотные участки.

2. Результаты исследования транспортировки пучка в МПФС в параксиальном приближении могут быть использованы для анализа возможности транспортировки пучков в системах с заданной геометрией магнитов, а также для определения основных параметров магнитной системы, обладающей заданным комплексом свойств, например, обладающей максимальным аксептансом при наличии ограничений на длину периода или их отсутствии, минимальной зависимостью среднеквадратичного поля от длины периода, максимальной допустимой длиной разрыва канала.

3. Результаты численного моделирования транспортировки интенсивных электронных пучков в прямых и поворотных каналах могут быть использованы при разработке систем с минимальными искажениями поперечного профиля пучка в повороте.

4. Показана возможность использования МПФС для эффективной транспортировки электронного пучка релятивистского СВЧ генератора с высокой импульсной мощностью, выбраны ее оптимальные параметры. Предложены варианты фокусирующей

системы для основных функциональных узлов генератора – ускорительной трубки, поворотного группирователя и многорезонаторной системы преобразования энергии.

Разработана и создана система транспортировки электронного пучка макета релятивистского СВЧ генератора с энергией электронов 200 кэВ и током пучка до 240 А при длительности импульса 2 нс.

#### На защиту выносятся:

1. Способ представления результатов численного интегрирования парааксиального уравнения огибающей электронного пучка в МПФС в виде диаграмм устойчивости в декартовых координатах ( $EL/R^2, \sqrt{KL}/R$ ) или эквивалентных полярных координатах ( $\rho = \sigma_0, \varphi = \arccos(\sigma/\sigma_0)$ ), где  $K, E$  и  $R$  – соответственно обобщенный первеанс, эмиттанс и средний радиус пучка,  $L$  – длина периода МПФС,  $\sigma_0$  и  $\sigma$  – набеги фазы бетатронных колебаний на периоде системы соответственно в одночастичном случае и с учетом кулоновской редукции частоты.

2. Способ представления распределения поля МПФС в виде суперпозиции полей одиночных магнитных линз с использованием аппроксимации Глазера, а также результаты исследования в этом приближении основных свойств МПФС с одним и двумя максимумами поля на полупериоде, включая определение параметров систем, оптимальных по ряду критериев.

3. Существование не описанного в литературе свойства МПФС – наличия области параметров, в которой среднеквадратичное поле системы слабо зависит от длины периода.

4. Конструкция и результаты исследования участка поворота интенсивного электронного пучка в канале с МПФС.

5. Рекомендации по использованию МПФС для транспортировки электронного пучка релятивистского СВЧ генератора с большой импульсной мощностью, включая выбор оптимальных параметров МПФС и варианты конструкции для основных функциональных узлов генератора – ускорительной трубки, поворотного группирователя пучка и многорезонаторной системы пре-

образования энергии.

#### Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VI и VII Всесоюзных симпозиумах по сильноточной электронике (Томск, 1986 и 1988 гг.), на IX семинаре-совещании по проблемам технологического применения мощных электронных пучков (Москва, ВЭИ, 1988 г.), на семинарах ИЭиА АН УзССР (Ташкент), ТПИ (Томск), РТИ АН СССР и МРТИ АН СССР (Москва).

#### Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ и 6 научных отчетов.

#### Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 96 страниц текста, 68 иллюстраций и список литературы из 173 наименований на 21 странице.

## 2 . СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность работы, на основе обзора литературы показывается перспективность МПФС для решения поставленной задачи, анализируется уровень развития теории и техники МПФС, нерешенные проблемы. Там же формулируется задача диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту. Кратко описаны структура и содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу и оптимизации свойств МПФС в парааксиальном приближении. В ней численными методами исследуется релятивистское парааксиальное уравнение огибающей электронного пучка с радиусом  $r$ , обобщенным первеансом  $K$  и эмиттансом  $E$  в нормализованном (размерностью  $m^{-1}$ ) продольном магнитном поле  $B_n$

