

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени
М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



ЕГОРОВ Роман Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛИСТРОНОВ БОЛЬШОЙ
МОЩНОСТИ – ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

01.04.03 – радиофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Саввин Владимир Леонидович,
к.ф.-м.н., доцент

Москва, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛИСТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	11
§ 1.1. Введение	11
§ 1.2. Проблемы при разработке клистронных усилителей	14
§ 1.3. Текущее положение и перспективы клистронных усилителей для ускорителей ..	17
§ 1.4. Выводы	19
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА.....	21
§ 2.1. Введение	21
§ 2.2. Группировка электронов	22
§ 2.2.1. Традиционная группировка электронов	25
§ 2.2.2. COM – метод группировки электронов	27
§ 2.2.3. CSM – метод группировки электронов	28
§ 2.2.4. 3D метод группировки электронов	30
§ 2.3. Выводы	32
ГЛАВА 3. БАК – МЕТОД ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА	33
§ 3.1. Введение	33
§ 3.2. Методы расчёта электродинамики в одномерных программах.....	36
§ 3.3. Описание БАК – метода группировки электронного потока.....	45
§ 3.4. Оптимизация первого экспериментального БАК - клистрона.....	50
§ 3.5. Два БАК – колебания ядра для клистрона с высокой эффективностью	56
§ 3.6. Выводы	62
ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ БАК - КЛИСТРОНА	64
§ 4.1. Введение	64
§ 4.2. 3D модель кольцевого резонатора	65
§ 4.3. Электронная оптика и магнитная система	74

§ 4.4. Исследование выходного резонатора с волноводным трактом	78
§ 4.5. Моделирование распределения электронов на коллекторе	81
§ 4.6. Выводы	84
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПЕРВЫХ БАК – КЛИСТРОНОВ	86
§ 5.1. Введение	86
§ 5.2. Механизм вакуумной подстройки резонаторов	86
§ 5.3. Экспериментальный БАК – клистрон и холодные измерения	89
§ 5.4. Динамические испытания	91
§ 5.4.1. Испытания в ОИЯИ г. Дубна	92
§ 5.4.2. Испытания в ЦЕРН г. Женева	95
§ 5.4.3. Калориметрические измерения	101
§ 5.5. Сравнение с прототипом	104
§ 5.6. Динамические испытания второго клистрона	106
§ 5.7. Сравнение с зарубежными аналогами	107
§ 5.8. Увеличение выходной мощности БАК-клистронов	109
§ 5.9. Выводы	113
ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОНЕ	115
§ 4.1. Введение	115
§ 4.2. Результаты численного моделирования динамики клистрона в 3D	118
§ 4.3. Сравнение результатов трёхмерной программы с одномерной теорией	122
§ 4.4. Распределение электрического поля во входном резонаторе	126
§ 4.5. Выходной резонатор и максимально возможный теоретический КПД клистрона	129
§ 4.6. Выводы	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
ЛИТЕРАТУРА	144

ВВЕДЕНИЕ

Микроволны широко применяются в наземных и спутниковых системах связи, передачи информации, в промышленности и сельском хозяйстве, в научных исследованиях – от экспериментов на суперколлайдерах и изучения электронных свойств твердых тел до медицинских исследований (ЯМР-томография). Быстрый прогресс в области СВЧ техники в значительной мере связан с изобретением специальных электровакуумных приборов – магнетронов, клистронов, ламп бегущей волны и др., способных генерировать и усиливать микроволновые сигналы большой мощности. Достижения последних лет по созданию уникальных ускорителей элементарных частиц во многом связаны с разработкой мощных клистронов для питания ускоряющих секций.

Повышение выходной мощности и эффективности таких клистронов является актуальной задачей, требующей фундаментальных исследований физических процессов взаимодействия электронного потока с полями электродинамических и электронно-оптических систем. Для детального изучения рассматриваемых процессов широко применяются численные модели и компьютерное моделирование с использованием специальных пакетов программ, облегчающие разработку микроволновых клистронных усилителей большой мощности. Для повышения выходной мощности и эффективности современных клистронов разрабатываются многолучевые схемы и новые методы группирования электронного потока.

В предлагаемой диссертационной работе изложены результаты исследований физических процессов взаимодействия электронного потока с полями электродинамических и электронно-оптических систем клистронов большой мощности, проведенных методами компьютерного моделирования с использованием новой методики группирования электронного потока, приведены результаты практической разработки опытных образцов клистронов и экспериментальные результаты их тестирования, изучена возможность увеличения выходной мощности на базе разработанной конструкции.

Актуальность работы

Главными задачами при исследовании процессов с последующей практической реализацией современных приборов СВЧ электроники в микроволновом диапазоне длин волн на текущий момент являются:

- 1) Повышение эффективности преобразования энергии электронных пучков в энергию электромагнитных колебаний и волн; повышение КПД СВЧ приборов.

- 2) Повышение выходной мощности СВЧ приборов, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режиме.
- 3) Уменьшение питающего напряжения высоковольтного источника.
- 4) Уменьшение массы и габаритов микроволновых усилителей и генераторов.
- 5) Уменьшение стоимости производства вакуумных устройств.

Традиционно главная роль отводится решению первых двух задач: создание высокоэффективных и мощных СВЧ устройств.

В настоящее время в микроволновой электронике вопрос повышения эффективности и выходной мощности приборов решается применением многолучевой технологии на основе пучков круглого или кольцевого сечения, а также применением ленточного пучка. Такие подходы дают возможность осуществить одновременно большой общий ток пучков и низкую плотность пространственного заряда (меньший первичный пучок), а также снизить энергопотребление магнитной системой или избежать его использованием постоянных магнитов, тем самым обеспечив высокую эффективность СВЧ устройств.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведённые в последние годы, продемонстрировали перспективность клистронов с новыми методами группировки электронного потока. На текущий момент существуют образцы клистронов, использующие СОМ – метод (core oscillation method) группировки пучка, предложенный Байковым А. Ю. и Петровым Д. М. в 90-е годы 20 столетия [1-2].

Большое внимание в работе уделяется БАК – методу или по-английски ВАС – метод группировки электронов, происходящий от слов «bunching» (группировка), «alignment» (выравнивание), «collecting» (сбор), предложенного Гузиловым И. А. в 2014 году [3-5]. Теоретические и экспериментальные работы, результаты которых изложены в предлагаемой диссертации, продемонстрировали возможность и перспективность применения БАК – метода для увеличения эффективности, выходной мощности применительно к мощным приборам СВЧ, таких как клистроны. Рассмотрению этого метода выделена одна из глав диссертации.

Цели и задачи диссертационной работы

- теоретическое и экспериментальное изучение нового метода группирования электронного потока для повышения эффективности мощных многолучевых и однолучевых клистронов;

- проведение теоретических расчётов электродинамической системы БАК – клистрона в одномерных, двумерных и трёхмерных программах, определение модового состава и структуры мод резонаторов электродинамической системы клистрона в трёхмерных программах, исследование распределения характеристического сопротивления в каналах резонаторов, оптимизация электродинамической системы, включая способы подавления «паразитных» видов колебаний и вакуумную «подстройку» частот резонаторов;

- проведение расчётов «электронно-оптической» системы пролётного клистрона, определение необходимого профиля магнитного поля в рабочих промежутках между полюсными наконечниками;

- проведение «холодных измерений» частот и характеристических сопротивлений всех резонаторов, выравнивание распределения характеристического сопротивления во всех каналах резонаторов;

- экспериментальное исследование разработанных клистронов большой мощности, проведение динамических испытаний в диодном режиме и в режиме СВЧ;

- сравнение характеристик разработанного клистрона с параметрами клистрона, взятого за прототип, и с современными зарубежными аналогами того же уровня выходной мощности;

- возможность повышения выходной мощности БАК – клистронов на основе разработанной конструкции и возможность применения нескольких БАК – колебаний для получения эффективности выше 80%;

- трехмерное моделирование электронных процессов в мощных многолучевых клистронах с целью выявления физических ограничений на эффективность усиления;

- выработка рекомендаций к условиям группирования на основе полученных исследований.

Научная новизна

1) Впервые проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование БАК – метода группировки электронного потока в мощных клистронных усилителях, предложенного И.А. Гузиловым.

2) Впервые в мире был разработан, сконструирован и испытан импульсный многолучевой БАК – клистрон в S – диапазоне длин волн с выходной импульсной мощностью 6 МВт.

3) Результаты динамических испытаний БАК – клистронов значительно превосходили результаты испытаний клистрона, взятого за прототип, а также характеристики зарубежных однолучевых аналогов. Показано, что эффективность новых клистронов выше на 15-20%, энергопотребление меньше в 1,5 раза, рабочее напряжение ниже в 2,5 раза по сравнению с зарубежными однолучевыми клистроном, в 2 раза меньше масса и габариты, ниже уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора.

4) Показана возможность увеличения выходной импульсной мощности разработанного БАК – клистрона.

5) Проведено исследование и определены условия реализации оптимальной группировки электронных сгустков для реализации КПД выше 80% в клистромах L-диапазона частот.

6) Впервые создана трёхмерная модель мощного многолучевого клистрона, проведено трехмерное моделирование процессов группировки и отбора энергии в выходном резонаторе, выявлены физические факторы, ограничивающие КПД в многолучевых клистромах.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается экспериментами, проведёнными с двумя образцами разработанных многолучевых клистронов с выходной мощностью 6 МВт в S – диапазоне частот, а также теоретическими расчётами с использованием одномерных, двумерных и трёхмерных программ, применяемых при разработке однолучевых и многолучевых клистронов.

Практическая значимость

1) Теоретически и экспериментально подтверждена перспективность БАК – метода группировки электронного потока для разработки широкого класса клистронных усилителей в L, S – диапазонах частот.

2) Сконструированные и испытанные клистроны обладают большой выходной мощностью (6 МВт и более), высокой эффективностью (КПД более 60%), работают при

меньшем питающем напряжении по сравнению с зарубежными аналогами, используя фокусирующую систему на базе постоянных магнитов.

3) Внедрение результатов работы позволит создать новое поколение мощных клистронов, превосходящих отечественные и зарубежные аналоги. Разработанные многолучевые БАК - клистроны S – диапазона могут быть использованы в ускорительной технике, в радиолокационных системах, системах радиоэлектронной борьбы.

Основные положения, выносимые на защиту

1) БАК – метод группировки электронного потока демонстрирует увеличение эффективности до 64% клистронных усилителей с уровнем выходной мощности 6 МВт в S – диапазоне длин волн, что на 15-20% выше по сравнению с прототипом и зарубежными аналогами.

2) Применение нескольких БАК – колебаний для группировки электронов повышает КПД однолучевых клистронов L-диапазона до 80% и выше при сохранении габаритов усилителей.

3) Трёхмерная модель мощного многолучевого клистрона, созданная впервые, позволяет проводить трехмерный анализ процессов группировки в многолучевых клистромах.

4) Трёхмерное моделирование процессов энергообмена в выходном резонаторе многолучевых клистронов показывает, что основным физическим ограничением эффективности усиления является интерференция волн в щели связи сверхразмерных кольцевых выходных резонаторах.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных российских и международных конференциях и семинарах: Международный семинар CLIC Workshop – 2016 (Женева, 2016), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2016 (Москва, 2016), XV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016») (Красновидово, 2016), Международная конференция вакуумных электронных источников IVESC – 2016 (Сеул, Южная Корея, 2016), Международная конференция

вакуумной электроники IVEC – 2017 (Лондон, 2017), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2017 (Москва, 2017), факультетский конкурс научных студенческих работ имени Р. В. Хохлова (Москва, 2017), 61 Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2018), XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2019»). По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 7 научных статей в реферируемых изданиях из списка ВАК.

Ценность научных работ соискателя состоит в том, что в опубликованных работах отражены результаты научных теоретических и экспериментальных исследований, подтвердивших перспективность нового метода группирования электронных пучков. Достигнутый в эксперименте уровень эффективности мощных многолучевых клистронов значительно (на 15-20%) превышает КПД лучших отечественных и зарубежных аналогов. Разработанные в диссертации подходы и предложения с применением различных программных комплексов, используемых для практической реализации клистронов, можно внедрять для увеличения выходной мощности и эффективности существующих однолучевых и многолучевых клистронов.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии. Соискателем самостоятельно проводились расчеты группирователя в усилительной части клистронов, высокочастотных полей в резонаторах электродинамической системы, токопрохождения и электронной оптики многолучевого потока, профиля магнитного поля в каналах резонаторов, высокочастотного поля в выходном резонаторе, оптимизация группирователя клистронов. Автор самостоятельно проводил настройку частот и распределения высокочастотных полей на «холодных» измерениях и участвовал в динамических испытаниях новых клистронов большой мощности. Впервые автор самостоятельно создал трёхмерную модель многолучевого клистронов для изучения физических процессов группировки и отбора энергии. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, шесть глав, заключение и список литературы из 134 наименований. Объем диссертации: страниц - 154, число рисунков 120.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛИСТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

§ 1.1. Введение

Клистроны являются основными источниками СВЧ – мощности для современных ускорителей [6], включая большой адронный коллайдер (LHC), для ускорителей медицинского назначения, для передачи энергии на большие расстояния, для радаров [7-8], энергетических передатчиков и для многих других устройств, использующих СВЧ энергию [9-11].