$$r'' + B_n^2(z)r - \frac{K}{r} - \frac{E^2}{r^3} = 0, \quad (1)$$

где  $r''$  – вторая производная радиуса огибающей по продольной координате  $z$ . Усреднение уравнения (1) с учетом  $\langle r'' \rangle = 0$ ,  $\langle r \rangle = R$ ,  $\langle B_n^2(z) \rangle = B^2$  дает уравнение среднего силового баланса

$$\left(\frac{E}{R}\right)^2 + (\sqrt{K})^2 = (BR)^2. \quad (2)$$

Такая форма записи позволяет изобразить систему транспортировки четвертью окружности радиуса  $BR$  на плоскости с декартовыми координатами  $(E/R, \sqrt{K})$ . На этой же плоскости можно изображать эволюцию параметров пучка.

В работе предложена еще одна безразмерная форма записи уравнения среднего силового баланса, удобная в случае транспортировки пучка в периодических фокусирующих системах с длиной периода  $L$

$$\left(\frac{EL}{R^2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{KL}}{R}\right)^2 = (BL)^2 = \sigma_0^2. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_0$  – набег фазы (в радианах) одночастичных колебаний на периоде фокусирующей системы. Описание пучка в декартовых координатах  $(EL/R^2, \sqrt{KL}/R)$  эквивалентно описанию в полярных координатах  $(\rho = \sigma_0, \varphi = \arccos(\sigma/\sigma_0))$ , где  $\sigma$  – набег фазы бетатронных колебаний на периоде с учетом кулоновской редукции частоты. Параметры  $\sigma$  и  $\sigma_0$  часто используются для описания условий устойчивости транспортировки пучков в периодических фокусирующих системах. Использование этой эквивалентности позволяет при исследовании уравнения (1) ограничиться двумя безразмерными параметрами, что дает возможность перейти от расчета ограниченного числа точек к изображению целых областей на плоскости, т.е. по результатам численного интегрирования строить области устойчивости для уравнения (1).

В качестве диаграмм устойчивости в работе предложено использовать карту линий уровня величины  $\delta R = (r_{max} - r_{min})/2R$ , представляющей собой относительную амплитуду пульсаций радиуса огибающей. Проведено сопоставление диаграммы устойчи-

вости для синусоидального распределения поля МПФС (рис. 1) с традиционно используемой диаграммой Матъе. Показано, что точно указывая начало первой зоны неустойчивости, диаграмма Матъе завышает размеры зон устойчивости высших порядков. Это является следствием линеаризации уравнения (1) при сведении его к уравнению Матъе.

Далее в работе обсуждаются возможности использования для транспортировки пучка по каналам сложной структуры МПФС с несинусоидальными распределениями поля. Приведены диаграммы устойчивости для распределений в виде суммы первой и третьей гармоник при различном содержании третьей гармоники. На диаграммах прослежено известное из литературы слияние первой и второй зон устойчивости при содержании третьей гармоники 0.5. Делаются выводы о пригодности предложенных диаграмм для анализа устойчивости транспортировки, а также о преимуществах распределений поля с двумя максимумами на полупериоде.

Предложено рассматривать МПФС как совокупность одиночных магнитных линз, поле каждой из которых описывается с помощью аппроксимации Глазера

$$B_z(z) = \frac{B_m}{1 + ((z - z_0)/d)^2}, \quad (4)$$

при условиях  $s < D$ ,  $NI < 1100$ . Здесь  $B_m = \mu_0 NI/l$  – амплитуда поля линзы,  $d = 0.48l$ , – полуширина поля на половине амплитуды,  $l = \sqrt{s^2 + 0.45D^2}$  – нормирующая длина,  $z_0$  – координата центра линзы,  $NI$  – число ампер-витков в обмотке возбуждения линзы,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $D$  – внутренний диаметр корпуса линзы,  $s$  – ширина рабочего зазора между полюсными наконечниками. Каждый полупериод МПФС состоит из двух согласно включенных линз (рис. 2).