В вакуумной СВЧ электронике уже на протяжении многих лет ключевыми вопросами остаются повышение выходной мощности, эффективности, увеличение полосы рабочих частот клистронных усилителей (возможна выходная мощность в 10% полосе частот в S – диапазоне длин волн), а также уменьшение энергопотребления. Дальнейшее увеличение выходной мощности однолучевых клистронов, использующих электронные пучки круглого или кольцевого сечения, ограничено уровнем тока при заданном напряжении высоковольтного источника. Максимальная пиковая выходная мощность ограничена высокочастотным пробоем, который зависит от длительности импульса.

В последние десятилетия получило активное развитие направление, связанное применением многолучевой технологии, с целью практического увеличения выходной мощности клистронных усилителей и уменьшения энергопотребления источников высокого напряжения [12-13]. В многолучевых конструкциях удается совместить преимущества клистронных усилителей: большую выходную микроволновую мощность, высокий КПД, высокий коэффициент усиления. Теория многолучевых устройств была развита в 40-50-е годы прошлого столетия в Советском Союзе. Отечественные инженеры, работавшие в центре вакуумной электроники «Исток», разработали большое семейство многолучевых клистронов для радиолокации и связи [14-18]. При разработке устройств с более чем 40 пучками должны решаться многие сложные проблемы, включая передачу тока в пространстве взаимодействия, устранение отраженных частиц в коллекторе.

Многолучевые клистроны в диапазоне частот от сотен МГц вплоть до 100 ГГц [19-28] обладают очевидными преимуществами по сравнению с однолучевыми клистроном с цилиндрическими электронными пучками [29]. Совместно с высокой эффективностью,

усилением, выходной мощностью значительный интерес представляет низкое действующее напряжение. Низкие напряжения существенно уменьшают длину и вес клистронов, устраняют необходимость использования масляных баков для трансформатора, питающего модулятор, а также массогабаритные параметры источника высокого напряжения.

Самый отличительный параметр любого многолучевого клистрона – это низкое катодное напряжение, которое значительно меньше, чем у однолучевого клистрона при одинаковом уровне выходной СВЧ мощности:

U_N – напряжение многолучевого клистрона, U_1 – напряжение однолучевого клистрона, p_1 и p_N , η_1 и η_N – первеансы и эффективности однолучевого и многолучевого клистрона соответственно.

$$p_1 = \frac{I_1}{U_1^{3/2}} \quad (1.1)$$

$$p_N = \frac{I_N}{U_N^{3/2}} \quad (1.2)$$

$p_N = N \cdot p_{1N}$ – первеанс всех пучков многолучевого клистрона равен сумме первеансов отдельных пучков. Имеем соотношение, связывающее напряжение многолучевого клистрона с напряжением однолучевого клистрона той же мощности [11].

$$U_N = U_1 \cdot N^{-0.4} \cdot \left(\frac{p_1}{p_{1N}}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\eta_1}{\eta_N}\right)^{0.4} \quad (1.3)$$

Пересчитав соотношение (1.3), получаем связь тока в многолучевом клистроне и однолучевом клистроне (1.4) при одинаковом уровне мощности пучка и эффективности.

$$I_N \sim I_1 \cdot N^{0.4} \quad (1.4)$$

Очевидные преимущества уменьшения рабочего напряжения включают меньший вес, объём клистрона и увеличенную надёжность. Поскольку низкие напряжения пучков приводят к меньшему уровню рентгеновского излучения на коллекторе, вес экранировки на коллекторе может быть значительно снижен.

Поскольку длины труб дрейфа L_{dr} и скорости электронов v_z пропорциональны квадратному корню из ускоряющего напряжения $L_{dr}, v_z \sim \sqrt{U_0}$ при нерелятивистских напряжениях ($U_0 \ll 511$ кВ), общая длина пространства взаимодействия (зазоры резонаторов и трубки дрейфа) будут пересчитаны как квадратный корень из напряжения пучка. Уменьшение напряжения приведёт к уменьшению общей длины вакуумного прибора.

$$L_N \sim L_1/N^{0,2} \quad (1.5)$$

Первеанс парциальных пучков в многолучевых клистроны, как правило, невелик 0,3-1,0 мкА/В^{1,5}, но из-за большого числа пучков общий поток электронов имеет относительно большой первеанс, достигающий до значений десятков мкА/В^{1,5}, и, следовательно, низкое общее сопротивление. В результате удаётся уменьшить высокое напряжение в 2÷5 раз по сравнению с однолучевыми приборами, что приводит к уменьшению веса и габаритов клистронов, и соответственно габаритов источников их питания. Отдельные низкопервеансные пучки качественнее группируются и более эффективно отдают свою энергию в энергию высокочастотных колебаний, что существенно повышает эффективность клистронов [30]. Все последние разработки новых мощных многолучевых клистронов были направлены в сторону уменьшения рабочего напряжения и увеличения числа пучков.

Полоса частот многолучевого клистрона основана на стандартном предположении, что полоса частот выходного резонатора клистрона ограничена, она может быть определена как

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{Q_L} = M^2 \rho \left(\frac{I_0}{U_0} \right) \quad (1.6)$$

Q_L – нагруженная добротность выходного резонатора, M – коэффициент взаимодействия, ρ – волновое (характеристическое) сопротивление выходного резонатора, U_0 и I_0 – катодное напряжение и общий ток пучка соответственно.

Специалисты и исследователи всего мира разрабатывают многолучевые клистроны. Например, в Китае в последние 20 лет было разработано множество многолучевых клистронов в диапазоне частот от L до К с уровнем выходной мощности от нескольких сотен Вт до нескольких сотен кВт [31-37]. Максимальная средняя мощность этих клистронов составляет 11 кВт, максимальная рабочая полоса частот около 12% у клистрона

KS4116A. Большинство клистронов работает с резонаторами на фундаментальной моде TM_{100} . Клистрон KC4148B – широкополосный клистрон в С – диапазоне частот с полосой частот 8,5% с пиковой выходной мощностью 150 кВт [35].

Партнёры военно-морской исследовательской лаборатории (США) начали программу развития широкополосного многолучевого клистрона в 2002 году. Три многолучевых клистрона были разработаны в S-диапазоне с максимальной мощностью 600 кВт. Электродинамическая система третьего клистрона состоит из семи резонаторов. Для этого многолучевого клистрона напряжение пучка и общий ток составляют 42 кВ и 42 А, соответственно. Получена выходная мощность 500 кВт в полосе пропускания 13% с пиком выходной мощности ~ 670 кВт [38].

С целью повышения выходной мощности клистронов возможно применение ленточных электронных потоков. Теория ленточных электронных пучков развивалась в 50-60-е годы прошлого века, но из-за невозможности создать точные аналитические модели ленточных пучков применение ограничивалось лишь приборами небольшой мощности. С развитием численных методов моделирования, различных одномерных, двумерных, трёхмерных программ и увеличением производительности персональных компьютеров появилась возможность анализа физических процессов ленточных потоков. Это объясняет повысившийся интерес к тематике ленточных электронных потоков [39-56]. Рассматриваются также варианты применения цилиндрических пучков кольцевого сечения с целью увеличения качества группирования [57].

§ 1.2. Проблемы при разработке клистронных усилителей

Разработка мощных пролётных клистронных усилителей требует решения ряда сложных задач, в числе которых [58]:

1) формирование мощных электронных пучков, которые должны с меньшим токооседанием проходить пролётные каналы и зазоры резонаторов;

2) обеспечение электрической прочности изоляторов, междуэлектродных промежутков, зазоров резонаторов при очень высоких напряжениях с целью исключения пробоев;

3) рассеяние в виде тепла высокой средней мощности на коллекторе, а также применение системы охлаждения для отвода тепла, экранирование рентгеновского излучения со стороны коллектора

- 4) вывод большой микроволновой мощности из выходной системы клистрона;
- 5) конструирование резонаторов с возможностью регулировки их частот.

Достижение высоких параметров в одном клистроне требует системного анализа всех физических процессов, как электродинамических, так и электронных. Современные программные комплексы позволяют проводить такие исследования.

Более 50 лет компьютерное моделирование применяется для проектирования и теоретических исследований физических процессов в клистронных усилителях. Изначально программы использовались с целью понимания принципов работы клистрона, а позже их стали использовать для улучшения основных характеристик клистрона таких, как выходная мощность, КПД, усиление, рабочая полоса частот, а также для удешевления полного процесса проектирования.

Для теоретического исследования процессов в клистронных усилителях необходимо решать несколько различных физических задач [59]. Основными из них являются следующие:

- 1) Решение задачи группирования электронного пучка в усилительной части клистрона. При решении этой задачи необходимо корректно решить задачу взаимодействия пучка с электромагнитными полями резонаторов при движении сформированных сгустков в трубе дрейфа. Для решения таких электродинамических задач используется метод эквивалентных схем. Современные (1D, 2D) программные комплексы позволяют решать эту задачу с учётом пространственного заряда. Модель заряженных частиц в таких программах, как правило, представляется в виде последовательности заряженных дисков, поскольку аналитически решить уравнения (1) для многих частиц не представляется возможным. В релятивистском случае уравнения движения электронов имеют вид (СГС):

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}} \left\{ \vec{E}_i + \frac{1}{c} [\vec{v}_i \times \vec{B}_i] - \frac{\vec{v}_i}{c^2} \cdot (\vec{v}_i \cdot \vec{E}_i) \right\} \quad (1.7)$$

Уравнения (1.7) движения $i = 1, \dots, n$ заряженных частиц, где \vec{v}_i – скорость i -частицы, $\vec{E}_i = \vec{E}_{i\text{вн}} + \vec{E}_{i\text{пр.з}}$ – вектор напряженности электрического поля ($\vec{E}_{i\text{вн}}$ – внешнее электрическое поле, действующее на i – частицу, $\vec{E}_{i\text{пр.з}}$ – поле пространственного заряда, действующее на i – частицу), \vec{B}_i – вектор индукции магнитного поля в точке нахождения частицы.

2) Решение задачи на собственные значения для резонаторов клистронов для определения собственных частот, добротности, волнового или характеристического сопротивления, распределения электрических и магнитных полей. Эти задачи необходимо решать, используя трёхмерную модель каждого резонатора. Также необходимо проводить анализ не только основной (рабочей) моды колебаний, но и других (высших) типов колебаний, которые могут оказать существенное влияние на работу прибора (паразитное самовозбуждение).

3) Решение задачи электронной оптики и формирования электронного пучка в электрическом и магнитном полях. Следует отметить, что от корректности решения этой задачи будет зависеть правильность анализа дальнейших частей прибора, так как решение этой задачи не только определяет энергию и ток пучка, но и его размер, форму, структуру (распределение плотности заряда внутри) и токопрохождение до коллектора.

4) Решение задачи энергообмена в выходной системе прибора. Оптимизация выходной системы прибора – это сложная задача, требующая не только корректного решения, но и анализа напряженности электромагнитного поля для предотвращения пробоев в выходной структуре. Также необходимо провести анализ высших типов колебаний и их взаимодействия с пучком для предотвращения перекачки энергии в эти высшие виды колебаний и возможного самовозбуждения системы.

5) Решение задачи вывода «отработанного» после выходной системы пучка в коллекторную систему и решение задачи равномерного оседания пучка на её поверхности.

6) Развитие клистронов миллиметрового диапазона длин волн требует проведения тепловых расчётов электродинамических систем. Например, расчёт электронных пушек, так как при нагреве катода изменяются геометрические параметры системы, что в свою очередь оказывает влияние на характеристики пучка. Возможно также изменение геометрических размеров резонаторов, что ведёт к перестройке их частот и, следовательно, к изменению взаимодействия электронных пучков с электродинамической системой.

Современное развитие вычислительной техники позволяет решать эти задачи отдельно за разумное время. Особо следует отметить, что перед тем как использовать ту или иную программу для практического применения, необходимо постоянно проводить сравнение расчётов этой программы с результатами экспериментальных испытаний, с другими программами или аналитическими моделями и решениями [59].

§ 1.3. Текущее положение и перспективы клистронных усилителей для ускорителей

Для разрабатываемых в настоящее время сверхмощных ускорителей, таких как Future Circular Collider (FCC) и Compact Linear Collider (CLIC), базирующихся в Европейской организации ядерных исследований (CERN), в качестве основных источников большой СВЧ – мощности предполагается использовать клистроны. Например, для кольцевого ускорителя FCC с длиной туннеля около 100 км, проект которого должен быть готов к 2019 г., в качестве основных СВЧ-источников рассматриваются однолучевые клистроны непрерывного режима с частотой 800 МГц и выходной мощностью около 1,5 МВт. Клистроны с эффективностью выше 80% - ключевые устройства для будущего поколения крупных ускорителей. Вопрос о КПД таких клистронов является крайне важным. [60-61]

К настоящему времени в Европейскую организацию ядерных исследований (CERN) три организации поставили многолучевые клистроны с выходной мощностью 10 МВт, работающие на частоте сигнала 1,3 ГГц [62]. Все клистроны имеют горизонтальную конфигурацию (рис. 1.1.), оснащены магнитной фокусировкой, выполненной из соленоидов [63]. Все клистроны уже работают более нескольких тысяч часов. Дальнейшая работа будет заключаться в увеличении выходной мощности до 20 МВт и реконструкции клистронов на частоту входного сигнала 1 ГГц с целью их применения в электрон-позитронном линейном коллайдере с энергией частиц 3 ТэВ.



Рис. 1.1. Многолучевые клистроны трёх производителей а) Toshiba E3736 б) Thales TH-1802 в) CPI VKL-8301B.

Компания Toshiba (Япония) начала разрабатывать многолучевую клистрон (E3736) в 2003 году (рис. 1.1а) [64-66]. Они используют резонаторы в форме кольца, работающие на

фундаментальной моде TM_{100} . Через эти резонаторы проходят 6 пролётных каналов. Разделение каналов в 6 см позволяет использовать большие катоды (диаметр катода 38 мм), а плотность тока катода составляет $2,1 \text{ А/см}^2$, что примерно в 2,5 раза меньше, чем у клистрона ТН-1802, это позволяет увеличить время жизни катодов. С достаточным разделением каналов и большими размерами катода клистрон Е3736 имеет массу 340 кг, что на 13% тяжелее ТН-1801. В настоящее время клистрон Е3736 показывает лучшую эффективность среди этих образцов 68,8% при выходной мощности 10,0 МВт.

Многолучевой клистрон ТН-1802 был разработан около 20 лет назад (рис. 1.1б) [67-68]. Конструкция электродинамической системы имеет 7 пролётных каналов (6 по азимуту и 1 в центре) Они проходят через центр общих цилиндрических резонаторов, работающих на фундаментальной моде TM_{100} . Первый недостаток этой конструкции – это достаточно близкое расположение каналов к центру клистронного усилителя. Маленькие катоды и небольшое сжатие площади пучка (9 к 1) приводят к высокой плотности тока ($5,5 \text{ А/см}^2$), которая влияет на время жизни катода. Вторым недостатком – резонатор, настроенный на вторую гармонику, который не практичен в такой конфигурации. Резонатор второй гармоники влияет на длину клистрона и в некоторой степени на его эффективность. Клистрон организации Талес (Франция) продемонстрировал наиболее скромную эффективность из представленных клистронов 63% (рис. 1.1).

Первый многолучевой клистрон компании СРІ (США) с мощностью 10 МВт в L – диапазоне частот был разработан около 15 лет назад [69-70]. Клистрон VKL-8301А имел шесть резонаторов, шесть пучков, входной и выходной резонаторы были настроены на моду TM_{200} , остальные резонаторы прибора – на основной вид колебаний TM_{100} . По сравнению с клистроном организации Thales конструкция резонаторов с модой высокого порядка и с большим разделением пучков позволила использовать большие катоды, тем самым увеличить время их жизни. Этот клистрон, очевидно, был неудачным, КПД едва достигал 59% (по сравнению с заявленным 65%). Скорее всего, это произошло из-за расстройки частоты отдельных резонаторов усилителя.

Второе поколение клистронов (VKL-8301В) было разработано в конце 2006 года (рис. 1.1в). В клистроне используются кольцевые резонаторы с рабочей модой колебаний TM_{100} , похожие на резонаторы конструкции клистрона Toshiba Е3736. Примечательно, что первоначальные испытания, проведенные при пониженных частоте повторения и ширине импульса, продемонстрировали пик выходной мощности 11.2 МВт и КПД 74%. Амплитудно – частотная характеристика показала, что рабочая полоса частот была

асимметрична и сдвинута по частоте. Кроме того, 15% тока пучка не доходило до коллектора. После настройки резонаторов и электронно – оптической системы клистрона эффективность снизилась до 67,8%, выходная мощность при этом была 10,4 МВт.

Реконструкция существующих клистронов с частоты 1,3 ГГц до 1,0 ГГц может привести к довольно мощным (~30 МВт) и эффективным (>70%) клистронам. Пересчёт существующей технологии показывает доказательства того, что 6 – лучевой клистрон с пиковой выходной мощностью 20 МВт может быть наилучшим вариантом клистрона L – диапазона длин волн для линейного ускорителя CLIC, обеспечивая высокую (>70%) эффективность, большое (>150 000 часов) время жизни и разумное рабочее напряжение катода (155 кВ) [62].

В связи с потребностью большого количества клистронов для новых суперколлайдеров Европейский центр ядерных исследований (CERN) стимулирует развитие клистронных технологий. Предприятию ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» было предложено провести разработку высокоэффективного клистрона S-диапазона (2,9985 ГГц) длин волн с выходной СВЧ – мощностью больше, чем 6 МВт, в которой автор диссертации принимал непосредственное участие.

§ 1.4. Выводы

1) Многолучевые клистроны обладают очевидными преимуществами по сравнению с однолучевыми клистронами с цилиндрическими электронными пучками. Совместно с высокой эффективностью, усилением, выходной мощностью значительный интерес представляет низкое действующее напряжение. Низкие напряжения существенно уменьшают длину и вес клистронов, устраняют необходимость использования масляных баков для трансформатора, питающего модулятор.

2) Разработка мощных усилительных клистронов требует решения ряда сложных проблем, в числе которых: формирование мощных электронных пучков; обеспечение электрической прочности изоляторов, междуэлектродных промежутков, зазоров резонаторов при очень высоких ускоряющих напряжениях; рассеяние в виде тепла высокой средней мощности на коллекторе с применением системы охлаждения; экранирование рентгеновского излучения; вывод большой микроволновой мощности из выходной системы клистрона, конструирование резонаторов с возможностью регулировки их частот.

3) Основными задачами, которые необходимо решать при теоретических исследованиях процессов в клистронных усилителях, являются: задача группирования

электронного пучка в усилительной части клистрона, задачи на собственные значения для резонаторов клистрона для определения собственных частот, добротности, характеристического сопротивления, распределения электрических и магнитных полей рабочей и «паразитных» мод колебаний, задачи электронной оптики и формирования электронного пучка в электрическом и магнитном полях, задачи энергообмена в выходной системе прибора, задачи вывода «отработанного» после выходной системы пучка в коллекторную систему, решение задачи равномерного осаждения пучка на её поверхности. Современное развитие вычислительной техники позволяет решать эти задачи за разумное время.

МЕТОДЫ ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

§ 2.1. Введение

Работы по управлению электронными потоками в целях создания генераторов и усилителей микроволнового диапазона частот были начаты еще в 30-х годах прошлого века [71-72]. С увеличением частоты сигнала применять метод сеточной модуляции тока электронов, который использовался в лампах с электростатическим управлением, становилось все более затруднительным. Это побудило искать новые методы управления, что в итоге привело к динамическому способу управления током электронного потока.

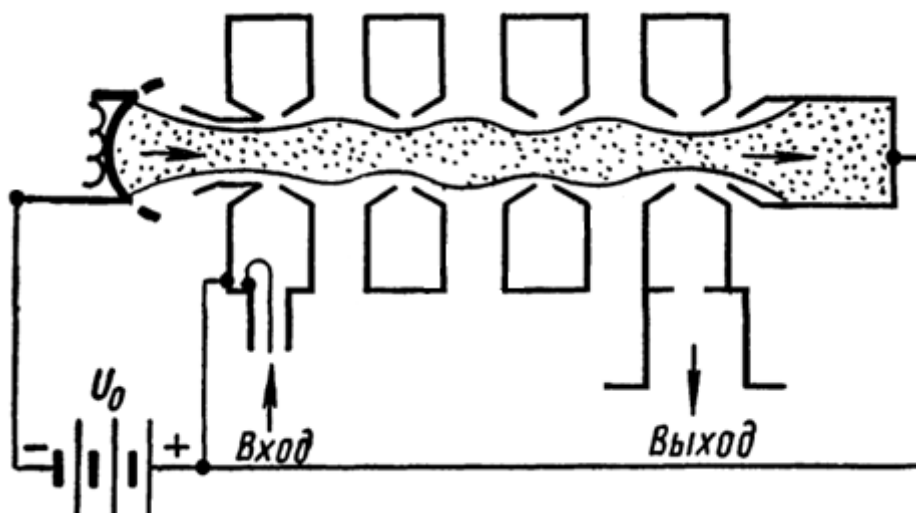


Рис. 2.1. Дискретное взаимодействие в приборах «О» типа.

Приборы диапазона СВЧ (клистроны, лампы бегущей и обратной волны, и т.д.), в которых применяется динамический метод управления электронным потоком, получили название приборов «О» типа. В случае дискретного (непродолжительного) взаимодействия (пролётный клистрон) электроны под действием СВЧ поля входного сигнала приобретают модуляцию скорости продольного движения. В этом случае одна часть электронов, проходящих ускоряющую фазу высокочастотного поля входного резонатора, получает увеличение скорости, а скорости другой части электронов уменьшаются, поскольку они попадают в тормозящую фазу поля. Дальнейшее движение модулированного по скорости потока электронов в пространстве дрейфа без поля приводит к смещению в направлении распространения одних электронов по отношению к другим. Замедленные частицы

отстают, а ускоренные их догоняют. В результате образуется электронное уплотнение (сгусток) [73]. Торможение электронных сгустков в СВЧ поле преобразует энергию электронного потока в энергию колебаний, отбираемую от потока выходным резонатором, создающим тормозящее поле (рис. 2.1).

В настоящее время в диапазоне СВЧ широкое распространение получили приборы с динамическим управлением электронным током. Динамический способ управления током применяется во всех устройствах СВЧ с прямолинейным электронным потоком [74-76]. Три процесса (скоростная модуляция электронного потока, группирование электронов и отбор энергии от потока) составляют основу явлений в приборах со скоростной модуляцией – клистронных усилителях.

В современных суперколлайдерах основными источниками СВЧ мощности являются клистроны, поэтому отечественными и зарубежными специалистами активизировались работы по улучшению выходных параметров клистронов. Перед исследователями и разработчиками встали задачи повышения эффективности, уменьшения питающих напряжений, энергопотребления высоковольтных источников, поэтому за последние 5 лет были предложены новые способы группировки электронов. Особое внимание в работе уделено БАК – методу группирования электронов.

§ 2.2. Группировка электронов

Электроны ускоряются постоянным высоким напряжением U_0 и затем, набрав скорость, двигаются к первому зазору. Модуляция электронов по скорости в этом зазоре осуществляется высокочастотным напряжением входного резонатора, амплитуда U_1 которого много меньше постоянного напряжения U_0 в приближении малого сигнала. Электроны подвергаются воздействию модулирующего сигнала $u = U_1 \sin \omega t_1$ в зазоре резонатора, где t_1 – момент времени прохождения электроном середины зазора, ω – частота модулирующего сигнала [73].

Продольная скорость электронов v_z на выходе первого зазора будет иметь вид:

$$v_z = v_{z0} \cdot \left(1 + \frac{M_1 U_1}{2U_0} \sin(\omega t_1 + \varphi)\right) \quad (2.1)$$

, где $v_{z0} = \sqrt{\frac{2e}{m}U_0}$ – скорость электронов, полученная ускоряющим напряжением U_0 , ω – частота модулирующего сигнала, φ – фаза высокочастотного поля, M_1 – коэффициент взаимодействия пучка в первом зазоре.

$$M_1 = \frac{\sin \frac{\theta_1}{2}}{\frac{\theta_1}{2}} \quad (2.2)$$

, где $\theta_1 = \frac{\omega d_1}{v_{z0}}$ – угол пролёта в первом зазоре, d_1 – ширина зазора.

После прохождения зазора резонатора электроны будут двигаться с разными скоростями вдоль оси z труб дрейфа. Ускоренные электроны будут догонять вылетевшие ранее замедленные электроны. В результате ток электронного пучка будет промодулирован на частоте ω сигнала. Происходящий процесс возникновения переменного тока при дрейфе модулированного потока называется процессом группирования.

Траектории электронов в пространстве дрейфа после взаимодействия с полем первого резонатора в зависимости от фазы высокочастотного поля и времени влёта электронов представлено на пространственно – временной диаграмме (рис. 2.2).