Численно исследована зависимость эффективного поля (и, следовательно, фокусирующей силы) МПФС от относительной полу-

ширины поля линз  $d/L$ , безразмерного параметра их расстановки  $g/L$  и амплитуды поля линзы  $B_m$  (рис. 3). Заметим, что при  $g/L = 0$  получается система с одним максимумом поля на полупериоде, например, с распределением поля, близким к синусоидальному. Обнаружено не описанное в литературе свойство МПФС – существование области параметров (точечная кривая на рис. 3 и 4), в которой фокусирующая сила МПФС слабо зависит от длины периода

$$\frac{\partial B}{\partial(d/L)} = 0 \quad \text{при } g/L = \text{const} \quad \text{и } B_m = \text{const}. \quad (5)$$

Существование этой области связано с вычитанием полей соседних встречно включенных линз. Выбор параметров МПФС на указанной кривой позволит ослабить требования к точности расстановки линз, уменьшить градиент фокусирующей силы и связанный с ним градиентный дрейф частиц на поворотных участках, а также открывает возможности размытия резонансов колебаний частиц с периодической фокусирующей силой путем псевдослучайного изменения периода МПФС при сохранении согласования пучка с каналом транспортировки.

Учет конечной ширины корпуса магнитных линз  $2h$  (рис. 2) ограничивает зону реализуемых магнитных систем внутренностью треугольника с углом при вершине  $\varphi = \text{arctg}(h/d)$  (сплошные линии со штриховкой на рис. 3 и 4) в случае двух линз на полупериоде или отрезком оси  $d/L$  от 0 до пересечения с пунктирной прямой в случае одной линзы на полупериоде. Верхняя прямая со штриховкой соответствует касанию встречно включенных линз, нижняя – касанию согласно включенных. Выбранная рабочая точка делит вертикальный отрезок, находящийся внутри треугольника, на части, соответствующие нормированным на длину периода зазорам между линзами. При несовпадении геометрического и магнитного центров линзы наклоны прямых к оси  $g/L$  будут различными, и вершина треугольника не будет лежать на прямой  $g/L = 0.125$ . При заданном отношении  $g/L$  максималь-

ную длину разрыва канала допускают магнитные системы, изображающие точки которых лежат на одной из ограничивающих прямых. В этих системах на полупериоде имеется один широкий зазор, а не два узких.

В диссертации содержатся результаты численного интегрирования параксиального уравнения огибающей интенсивного пучка в МПФС, составленных из одиночных линз. На рис. 4 изображена карта линий уровня набега фазы одночастичных колебаний, при котором максимальный радиус пучка вдвое превышает средний (этот набег фазы условно назван "допустимым" набегом фазы). Эта величина характеризует пропускную способность канала в первой области устойчивости при фиксированной длине периода. В области максимальных допустимых набегов фазы (с осевой пунктирной линией на рис. 3 и 4) происходит слияние первой и второй зон устойчивости, аналогичное слиянию при содержании третьей гармоники 0.5. Пересечение осевой линии области максимальных набегов фазы с кривой минимальной чувствительности фокусирующей силы к длине периода ( $d/L = 0.12$  и  $g/L = 0.17$ ) определяет МПФС, оптимальную по двум критериям одновременно. Диаграмма устойчивости для нее приведена на рис. 5. Получены также диаграммы, позволяющие оптимизировать МПФС по числу ампер-витков на единицу длины канала, по пропускной способности при отсутствии ограничений снизу на длину периода МПФС.

В работе приводятся также диаграммы устойчивости для случая рассогласования пучка с каналом транспортировки. Обнаружена область параметров пучка (соответствующая, в частности, замагниченным катодам), в которой влияние рассогласования на относительную амплитуду пульсаций радиуса пучка минимально.

Вторая глава диссертации посвящена численному моделированию и экспериментам по транспортировке интенсивных электронных пучков по каналам сложной структуры. В начале кратко описаны используемый для моделирования магнитных систем

пакет программ ЭСТАМП (разработка ВЦ СО АН СССР), вычислительный стенд ЛУЧ (Томский политехнический институт) и доработанный автором пакет программ ЭРА (ВЦ СО АН СССР), применяемые для моделирования динамики интенсивных электронных пучков в прямых и поворотных каналах транспортировки. Эти программы, основанные на методах трубок тока (ЭРА) и крупных частиц (ЛУЧ), использовались для оценки точности результатов параксиального приближения, а также для исследования влияния различных факторов на эффективность транспортировки. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что параксиальное приближение хорошо описывает положение области максимального набега фазы, величина же набега завышена на  $(20 \div 30)\%$ . Показано, что дозированное введение третьей гармоники в распределение поля МПФС замедляет рост эмиттанса пучка при транспортировке. Для пучков с микропервеансом больше 1 эффективность транспортировки определяется ростом эмиттанса вследствие кулоновских aberrаций. Показано, что поворотное поле должно быть слабофокусирующим с показателем спада 0.5. Показано также, что при энергии электронов 200 кэВ и токе пучка 200 А транспортировка пучка через поворот может осуществляться при отклонениях поворотного поля от оптимального до 30%.

В диссертации содержится краткое описание аппаратуры, применяемой для измерения распределения магнитных полей экспериментальной системы транспортировки в непрерывном и импульсном режимах. Наряду с серийными приборами использовались разработанные Институтом полупроводников АН УССР при участии автора кассеты с миниатюрными датчиками Холла и вторичная аппаратура для импульсных измерений.

Далее описана конструкция разработанных автором экспериментальных участков системы транспортировки интенсивного электронного пучка, включающей прямые участки с различными радиусами канала, а также участок поворота пучка на  $90^\circ$ . Приведены результаты расчетов и измерений магнитных по-

лей экспериментальной системы транспортировки. Измерениями подтверждено существование области слабой зависимости среднеквадратичного поля МПФС от длины периода и уточнены соответствующие параметры магнитной системы. Показано, что использование аппроксимации Глазера для поля линзы занижает значения среднеквадратичного поля МПФС в этой области на 10%.

В работе описаны состав и основные характеристики экспериментального стенда с электронным пучком при энергии 200 кэВ, током до 240 А и длительностью импульса 2 мкс. Описаны также аппаратура диагностики пучка и методика экспериментов по транспортировке интенсивного пучка по прямому участку с разрывами и по поворотному участку. При микропервеансе пучка около 2 коэффициент токопрохождения как прямого участка длиной 1.2 м, так и поворотного участка достиг 90%. Приведены результаты исследования влияния амплитуды фокусирующего и поворотного полей, закона распределения фокусирующего поля, микропервеанса пучка на эффективность транспортировки. Показано соответствие между экспериментальными результатами и данными численного моделирования.

Третья глава диссертации посвящена исследованию возможности применения МПФС для транспортировки электронного пучка релятивистского СВЧ генератора с группировкой пучка в поворотном магнитном поле и с системой отбора энергии в виде цепочки несвязанных резонаторов. Кратко изложены принципы построения и блок-схема генератора с поворотной группировкой пучка и многорезонаторной системой отбора энергии. Оценены требуемые параметры пучка, условия его транспортировки, требования к эффективности транспортировки. Канал транспортировки пучка имеет длину порядка 10 м при диаметре 25 мм, он включает в себя многочисленные ускорительные и СВЧ зазоры, откачные патрубки, соединительные фланцы, участки поворота пучка на  $90^\circ$  и на  $360^\circ$ . Особенностью транспортировки является постепенное изменение в широких пределах параметров пучка -



энергии в ускорителе от 200 кэВ до 5 МэВ, коэффициента первой гармоники тока в группирователе (при этом "мгновенный первеанс" увеличивается примерно в четыре раза), средней энергии и энергетического разброса в системе преобразования энергии. Кроме того, во всех системах генератора происходит постепенный рост эмиттанса пучка, связанный с рассеянием электронов на остаточном газе, aberrациями магнитной системы, кулоновскими aberrациями, отсутствием одновременной силовой компенсации всех частиц пучка при реальных функциях распределения, отклонениями в параметрах элементов канала транспортировки, а в системе преобразования энергии – еще и за счет динамической расфокусировки пучка.