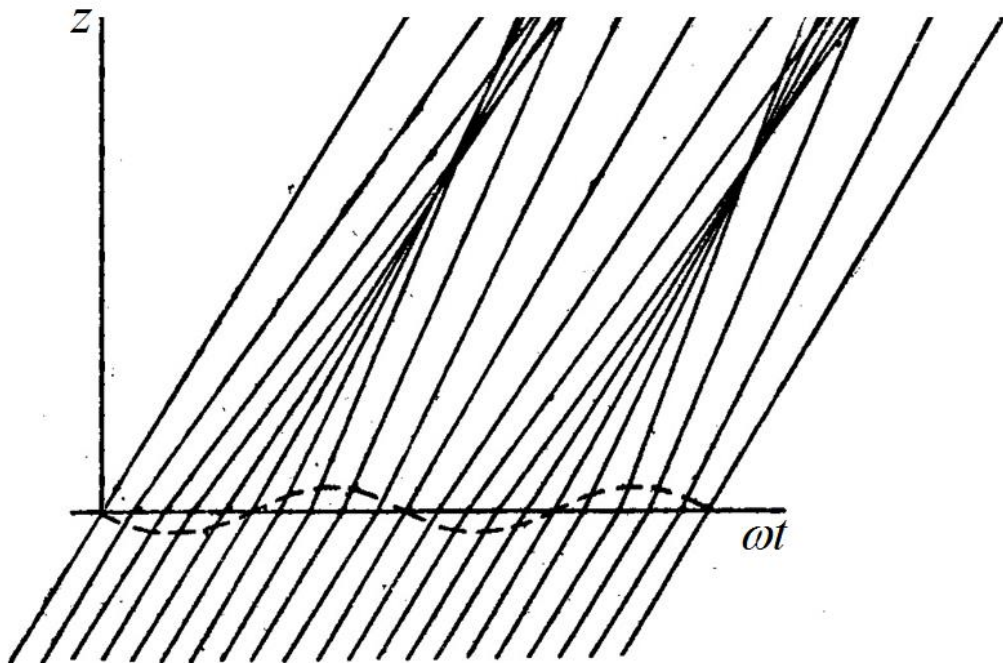


Рис. 2.2. Пространственно – временная диаграмма движения электронов после прохождения зазора первого резонатора.

В области $z < 0$ электронный поток имеет однородную плотность (траектории изображены параллельными прямыми через одинаковые интервалы времени), и электроны влетают с одинаковыми скоростями (траектории имеют одинаковый наклон). Точки пересечения траекторий с осью времени определяют фазу высокочастотного поля и время влёта электронов в середину зазора первого резонатора. Модуляция скорости электронного потока модулирующим сигналом $u = U_0 \sin \omega t_1$ приводит к периодическому изменению наклона прямых.

Электроны, проходящие высокочастотное поле в ускоряющей фазе, получают приращение скорости, и наклон прямой увеличивается. Максимальный наклон будут иметь те частицы, которые проходят зазор резонатора в фазы, близкие к амплитуде высокочастотного поля. Скорость электронов, проходящих модулирующее поле в тормозящей фазе, уменьшается, также и уменьшается наклон прямой на пространственно – временной диаграмме. Соответственно, минимальную скорость после прохождения первого резонатора будут иметь электроны, проходящие амплитуды тормозящей фазы высокочастотного поля. Для электронов, которые пересекают резонатор в момент нуля высокочастотного поля, наклон прямой остаётся неизменным, скорость таких электронов остаётся постоянной.

В случае идеальных сеток входного резонатора токооседанием на сетках можно пренебречь. Пренебрегаем оседанием электронов на стенках пролётных труб дрейфа, считая, что электронный пучок находится в большом постоянном продольном магнитном поле. Таким образом, средний конвекционный ток электронных пучков одинаков в любом сечении, и может быть представлен выражением:

$$I = \frac{I_0}{1 - X \cdot \cos(\omega t_1 + \varphi)} \quad (2.3)$$

, где I_0 – ток пучка, X – параметр группировки. Параметр группировки может быть записан в виде:

$$X = \frac{\omega s M_1 U_1}{v_{z0} 2U_0} \quad (2.4)$$

, где s – расстояние от центра зазора до некоторой точки области дрейфа.

В настоящее время представленный механизм продольного группирования электронов используется в пролётных клистродах, а также и в других устройствах СВЧ электроники. С целью увеличения выходной мощности и повышения эффективности приборов первоначально были сконструированы многорезонаторные, а затем многолучевые клистроны.

Следует отметить, что при разработке устройств электроники СВЧ необходимо учитывать ограничения, связанные с возрастающим действием полей пространственного заряда при формировании более компактных электронных сгустков.

§ 2.2.1. Традиционная группировка электронов

В традиционной группировке электронного потока формируются сгустки электронов с помощью воздействия на электронный поток последовательно расположенных по направлению потока полых резонаторов, высокочастотные поля которых обеспечивают поочередное модулирование электронов по скорости, группировку электронного потока и образование электронных сгустков перед их последующим торможением в выходной системе для преобразования энергии сгустков в энергию СВЧ колебаний [78].

В клистродах с традиционной группировкой используются резонаторы, частоты которых близки к частоте входного сигнала, а также используются резонаторы второй гармоники. Как правило, при проектировании такого клистрода не применяют больше восьми резонаторов. Каждый последующий резонатор не вносит существенного вклада в конечную эффективность. При этом конструкция клистрода становится сложнее. Небольшое отклонение частоты какого-нибудь резонатора после пайки нивелирует преимущество в КПД, полученное в расчёте [79].

При традиционной группировке постоянно имеется группа частиц, которые подвержены воздействиям слабых высокочастотных электрических полей резонаторов. Этим периферийным частицам необходимо больше времени, чтобы достигнуть сгустка. Эффективность клистрода зависит от доли собранных периферийных электронов в основной сгусток. Чем больше периферийных частиц долетело до основного сгустка, тем выше КПД клистронного усилителя.

Как правило, ядро сгустка состоит из группы быстрых частиц в «хвосте» и группы медленных частиц в области «головы» сгустка. Электроны ядра подвергаются действию больших высокочастотных полей и имеют сравнительно большую разницу скоростей.

При группировании наблюдается другая часть частиц, находящихся на расстоянии примерно половины электронной длины волны $L_e/2$ (L_e – расстояние, которое электрон со скоростью v_0 проходит за время, равное периоду колебаний высокочастотного поля, v_0 – средняя скорость электронов, $T = 1/f_0$ – период высокочастотных колебаний, f_0 – частота). Назовем эту часть электронов «частицы-аутсайдеры» или «антисгусток». «Частицы-аутсайдеры» подвергаются действию слабых полей в зазорах резонаторов и имеют небольшие изменения скоростей. Эти частицы прилетают в зазор выходного резонатора в ускоряющей фазе поля и отбирают энергию поля с дальнейшим ускорением, что приводит к снижению эффективности клистрона. Влияние «антисгустка» на эффективность очень велико. Для повышения КПД необходимо увеличивать длину пространства взаимодействия и ожидать успешного присоединения «частиц-аутсайдеров» в сгусток. Это один из способов получить высокую эффективность.

Для избежания разрушения ядра электроны должны совершать колебательные движения в каждой трубке дрейфа, первоначально стремиться к центру сгустка, а затем изменить направление в сторону ослабления группировки. Такие колебания могут происходить как за счёт пространственного заряда, так и за счёт внешних сил.

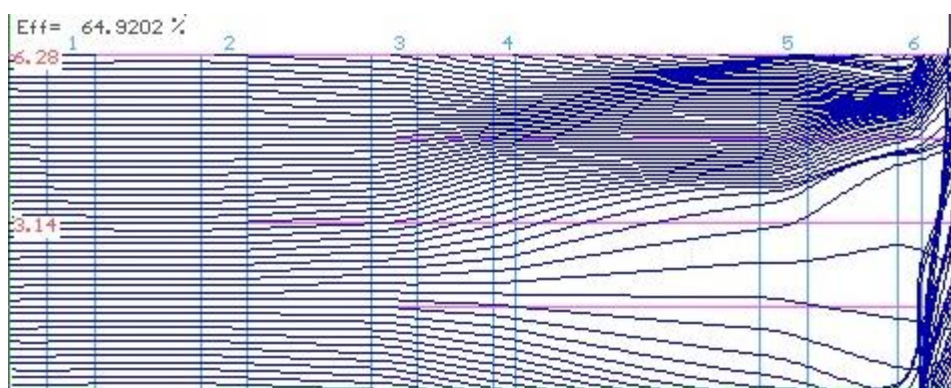


Рис. 2.3. Фазовые траектории электронов в традиционной группировке клистрона KIU – 147 в программном комплексе KLYS 4.5 [80].

На рисунке 2.3 представлены фазовые траектории электронов при традиционном группировании, как это было сделано в клистроне, который был взят за прототип. Ослабление группировки в этом случае происходит за счёт пространственного заряда. Амплитуда конвекционного тока начинает уменьшаться при пролёте электронов достаточного расстояния в трубе дрейфа (рис. 2.4).

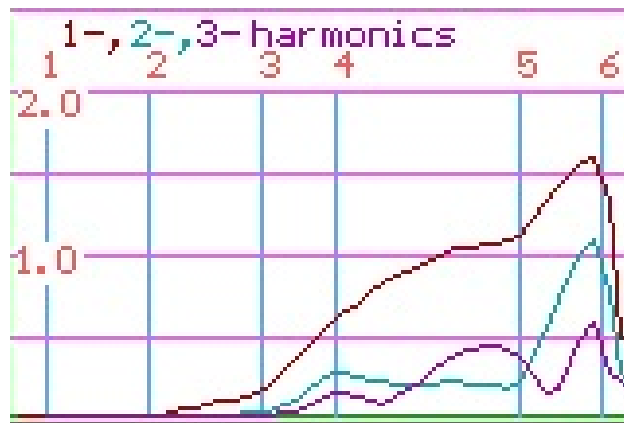


Рис. 2.4. Распределение конвекционного тока вдоль резонаторного блока при традиционном группировании.

§ 2.2.2. COM – метод группировки электронов

Метод COM (core oscillation method), предложенный Петровым Д.М. и Байковым А.Ю., опирается на осцилляции ядра сгустка [1-2,81-82]. В этом методе во время группировки электроны периодически приближаются к центру сгустка и удаляются от него. В то же время частицы «антисгустка» продолжают монотонно приближаться к основному сгустку. Такой процесс возможен при применении разгруппирующих сил, которые уменьшаются в направлении периферии пучка. В данном методе разгруппирующими силами являются силы пространственного заряда. В первом приближении силы пространственного заряда пропорциональны градиенту плотности заряда. Эти силы слабы для частиц «антисгустка», а также для частиц, которые близки к центру сгустка. К периферии пучка эти силы возрастают. Использование этих сил позволяет реализовать следующий сценарий (рис. 2.5):

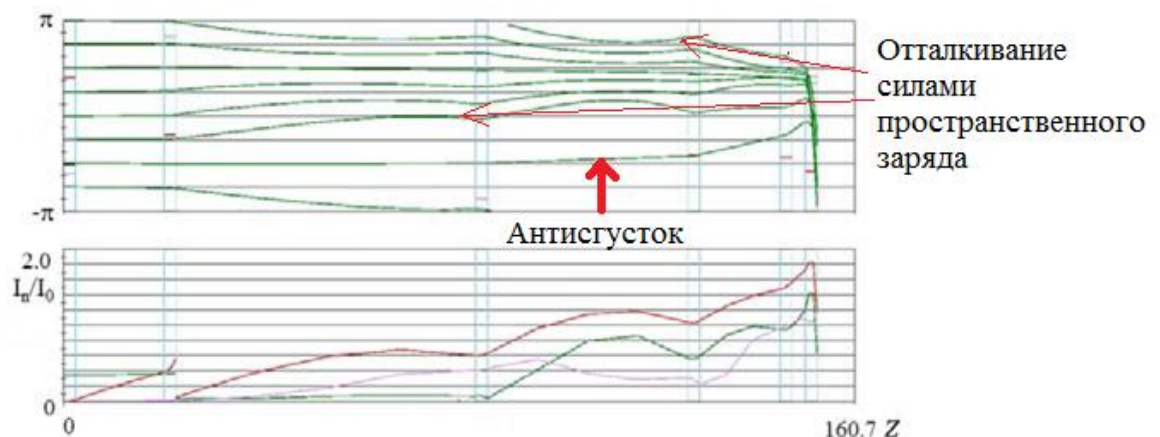


Рис. 2.5. Фазовые траектории электронов в COM-методе (KlypWin [83]).

Если силы пространственного заряда достаточно сильны, то они будут постепенно менять знак скорости продольных частиц на фазовой плоскости и будут отталкивать электроны от центра сгустка после взаимодействия с зазором резонатора. При прохождении электронов через зазор следующего резонатора знаки скоростей будут меняться, и частицы будут двигаться к центру сгустка до тех пор, пока силы пространственного заряда не начнут отталкивать их снова и так далее. В то же время частицы из «антисгустка» не будут испытывать разгруппировки силами пространственного и будут монотонно перемещаться к основному сгустку. Формирование электронного сгустка требует существенного увеличения длины пространства взаимодействия, что является основным недостатком такого подхода.

§ 2.2.3. CSM – метод группировки электронов

С помощью одномерных программ показано, что можно существенно уменьшить длину группирователя в конфигурации клистрона с резонатором третьей гармоники [81].

При этом в процессе группирования благодаря воздействию резонаторов гармоник создается «зона стабилизации» для ядра сгустка. Этот метод группирования назван методом стабилизации ядра (Core Stabilization Method, CSM). В CSM клистронах возможно существенное (в 2-3 раза) уменьшение длины пространства взаимодействия, за счёт резонаторов второй и третьей гармоник, что важно для клистронов длинноволнового диапазона. Малые характеристические сопротивления резонаторов второй и третьей гармоник меньше модулируют ядро сгустка, в то время как группирующие силы возрастают по направлению к периферийным электронам. В результате группировка происходит значительно быстрее, чем группировка в COM – методе [81]. Один из вариантов CSM-клистрона приведен на рис. 2.6.