На основании результатов исследования МПФС в параксиальном приближении для транспортировки пучка была выбрана система с параметрами  $d/L = 0.12$  и  $g/L = 0.17$ . Она одновременно характеризуется большой шириной зоны устойчивости и слабой зависимостью фокусирующей силы от длины периода. Ее диаграмма устойчивости приведена на рис. 5. Ограничения, накладываемые аппроксимацией Глазера на длину периода МПФС при заданном радиусе канала и выбранном законе распределения поля, а также характерный для сильноточных пучков коэффициент заполнения канала пучком ( $R/R_{кан} \sim 0.5$ ) дает возможность сформулировать ограничения на отношение  $R/L$

$$0.05 < R/L < 0.1 \quad (6)$$

и перейти от диаграммы в координатах  $(EL/R^2, \sqrt{KL}/R)$  к диаграмме в координатах  $(E/R, \sqrt{K})$ . На рис. 6 в этих координатах изображена примерная эволюция параметров пучка релятивистского СВЧ генератора при токе пучка 200 А в предположении, что нормализованный эмиттанс возрастает в два раза. На диаграмме пунктирными линиями со штриховкой отмечены микропервеансы пучка 3 и 29, которые приблизительно отмечают области больших кулоновских aberrаций и возникновение виртуального катода. Из диаграммы видно, что пучок все время остается в

первой области устойчивости выбранной МПФС, а относительная амплитуда пульсаций огибающей не превышает 10%. Лишь в конце системы преобразования энергии пучок попадает в область больших кулоновских aberrаций.

Далее в работе предложены варианты фокусирующих систем, реализующих выбранные распределения поля и учитывающие особенности функциональных элементов релятивистского СВЧ генератора. Так, для ускорительной трубки с дисковыми изоляторами разработаны радиальные линзы, сочетающие электромагниты и постоянные магниты. Эта комбинация позволяет в широких пределах изменять амплитуду поля при сохранении его распределения, а также обойти проблему питания электромагнитов под высоким потенциалом. Для поворотного группирователя пучка разработаны линзы, надевающиеся на поворотную обмотку, для системы преобразования энергии – линзы, вкладывающиеся в полости тороидальных резонаторов. Приведены результаты измерения распределений фокусирующего поля. Работа проиллюстрирована некоторыми результатами моделирования средствами вычислительного стенда ЛУЧ процессов формирования сгустка в поворотном группирователе и его торможения в системе преобразования энергии, использующих МПФС. Они свидетельствуют о том, что применение МПФС не оказывает отрицательного влияния на продольную динамику сгустков.

В заключении суммируются основные результаты работы, обсуждается их практическая ценность, а также возможные направления дальнейших работ.

### 3 . ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В параксиальном приближении построены диаграммы устойчивости транспортировки пучков с произвольным соотношением сил объемного заряда и эмиттанса в МПФС с одним и двумя максимумами поля на полупериоде.

2. Исследована связь между основными свойствами распределений магнитного поля МПФС и параметрами магнитных си-

стем, создающих эти распределения. Обнаружено не описанное в литературе свойство МПФС – существование области параметров, в которой среднеквадратичное поле слабо зависит от длины периода.

3. Определены основные параметры систем, оптимальных по некоторым критериям, в том числе, обладающих максимальным аксептансом при наличии ограничений снизу на длину периода или их отсутствии, минимальной величиной поля отдельной линзы, минимальным числом ампер-витков на единицу длины канала, максимальной длиной допустимого разрыва канала без нарушения структуры поля, минимальной зависимостью фокусирующей силы от длины периода. В некоторых случаях возможна оптимизация по двум критериям одновременно.

4. Численным моделированием исследована зависимость скорости роста эмиттанса интенсивного пучка при транспортировке его в прямых и поворотных каналах с МПФС от величины и закона распределения поворотного и фокусирующего полей и от параметров пучка.