Ещё один вариант клистрона с шестью резонаторами конфигурации «112311» рассчитывался в одномерном программном комплексе AJDisk [84]. Конфигурация клистрона с резонатором третьей гармоники была предложена западными специалистами V. Hill, C. Marrelli, D. Constable. Рабочая частота клистрона составляет 1 ГГц, напряжение пучка 115 кВ, ток пучка 8,2 А, расчётная эффективность при этом равна 88,65%. Длина анодного блока при этом составляет примерно 1,6 м [85]. На рисунках 2.7 и 2.8 представлены фазовые траектории электронов и амплитуды конвекционного тока соответственно.

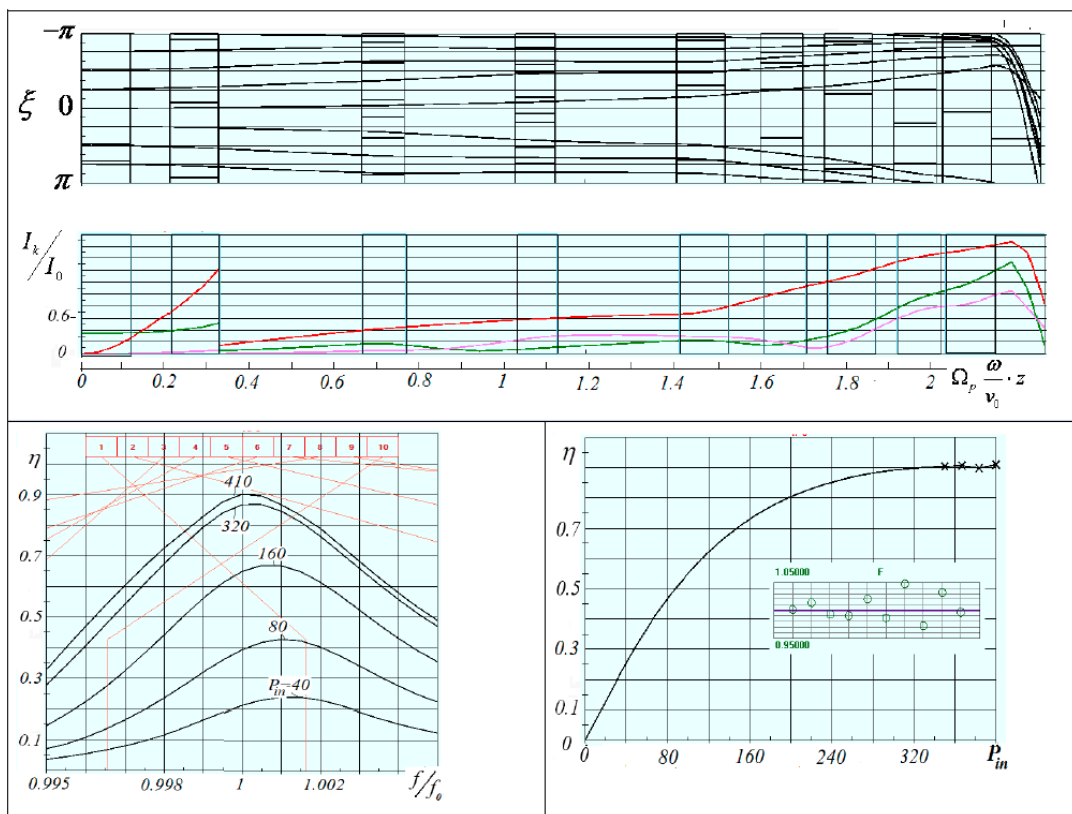


Рис. 2.6. Результаты оптимизации 10 – резонаторного CSM клистрона конфигурации «1123121211» с эффективностью 90% (KlypWin [83]).

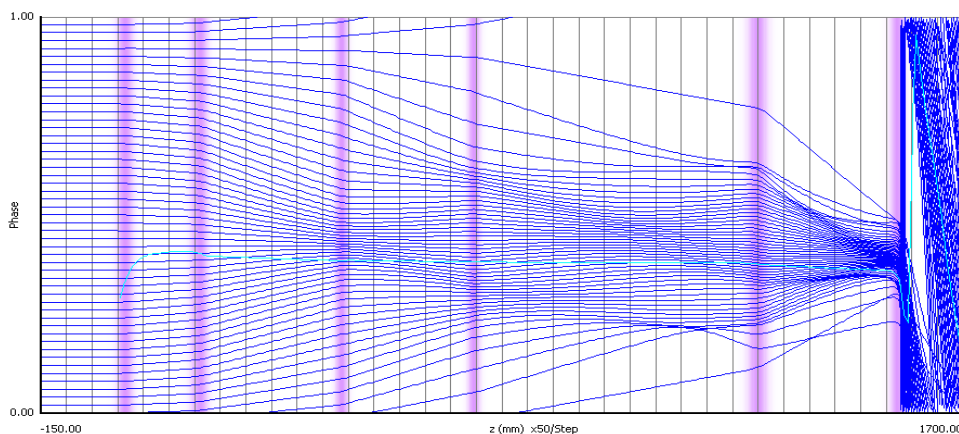


Рис. 2.7. Фазовые траектории клистрона с резонатором второй гармоники (3 резонатор) и резонатором третьей гармоники (резонатор 4).

Практическая реализация возможна только в длинноволновых клистронах (частота до 3 ГГц), поскольку резонаторы третьей гармоники будут иметь маленькие геометрические размеры. Физическая реализация CSM многолучевого клистрона с количеством пучков 40 невозможна в диапазоне частот 3 ГГц, т.к. уменьшением геометрических размеров резонатора первой гармоники не удастся достичь частоты

порядка $8,5 \div 9$ ГГц для резонатора третьей гармоники. Исследование проводилось автором в трёхмерном программном комплексе.

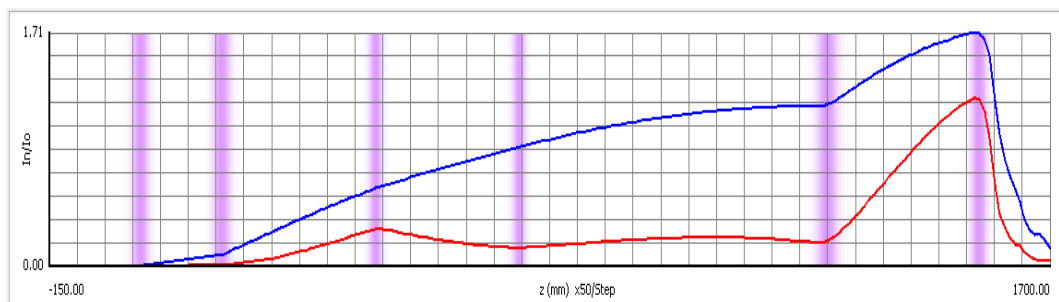


Рис. 2.8. Зависимость конвекционного тока в зависимости от координаты анодного блока (синяя кривая – первая гармоника, красная кривая – вторая гармоника).

§ 2.2.4. 3D метод группировки электронов

В результате проводимых в МГУ им. М.В. Ломоносова исследований поперечно – волновых процессов в электронных потоках выявлена возможность пространственной 3D группировки электронного потока в неоднородных магнитных полях без начальной модуляции продольных скоростей электронов [86].

Принцип пространственной 3D группировки предполагает использование входного резонатора с поперечным электрическим ВЧ полем вместо традиционного резонатора с продольным ВЧ полем. В результате воздействия поля входного резонатора электроны приобретают циклотронное вращение, но их продольная скорость остается одинаковой. Влетая в область группирования с неоднородным магнитным полем, электроны испытывают различное действие со стороны неоднородного магнитного поля и движутся по разным траекториям. Это приводит к тому, что изменение продольной скорости электронов будет определяться различным воздействием поперечных компонент магнитного поля в зависимости от траектории каждого электрона. В результате электроны ускоряются по – разному, и в потоке наблюдается модуляция тока электронов, пересекающих выходное сечение области группирования.

Принципиальное отличие 3D метода группировки электронного потока от группировки электронов при продольном движении состоит в том, что сгущения электронов при 3D группировке могут происходить без увеличения плотности пространственного заряда. Из-за трёхмерности траекторий электронов и не совпадения с осью группирователя частицы будут сосредоточены в поперечном сечении группирователя, а не собраны вблизи оси, как при традиционной продольной группировке [55-56,86].

В аксиально – симметричных полях (АСП) 3D группировка возникает в условиях несоосности d между магнитным полем и осью циклотронного вращения электронов. В случаях плоско – симметричных полей (ПСП), когда ось вращения потока лежит в плоскости симметрии магнитного поля, группировка наблюдается всегда, но в потоке возбуждаются только четные гармоники плотности тока (рис. 2.9).

Для случая АСП при соосном влете потока ($d = 0$) в область группирования сгустков тока не образуется (рис. 2.9а). Однако в случае $d \neq 0$ электроны ускоряются по – разному под воздействием неоднородной радиальной компоненты магнитного поля и движутся по различным траекториям. В итоге в потоке образуются периодические сгущения тока, пересекающих сечения $z=\text{const}$ (рис. 2.9б). На один период влета электронного пучка приходится один сгусток тока.

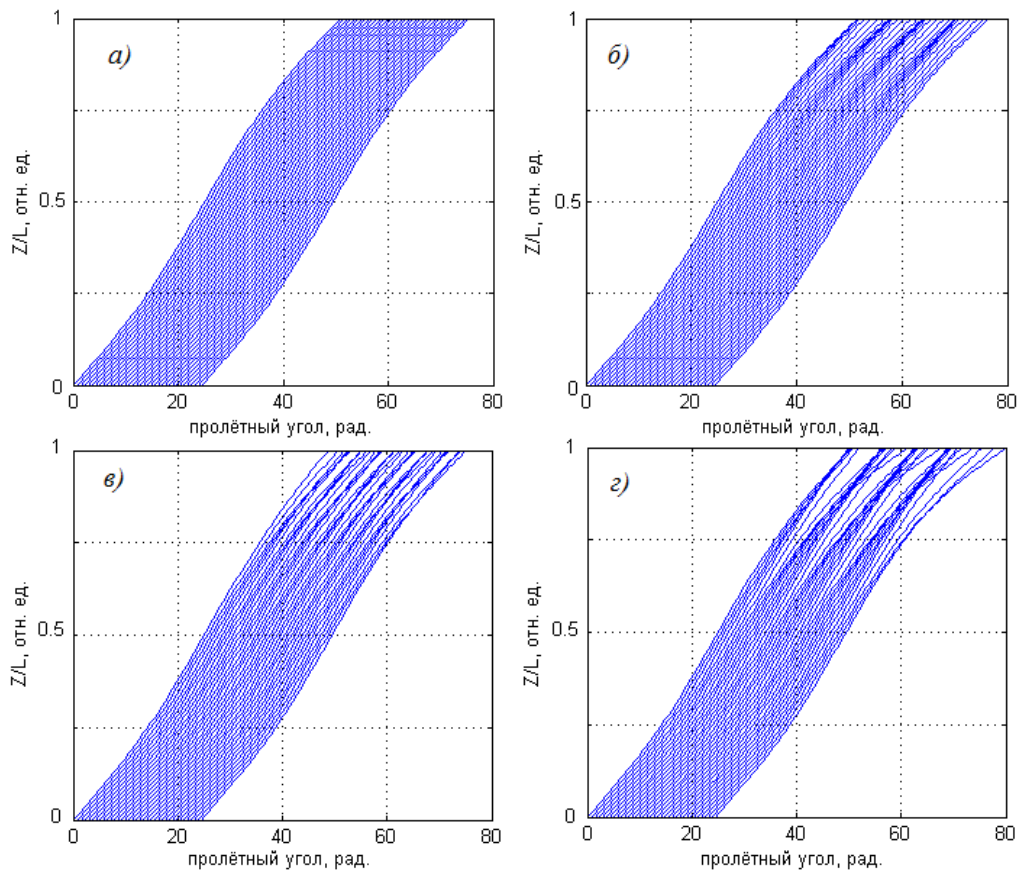


Рис. 2.9. Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в расходящемся магнитном поле: а) $d = 0$ (АСП), б) $d = R_c/8$ (АСП), в) $d = 0$ (ПСП), г) $d = R_c/8$ (ПСП).

Число периодов влета электронов $n = 4$.

В случае ПСП эффект группирования электронного потока наблюдается и при соосном влете в область группирования (рис. 2.9в). Отметим, что в этом случае на один

период влета частиц приходится два электронных сгущения. При $d \neq 0$ ситуация аналогична случаю АСП: два сгустка сливаются в один, и на один период влета пучка вновь приходится один сгусток тока (рис. 2.9г).

3D группировку электронов можно использовать при создании клистронных усилителей с циклотронным вращением электронов. Преимуществом такого типа клистронов является ослабление действия полей пространственного заряда на группирование частиц, а также уменьшение количества группирующих резонаторов [87].

§ 2.3. Выводы

1) В СОМ – методе группировки (core oscillation method) используются осцилляции ядра сгустка электронов за счёт разгруппирующих сил пространственного заряда. Метод позволяет получить высокую эффективность на значительно большей длине пространства взаимодействия, что является основным недостатком такого подхода.

2) При использовании ССМ – метода (core stabilization method) возможно значительно уменьшить длину пространства взаимодействия за счёт резонаторов второй и третьей гармоник. При этом в процессе группирования электронов создается «зона стабилизации» для ядра сгустка. Практическая реализация возможна только в длинноволновых клистромах (частота до 3 ГГц), поскольку резонаторы третьей гармоники будут иметь маленькие геометрические размеры.

3) Принципиальное отличие пространственного метода группировки электронов от группировки при продольном движении электронов заключается в том, что формирование сгущений электронов при таком способе группирования может осуществляться без существенного увеличения плотности пространственного заряда. Из-за трёхмерности траекторий электронов сгущения будут распределены по площади поперечного сечения группирователя. Эффект пространственной группировки электронов можно применить при создании клистронных усилителей с циклотронным вращением электронов.

БАК – МЕТОД ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА**§ 3.1. Введение**

Рассмотрим вопрос извлечения СВЧ – мощности из клистронных усилителей с максимальной эффективностью. Распространяясь вдоль клистрона, часть электронов будет в сгустке, а другая часть будет в «антисгустке». В выходном резонаторе пучок будет замедляться, а «антисгусток» ускоряться. Внутри сгустка можно различить центральную часть (ядро) и периферийные электроны – те, которые расположены близко к границе антисгустка. Чтобы гарантировать полное извлечение энергии из пучка, необходимо выполнить следующие условия:

- 1) при влёте в выходную полость все электроны должны быть расположены в сгустке, оставляя «антисгусток» пустым;
- 2) все электроны внутри сгустка должны покидать выходную полость с очень малыми скоростями, что возможно при отсутствии обгона на выходе одних электронов другими.

В настоящее время существует большое количество программ, моделирующих клистроны [88-99]. Программы, которые использовались для расчёта группирователей различных клистронов, вошедших в диссертацию, представлены в таблице 3.1.

В качестве основного инструмента исследований взаимодействия электронов с СВЧ полями резонаторов группирователя в клистронных усилителях использовались программные комплексы DEV 5.1 [100-101], Klys 4.5 [80]. Программный комплекс KLYS 4.5 создавался для решения задач, как с однолучевыми клистроном, так и с многолучевыми. Программный комплекс DEV 5.1 был выпущен позднее, в этой программе возможен расчёт не только клистронов, но и других приборов «О» - типа, включая лампы бегущей волны с замедляющей системой в виде цепочки связанных резонаторов. Для решения электродинамических задач в этих программах используется метод эквивалентных схем. Электронный поток в данном случае представляется в виде последовательности заряженных дисков. Программы позволяют оценить выходные характеристики клистронов, такие как: КПД, выходная мощность, усиление, а также проводить анализ амплитудно – частотной характеристики устройства.

Таблица 3.1. Программы, моделирующие группирователь клистронов.

Название	Разработчик	Краткая характеристика	Время расчёта одного варианта
Klys 4.5, DEV 5.1	Малыхин А.В, Коннов А.В., Россия	1D, дисковая модель, стационарный режим	2-5 мин.
AJ Disk	SLAC, США	1D, дисковая модель, стационарный режим	2-5 мин.
KlypWin	Байков А.Ю., Россия	1D, дискретно – аналитическая модель, стационарный режим	<1 сек
Klys2D	Thales Electron Devices, Франция	2D, модель крупных частиц, стационарный режим	10-20 мин.

В одномерных программах (Klys 4.5, DEV 5.1) были рассчитаны фазовые траектории электронов, распределения амплитуд конвекционного тока, высокочастотного напряжения в зазорах резонаторов, амплитудно – частотные характеристики, зависимости выходной мощности от уровня входного сигнала, а также скорости всех электронов при влёте и вылете каждой полости электродинамической системы.

Было проведено сравнение продольных компонент электрического поля в зазорах резонаторов в 4 программных комплексах с целью определения отличий применяемых моделей, что могло привести к различию в эффективности последующих расчётов электродинамических систем клистронов. Две программы были одномерными (Klys 4.5, DEV 5.1.), в которых решались уравнения Лапласа для высокочастотных электрических полей. В трёхмерном случае решаются задачи Гельмгольца с идеальными проводящими стенками.

В результате решения этой задачи было выяснено, что решения уравнения Гельмгольца в трёхмерных программах и решения уравнения Лапласа в одномерных программах отличаются незначительно при условии, что ширина зазора и радиус трубки хотя бы на порядок меньше длины волны микроволнового излучения в зазоре резонатора. При уменьшении длины волны прибора (увеличение частоты), а также увеличения радиуса трубки дрейфа различие в распределении продольных электрических компонент высокочастотных полей трёхмерных программ от одномерных программ становится существенным (более 5-10%). Для того, чтобы избежать этого несоответствия точности в дальнейших расчётах всех клистронов, было решено использовать результаты расчётов трёхмерных программ.

Распределения продольных компонент электрических полей в зазорах резонаторов были внесены из трёхмерной программы (метод заданного поля) с целью увеличения точности расчётов. По оси абсцисс откладывается продольная координата пролётного канала резонатора на расстоянии расчёта кулоновского взаимодействия от оси канала. По оси ординат откладывается нормированная продольная компонента вектора напряженности высокочастотного электрического поля. Центр зазора совпадает с нулевой координатой.

Характеристическое или волновое сопротивление для электродинамической системы рассчитывалось из известного распределения продольной компоненты электрического поля вдоль пролётной трубы дрейфа, получаемого из трёхмерной программы:

$$\rho = \frac{Z}{Q} = \frac{(| \int_{z_1}^{z_2} E_z(z) dz |)^2}{2\omega W} \quad (3.1)$$

, где $E_z(z)$ – нормированная продольная составляющая вектора высокочастотного электрического поля, W – запасенная энергия в резонаторе, Z – импеданс, Q – собственная добротность резонатора, ω – циклическая частота, z_1 и z_2 – начальная и конечная координаты расчёта продольной компоненты электрического поля.

§ 3.2. Методы расчёта электродинамики в одномерных программах

Общие сведения и методы решения в программе DEV 5.1.

Возможности современных программ расчета электродинамики методами конечных элементов и производительность современных персональных компьютеров позволяют решить задачу моделирования. Однако, такой подход является ресурсоемким с точки зрения расчета на ЭВМ реальных клистронов и позволяет проводить расчет только ограниченного числа резонаторов сложной формы, как правило, до 10 [102].

В настоящее время наиболее адекватным методом моделирования электродинамических систем приборов О – типа представляется метод декомпозиции, в котором каждая ячейка (резонатор) представляется в виде шестиполюсника, а сама нерегулярная электродинамическая система – в виде многополюсника (каскадного соединения шестиполюсников). Обычно для шестиполюсника строится схема замещения в виде схемы с сосредоточенными элементами. Этот метод позволяет построить матрицу возбуждения секций электродинамической системы, связывающую наведенные токи и напряжения в зазорах взаимодействия. Таким образом, этот метод является основой строгого (итерационного) метода решения самосогласованной задачи взаимодействия [103].

Принцип построения схем (число степеней свободы) оказывает решающее влияние на точность моделирования комплекса характеристик таких как: кривые согласования справа и слева, распределение видов колебаний по частотам, распределение амплитуд и фаз полей по зазорам взаимодействия, и элементов матрицы возбуждения.

Каждый шестиполюсник синтезируется схемой с сосредоточенными элементами, т.е. индуктивностями, емкостями, сопротивлениями. При синтезе схемы используется традиционный для синтеза цепей подход, заключающийся в построении физически реализуемой схемы замещения шестиполюсника, которая с максимально возможной точностью воспроизводит заданные переходные частотные характеристики (рис. 3.1).

Для ячеек такими характеристиками являются дисперсионная кривая, кривая характеристического сопротивления и кривая сопротивления связи, т.е. характеристики бесконечной периодической структуры, составленной из резонаторов.

Формально метод дает возможность построить Z-матрицу многополюсника, которая связывает комплексные амплитуды напряжения на зазорах резонаторов с комплексными амплитудами наведенных токов в зазорах резонаторов. Частотные зависимости некоторых элементов матрицы поддаются непосредственному измерению. Эта матрица используется

в итерационной процедуре решения задачи взаимодействия электронного пучка с полями реальных электродинамических систем, т. е. для расчета выходных характеристик резонаторных СВЧ приборов.

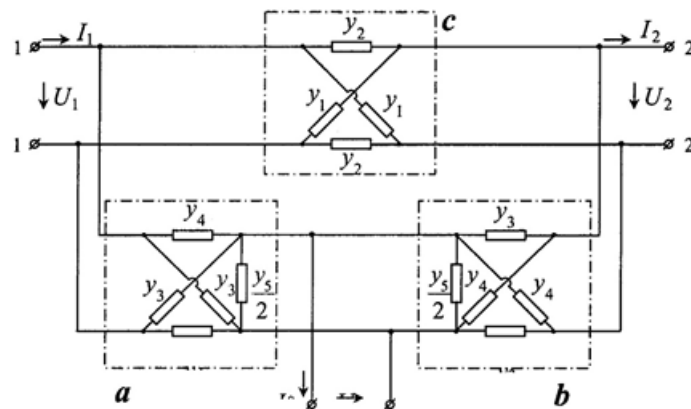


Рис. 3.1. Схема симметричной ячейки (резонатора).

Для решения самосогласованной задачи необходимо по значениям напряжения на трубках дрейфа зазора определить распределение высокочастотных электрических полей, решить уравнения движения электронных пучков в высокочастотных и кулоновских полях, вычислить в зазоре наведенные токи.

Самосогласованное СВЧ поле в зазорах с учетом наводимого пучком СВЧ напряжения ищется методом итераций с помощью нелинейной итерационной процедуры, улучшающей сходимость итерационного процесса.

Расчет распределения СВЧ-полей в зазоре резонатора в программе DEV 5.1.

Решение задачи Дирихле (3.2) для уравнения Лапласа в осесимметричной области, ограниченной поверхностью γ :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad \varphi|_{\gamma} = \varphi(r_{\gamma}, z_{\gamma}) \quad (3.2)$$

проведено на основе аппроксимации конечно-разностным уравнением на согласованной сетке (рис. 3.2) ($h_i = z_{i+1} - z_i$, $h_j = z_{j+1} - z_j$).

Система линейных алгебраических разностных уравнений решается итерационным методом последовательной верхней релаксации [104]. Расчет начинается с нижней (верхней) левой точки, производится слева направо до конца ряда и затем переходит к следующему ряду.

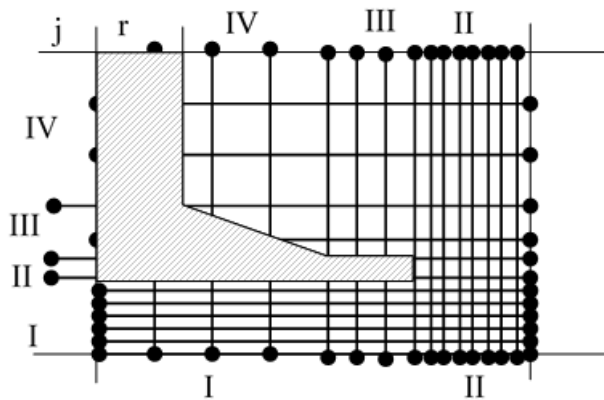


Рис. 3.2. Согласованная конечно-разностная сетка. Цифрами указаны подобласти с регулярной сеткой.

При достижении верхней (нижней) внутренней точки завершается n -ый итерационный цикл. Проводится определение точности вычислений значений потенциала. Если точность недостаточно высока, то проводится следующий $(n+1)$ -ый итерационный цикл. Критерием точности расчета является определение относительного изменения потенциала (3.3) в каждом узле конечно-разностной сетки.

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi_{ij}^{n-1}}{\varphi_{ij}^n} - 1 \right| \quad (3.3)$$

Если максимальное значение ε для всех точек оказывается меньше некоторой заданной величины (обычно $\varepsilon < 0,001$), то процесс прекращается.

Продольная компонента электрического поля в узлах сетки определяется соотношением (3.4):

$$E_{ij} = \frac{\varphi_{i-1,j} - \varphi_{i+1,j}}{h_{i-1} + h_i} \quad (3.4)$$

, а между узлами сетки — при помощи параболической интерполяции.

Электронный пучок моделируется последовательностью дисков, влетающих в пространство взаимодействия в течение нескольких СВЧ-периодов (в программе их может быть 9). Силы кулоновского отталкивания каждой крупной частицы (диска) вычисляются по двумерной модели, путем разбиения каждого диска на 10 соосных радиальных колец.