5. Предложена конструкция поворотного канала с МПФС. Практически осуществлен поворот на  $90^\circ$  пучка с током 190 А при энергии 200 кэВ с эффективностью 90%.

6. Показана возможность использования МПФС для транспортировки электронного пучка релятивистского СВЧ генератора с поворотной группировкой пучка и системой отбора энергии в виде цепочки несвязанных резонаторов. Предложены варианты фокусирующей системы для его основных функциональных узлов – ускорительной трубки с дисковыми изоляторами, группирователя пучка и системы преобразования энергии.

7. Разработана и создана система транспортировки электронного пучка макета релятивистского СВЧ генератора с энергией электронов 200 кэВ, токе пучка до 240 А при длительности импульса 2 нс.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих

работах:

1. Душин Ю.Ф., Мамет А.М., Попырина Е.А., Седых С.Н. Инжектор электронов микросекундной длительности с энергией 100 кэВ и током до 100 А. – В кн.: Вопросы генерирования СВЧ излучений. – М.: РТИ АН СССР, 1982, с.43–49.

2. Водопьянов Ф.А., Литвинов В.Н., Макаров В.В., Мамет А.М., Седых С.Н. Макет релятивистского СВЧ генератора с пучком на энергию 140 кэВ. – В кн.: Вопросы релятивистской СВЧ электроники. – М.: РТИ АН СССР, 1983, с.29–38.

3. Водопьянов Ф.А., Литвинов В.Н., Мамет А.М., Седых С.Н. Макет релятивистского СВЧ генератора при энергии пучка в импульсе 300 Дж. – В кн.: Вопросы релятивистской СВЧ электроники. – М.: РТИ АН СССР, 1983, с.39–46.

4. Климовская А.И., Иванец В.А., Седых С.Н. и др. Устройство для исследования топографии импульсных магнитных полей с высоким пространственным разрешением. – В кн.: Методы и средства измерения магнитных полей. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания. – Л.: ВНИИМ, 1985, с.276.

5. Кузьмичев В.И., Седых С.Н. Комплекс программ для анализа ЭОС с электромагнитами. – В кн.: Моделирование электронных пучков. Межвузовский научно-технический сборник. – Томск: ТПИ, 1986, с.67–72.

6. Литвинов В.Н., Мамет А.М., Седых С.Н. Высокопервоантный диодный бессеточный инжектор электронного пучка. – В кн.: VI Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. – Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1986, ч.1, с.195–197.

7. Седых С.Н. Транспортировка интенсивного электронного пучка в магнитной периодической фокусирующей системе. – В кн.: VI Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. – Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1986, ч.1, с.198–200.

8. Мамет А.М., Пономарев А.А., Седых С.Н. Экспериментальные исследования ЭОС высокопервоантной электронной пушки. – В кн.: VII Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике.

Тезисы докладов. – Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1988, ч.2, с.246–248.

9. Водопьянов Ф.А., Андриющенко-Луценко Н.И., Душин Ю.Ф., Мамет А.М., Северинов Л.Г., Седых С.Н. Экспериментальные исследования источников электронов релятивистских СВЧ генераторов. – В кн.: Теория и техника релятивистских СВЧ генераторов. – М.: РТИ АН СССР, 1988, с.22–31.

10. Седых С.Н. Динамика эмиттанса интенсивного пучка электронов в канале транспортировки. – В кн.: Теория и техника релятивистских СВЧ генераторов. – М.: РТИ АН СССР, 1988, с.175–184.

11. Водопьянов Ф.А., Душин Ю.Ф., Мамет А.М., Пономарев А.А., Северинов Л.Г., Седых С.Н. Макет ускорителя с полиэкраным генератором высокого напряжения. – В кн.: Электронные пучки и генерация СВЧ-излучений. – М.: МРТИ АН СССР, 1990, с.108–113.