Расчет кулоновских полей проводится на основе алгоритма быстрого решения уравнения Пуассона (3.5) в аксиально-симметричной области $\{[0, Z_{max}]; [0, R_{max}]\}$:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = - \frac{\rho(r, z)}{\varepsilon_0}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r}(0, z) = 0. \quad (3.6)$$

, здесь U – искомый потенциал, $\rho(r, z)$ – плотность пространственного заряда, ε_0 – диэлектрическая постоянная. На оси ($r = 0$) уравнение принимает вид (3.7):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = - \frac{\rho(0, z)}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

Упомянутая область покрыта прямоугольной сеткой с числом узлов по радиусу $N_r = 2^m + 1$, где m – целое число, и с $N_z = 2^p$ узлов вдоль оси z , где p – целое число. Предполагается, что распределение пространственного заряда периодически продолжено вдоль оси z с периодом Z_{max} , а потенциал U_{Nr} на границе области $r = R_{max}$ может зависеть от z .

Уравнения записаны в конечных разностях на прямоугольной сетке. К сеточным уравнениям построчно применено быстрое преобразование Фурье-БПФ [105] (метод Хокни [106]). Методом циклической редукции находятся Фурье-образы сеточных потенциалов, а затем с помощью обратного БПФ и сами потенциалы в узлах сетки.

Вычисление компонент электрических полей пространственного заряда в точке наблюдения производится процедурой девятиточечной интерполяции по найденному распределению потенциалов [107].

Чтобы связать кольцевую модель пучка с методом расчета полей пространственного заряда необходимо, во-первых, определить плотность пространственного заряда в кольцевой частице, во-вторых, определить процедуру «размазывания» заряда кольцевой частицы по ближним узлам сетки. Вторая задача решается на основе представления поперечного сечения кольцевой частицы в виде облака различной формы на прямоугольной сетке [105]. Отметим, что наименьшие флуктуации при вычислении полей пространственного заряда даёт гладкое распределение заряда в узлы, а с точки зрения минимального числа операций предпочтительно факторизованное квадратичное распределение. Это реализуется с помощью схем девятиточечной раздачи [106].

Описанная выше процедура вычисления полей пространственного заряда позволяет вычислить кулоновское поле бесконечной последовательности дисков конечной толщины

в трубе дрейфа, отстоящих друг от друга на период (или несколько периодов) СВЧ-поля. (рис. 3.3).

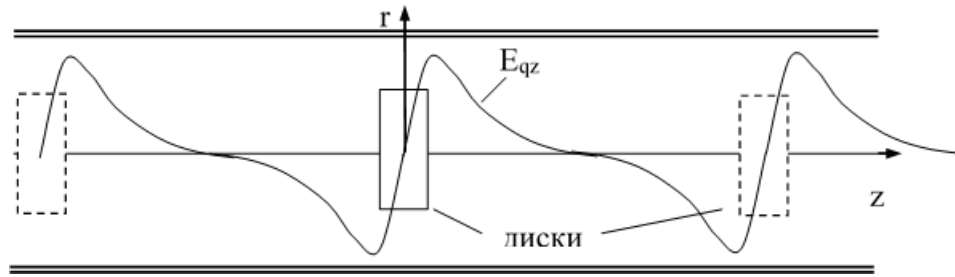


Рис. 3.3. Поле пространственного заряда бесконечной периодически расположенной последовательности дисков.

Функция распределения продольного поля диска E_{qz} зависит от радиуса (зависимость сильно выражена на торцевой поверхности диска). Напряженность поля диска спадает при перемещении точки наблюдения по радиусу от оси диска. В программе вычисление функции распределения продольного поля E_{qz} по умолчанию проводится на радиусе $r_q = 0,7 r_n$, что соответствует кольцу, делящему равномерно заряженный диск на две, равные по заряду, части (внутренний диск и внешнее кольцо). В меню программы пользователь самостоятельно может выбрать этот параметр при моделировании заполнения канала пучком.

Уравнения движения электронного пучка в программе DEV 5.1.

В одномерном приближении программы DEV 5.1. уравнения движения пучка (3.8-3.9) и уравнение для произвольной гармоники наведенного тока (3.10) [107] в зазоре резонатора имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{e}{m} (E_s + E_c) \quad (3.8)$$

$$\frac{dz}{dt} = v \quad (3.9)$$

, где v – скорость частицы, E_s – кулоновское поле, E_c – СВЧ-поле резонатора, действующее на частицу, $z|_{t=t_0} = 0$, $v|_{t=t_0} = v_0$.

$$I_p^k = \frac{I_0}{\pi} \int_0^{2\pi} d(\omega t_0) \int_{t_1^k(t_0)}^{t_2^k(t_0)} E^k(t_0, t) v(t_0, t) e^{-jp\omega t} d(\omega t) \quad (3.10)$$

, где v_0 — скорость инжектированного пучка, I_0 — ток пучка, $E^k(z)$ — функция распределения СВЧ-поля в k -ом зазоре, ωt_0 — фаза влета частицы в пространство взаимодействия, t — текущее время, $t_1(t_0)$ — время влета частицы в поле зазора, $t_2(t_0)$ — время вылета частицы из зазора. Для последовательности дисков формула (3.10) принимает вид:

$$I_p^k = \frac{\omega q_0}{\pi} \sum_{i=1}^{N_p} \int_{t_1^k(t_0)}^{t_2^k(t_0)} E^k(t_0, t) v(t_0, t) e^{-jp\omega t} d(\omega t) \quad (3.11)$$

, где q_0 — заряд диска, N_p — количество дисков, приходящихся на период СВЧ-колебания.

Интегрирование уравнений движения проводится в Лагранжевых переменных t, t_0 , что позволяет учесть остановку и возможные возвратные движения частиц. По умолчанию период высокочастотного поля разбивается на 60 шагов. Учет релятивизма в уравнениях движения необходим уже при потенциалах пучка ~ 20 кВ.

Методы и модели в программе Klys 4.5.

Недостаточное быстродействие современных персональных компьютеров обуславливает необходимость проектирования клистронов с помощью программ, основанных на «одномерных» дисковых моделях электронного пучка. Использование «одномерных» моделей для проектирования приборов с заданными амплитудно-частотными характеристиками ставит вопрос о пригодности «одномерных» программ в практике при проектировании клистронов и о достижимой точности «одномерной» модели.

В программе Klys 4.5 реализованы следующие методы и модели [80]:

- для областей с осевой симметрией численно определяется поле диска (методом крупных частиц в варианте Хокни) и распределение электрического поля резонатора для его реальных размеров;
- для вычисления полей пространственного заряда используется 3-х периодная модель пучка, решается релятивистское уравнение движения частиц и учитывается их возвратное движение;

- расчёт самосогласованного взаимодействия проводится с помощью итерационных процедур, использующих методы нелинейного преобразования числовых последовательностей (типичная относительная погрешность расчёта самосогласованного режима 0,01-0,1% по КПД);

- при расчёте высокочастотного взаимодействия учитывается форма огибающей электронного пучка в статическом режиме.

В качестве исходных данных используются:

- 1) реальные размеры электродинамической системы;
- 2) «холодные» частоты резонаторов, их собственные и нагруженные добротности, волновые сопротивления;
- 3) параметры электрического режима (напряжение и ток электронного пучка);
- 4) форма огибающей электронного пучка в номинальном электрическом режиме;
- 5) число электронных пучков.

Изменение сил пространственного заряда, связанное с пульсациями пучка, слабо влияет на его группировку, в то время как, выбор значения радиальной координаты, для которой проводится расчёт распределения СВЧ поля в пространстве взаимодействия резонатора, может приводить даже к качественному изменению вида семейств выходных характеристик клистрона. Этот эффект может быть учтён в рамках пространственно-одномерной модели пучка. С этой целью в программе Klys 4.5 для каждого резонатора введён дополнительный параметр R_{calc} – значение радиальной координаты, для которой проводится расчёт распределения СВЧ поля.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для нескольких десятков клистронов разных конструкций (однолучевые и многолучевые клистроны, клистроны, работающие на фиксированной частоте и широкополосные усилители (с относительной шириной полосы до 10%), клистроны с КПД в режиме насыщения до 75% с кольцевыми и тороидальными, цилиндрическими и прямоугольными резонаторами, с одноззорными и двухззорными резонаторами, с резонаторами второй гармоники, с входными и выходными фильтрами и без фильтров), работающих в диапазонах частот от 300 МГц до 30 ГГц, показало, что абсолютная погрешность расчёта выходных параметров не превышает $0 \div 1$ дБ для коэффициента усиления приборов с узкой полосой и $0 \div 3$ дБ для приборов с широкой полосой, а также $1 \div 5$ пунктов для эффективности.

Программа расчёта группирователей клистронов различных конструкций Klys 4.5, использующая одномерные уравнения движения электронов, обеспечивает достаточную для практики точность расчёта выходных параметров современных многорезонаторных клистронов и может служить надёжным инструментом при их проектировании.

Алгоритм работы AJ Disk

От постановки задачи до получения результатов в виде фазовых траекторий и выходных параметров заданного клистрона одномерная программа AJ Disk проходит следующие 10 шагов:

- 1) Запрос у пользователя входных данных.
- 2) Обработка данных, таких как параметры пучка, импеданс резонаторов и т.д.
- 3) Расчёт напряжения в зазоре входного резонатора, используя уровень входной мощности.
- 4) Установка во всех других резонаторах напряжений, близких к 0.

После первых четырёх шагов программа готова направить пучки в трубки дрейфа, электронный пучок разделяется при этом на набор заряженных дисков [84]. В процессе движения на каждый диск воздействует поле пространственного заряда со стороны других дисков, а также электрическое поле каждого зазора резонатора.

Уравнения расчёта полей пространственного заряда (3.12) и полей зазоров резонаторов (3.13) определяются следующим образом:

$$E_s = -\frac{q_{disk}}{\pi \cdot b^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{d=0}^{N_{disk}} \sum_{i=0}^{\infty} 4 \cdot \left[\frac{J_1\left(\mu_i \cdot \frac{b}{a}\right)}{\mu_i J_1(\mu_i)} \right]^2 \cdot e^{\left(\frac{-\mu_i |z-z_0|}{\gamma \cdot a}\right)} \cdot \text{sign}(z - z_0) \quad (3.12)$$

$$E_c = |U_n| \cdot f(z) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \theta) \quad (3.13)$$

, где E_s - поле пространственного заряда со стороны других дисков и E_c - электрическое поле зазоров резонаторов, μ_i - i -ый нуль функции Бесселя J_0 , γ - постоянная распространения.

Форма напряженности (3.14) электрического поля в зазорах резонатора представлена гауссовой аппроксимацией:

$$f(z) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{(-k^2(z-z_{center})^2)} \quad (3.14)$$

- 5) Оценка уравнения движения с учётом электрического поля $E = E_s + E_c$.
- 6) Расчёт индуцированного тока (3.15) для каждого резонатора

$$I_{ind} = \int_{-\infty}^{\infty} \rho \cdot v \cdot f(z) \cdot dz \quad (3.15)$$

, где ρ –одномерная плотность пространственного заряда, v –скорость электрона, найденная на 5 шаге.

- 7) Расчёт индуцированного напряжения в каждом зазоре резонатора.
- 8) Повторение шагов 5-7 до тех пор, пока результирующее напряжение последней итерации отличается от результирующего напряжения предпоследней итерации на величину меньшую 1%
- 9) Расчёт усиления и эффективности

$$\eta_k = 1 - \frac{\sum_{d=0}^{N_{disk}} \left(1 - \left(\frac{v_{exit,d}}{c}\right)^2\right)^{-1/2} - 1}{\sum_{d=0}^{N_{disk}} \left(1 - \left(\frac{v_{inlet,d}}{c}\right)^2\right)^{-1/2} - 1} \quad (3.16)$$

, v_{exit} – скорость электрона при вылете выходного резонатора, v_{inlet} - скорость электронов при влёте в выходной резонатор.

Электронная эффективность имеет вид

$$\eta_e = real \left\{ \frac{U_N \cdot I_{ind,N}^*}{2 \cdot U_0 \cdot I_0} \right\} \quad (3.17)$$

N относится к выходному резонатору, символ * обозначает комплексную величину. Это уравнение находит процент мощности пучка, который преобразуется в выходном резонаторе в СВЧ мощность.

- 10) Отображение результатов на экране.

§ 3.3. Описание БАК – метода группировки электронного потока

На сегодняшний момент верхний уровень эффективности в существующих устройствах составляет около 70%. Для повышения этого уровня необходимо предложить новые идеи группировки.

И. А. Гузиловым был предложен метод группировки электронного потока, позволяющий уменьшить длину клистрона в более чем 2 раза по сравнению с устройствами, представленными в параграфе 2.2.2. главы 2 с сохранением высокой эффективности [4,5].

Высокая эффективность (КПД 77% в расчете по программе KLYS 4.5) клистрона, группировка которого представлена в параграфе 2.2.1. главы 2, достигается с помощью нового способа группировки электронов, получившего название БАК – метод или в английской терминологии «bunching, alignment, collecting» (BAC), что означает традиционное группирование электронов, выравнивание их скоростей и сбор периферийных электронов (частиц – «аутсайдеров»). Суть метода состоит в том, что плотность конечного сгустка увеличивается с помощью его разгруппировки и сбора периферийных (крайних) электронов сгустка электрическими полями дополнительных резонаторов как первой, так и второй гармоники. Во время разгруппировки сгустка замедленные электроны попадают в ускоряющую фазу высокочастотного поля разгруппирующего резонатора, а ускоренные электроны сгустка встречают замедляющую фазу высокочастотного поля. При этом принудительно уменьшается амплитуда конвекционного тока разгруппирующими резонаторами.