12. Водопьянов Ф.А., Душин Ю.Ф., Северинов Л.Г., Седых С.Н. Ускорительная трубка с сопровождением частиц магнитным полем внешних постоянных магнитов. – В кн.: Электронные пучки и генерация СВЧ-излучений. – М.: МРТИ АН СССР, 1990, с.114–119.

13. Седых С.Н. Анализ и оптимизация магнитных периодических фокусирующих систем в параксиальном приближении. Препринт 9104. – М.: МРТИ АН СССР, 1991, –23с.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июня 1994 года.

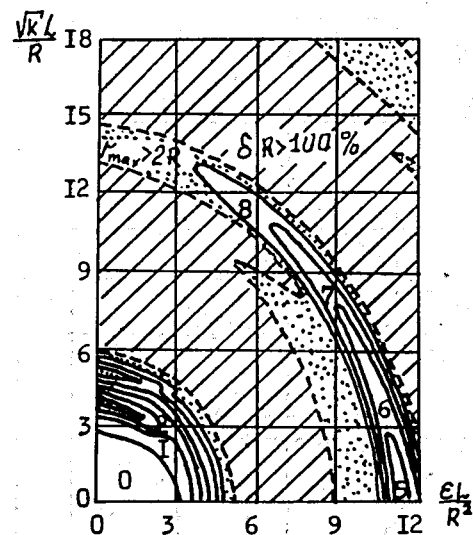


Рис. 1. Диаграмма устойчивости для МПФС с синусоидальным распределением поля.

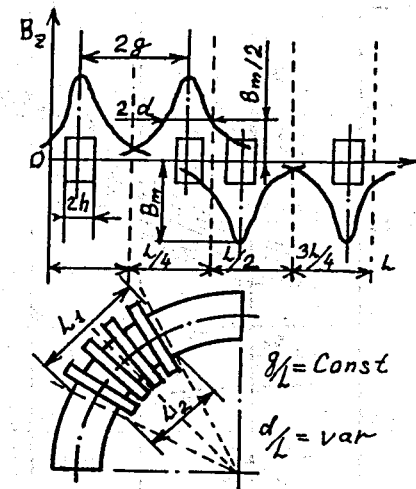


Рис. 2. Геометрические соотношения для МПФС, составленных из одиночных линз.

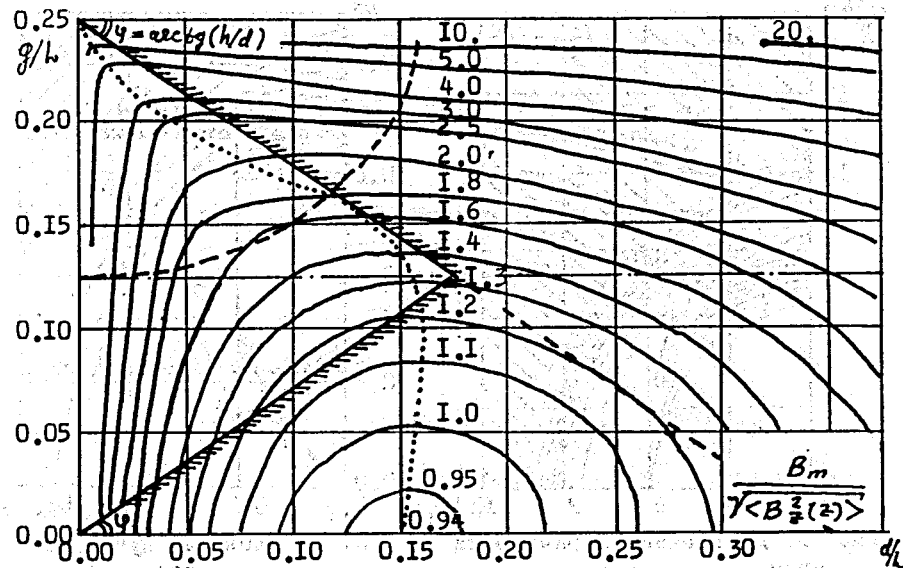


Рис. 3. Отношение амплитуды поля одиночной линзы  $B_m$  к среднеквadraticному полю составленной из таких линз МПФС  $\sqrt{B_z^2(z)}$ .

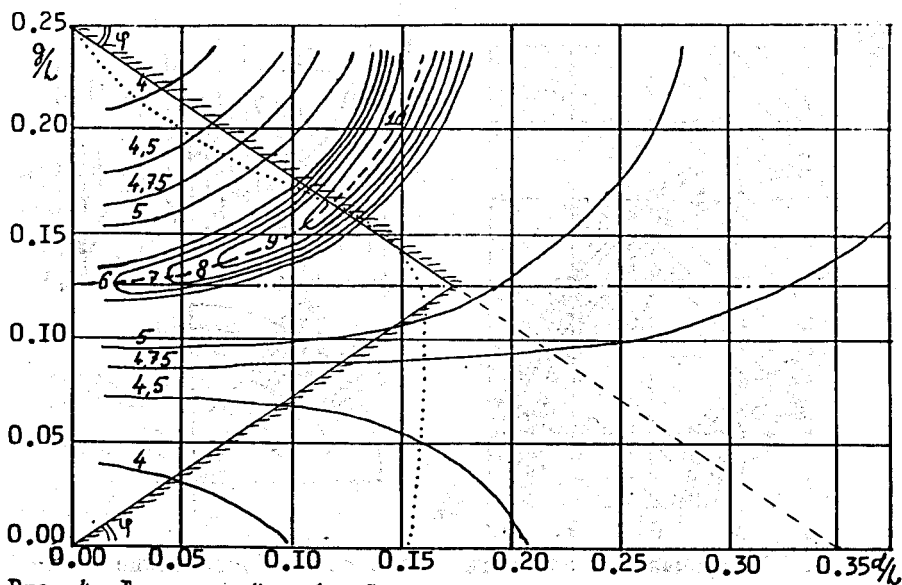


Рис. 4. Допустимый набег фазы одночастичных колебаний (радиан) на периоде МПФС, составленной из одиночных линз.

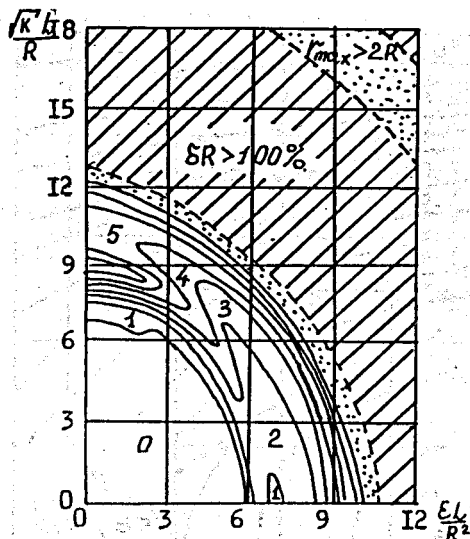


Рис. 5. Диаграмма устойчивости для МПФС из одиночных линз при  $d/L = 0,12$  и  $g/L = 0,17$ .

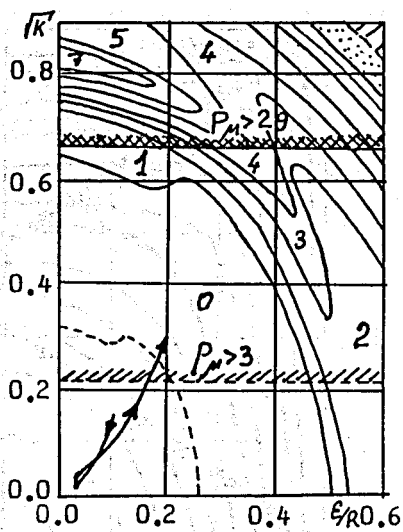


Рис. 6. Эволюция пучка релятивистского СВЧ генератора в МПФС ( $d/L = 0,12$ ;  $g/L = 0,17$ ).