Метод основан на вынужденных колебаниях ядра сгустка. Электроны ядра сгустка совершают колебательные движения, приближаясь к центру сгустка и удаляясь от него. Это необходимо, чтобы ядро сгустка не было разрушено во время сбора в сгусток периферийных электронов. То есть в этом методе происходит ослабление группировки ядра сгустка разгруппирующими резонаторами (резонаторами, частоты которых существенно ниже частоты входного сигнала), пока периферийные электроны слетаются в сгусток. В одном таком колебательном движении принимают участие три резонатора. БАК – метод позволяет получить высокую эффективность на значительно малой длине пространства взаимодействия.

Рассмотрим за прототип отечественную разработку КИУ – 147, группировка которого представлена на рисунке 3.4. По оси абсцисс откладывается координата резонаторного блока в направлении к выходному резонатору, по оси ординат – фаза $2\pi \frac{T}{T_0}$

высокочастотного поля. Этот клистрон конструировался с 6 резонаторами при напряжении 52 кВ и суммарном токе пучков около 290 А. Оптимизированная расчетная эффективность этого клистрона составила 64,9%. Следует заметить пересечение фазовых траекторий электронов в этом расчёте, то есть электроны сгустка начинают обгонять друг друга, что не очень хорошо отражается на конечной эффективности. Также обратим внимание на то, что из-за больших сил пространственного заряда не удаётся собрать электроны в компактный сгусток, что является причиной существенной потери в эффективности преобразования энергии пучка в микроволны.

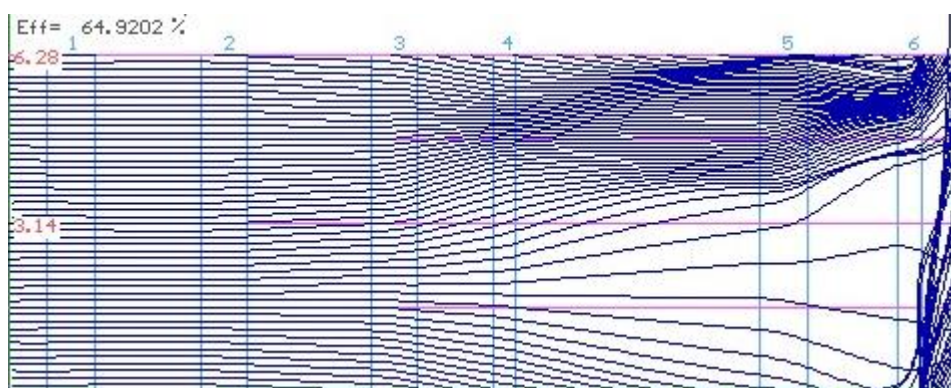


Рис. 3.4. Фазовые траектории электронов в традиционной группировке клистрона КИУ – 147 (KLYS 4.5).

Используя одномерную программу KLYS 4.5 [80], проведена оптимизация клистрона, взятого за прототип. Оптимизация проводилась при помощи нового метода группирования БАК – метода при сохранении длины резонаторного блока, сохранении напряжения пучка на уровне 52 кВ. В результате расчётов была получена эффективность 77%, при этом были добавлены в анодный блок 3 БАК – резонатора. Итоговое количество резонаторов составило 9 штук. Фазовые траектории электронного потока представлены на рисунке 3.5.

Резонатор под номер 5 (нумерация резонаторов приведена выше фазовых траекторий рисунка) является разгруппирующим резонатором, его частота существенно ниже частоты основного сигнала, и выбирается из диапазона $0,7 f_0 < f_5 < f_0$, где f_0 – частота основного сигнала [108]. Электрические поля резонаторов 7 и 8 собирают периферийные электроны и формируют конечный сгусток, и тем самым реализуется 3 часть БАК – метода под названием «collecting», частоты этих резонаторов выбирались в диапазоне $0,95 f_0 < f_7, f_8 < 1,3 f_0$.

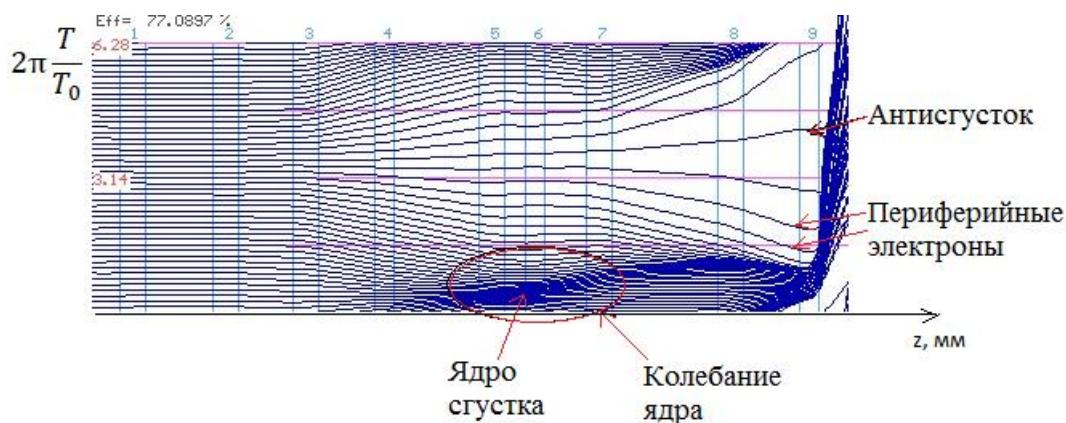


Рис. 3.5. Фазовые траектории электронов в БАК-методе (Klys 4.5).

Заметим, что на рисунке 3.5 траектории электронов сходились до 5 резонатора (происходила традиционная группировка), а после разгруппировки начали расходиться, затем после 7 резонатора снова сходятся. Тем самым произошло одно «БАК – колебание», благодаря внешним высокочастотным электрическим полям резонаторов (вынужденным силам). За счёт этого БАК – метода был достигнут рост расчетной эффективности на 12%.

Распределение амплитуды конвекционного тока первой, второй и третьей гармоник вдоль оси прибора при использовании БАК – метода группирования показано на рисунке 3.6 (одномерный программный комплекс DEV 5.1).

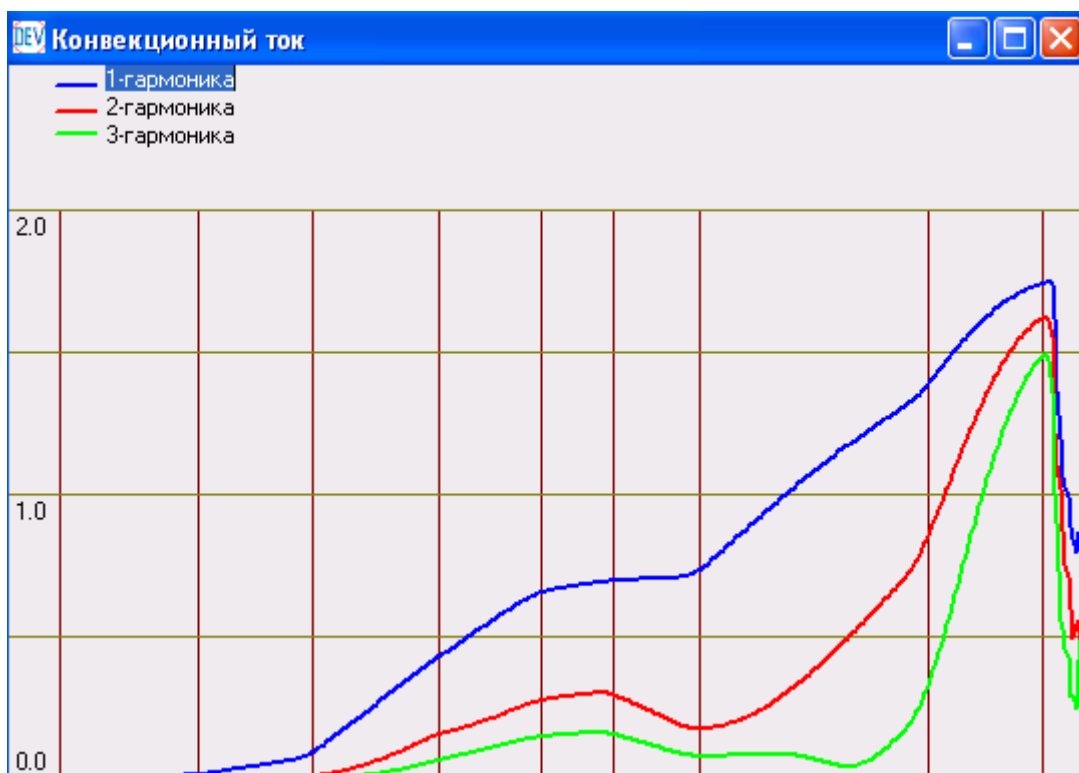


Рис. 3.6. Распределение конвекционного тока вдоль оси резонаторного блока.

Отметим, что после прохождения разгруппирующего, в этом случае 5 резонатора (пара сеток резонатора показана на рисунке 3.6 одной линией – центром зазора), амплитуда конвекционного тока первой гармоника перестаёт расти, происходит выравнивание скоростей. При определенных частотах разгруппирующего резонатора амплитуда конвекционного тока первой гармоники может как уменьшиться, так и выйти в насыщение. Во время оптимизации необходимо проверить все возможные условия группировки для получения максимальной эффективности группирователя клистронного усилителя при исходных данных.

Распределение первой гармоники высокочастотного напряжения в зазорах резонаторов вдоль оси прибора при использовании БАК – метода группирования показано на рисунке 3.7 (одномерный программный комплекс DEV 5.1). Амплитуда высокочастотного напряжения в разгруппирующем резонаторе меньше, чем амплитуда предыдущей и последующих стадий группирования. Амплитуды первой гармоники наведенного высокочастотного напряжения в 4 и 6 резонаторах отсутствуют (пара сеток резонатора показана на рисунке одной линией – центром зазора), поскольку 4 и 6 резонаторы были настроены на вторую гармонику основного сигнала. Следует заметить, что в оптимизированном варианте на третьей стадии («collecting») БАК – метода амплитуды первой гармоники высокочастотного напряжения 7 и 8 резонаторов находятся на уровне $0,3 U_0$ и $0,4 U_0$ соответственно, где U_0 – напряжение пучка.

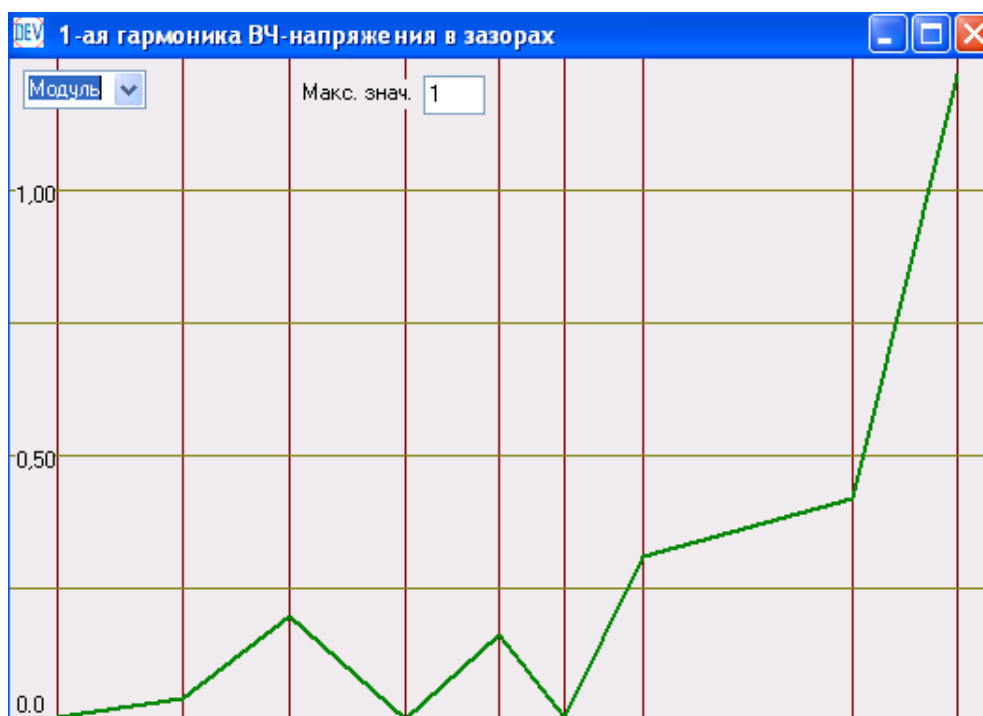


Рис. 3.7. Распределение первой гармоники наведенного напряжения

Обратим внимание, что в распределении скоростей электронов после вылета из разгруппирующего резонатора происходит выравнивание скоростей, электроны встречаются с противоположной фазой высокочастотного поля (замедленные электроны ускоряются, ускоренные электроны попадают в фазу торможения) (рис. 3.8).

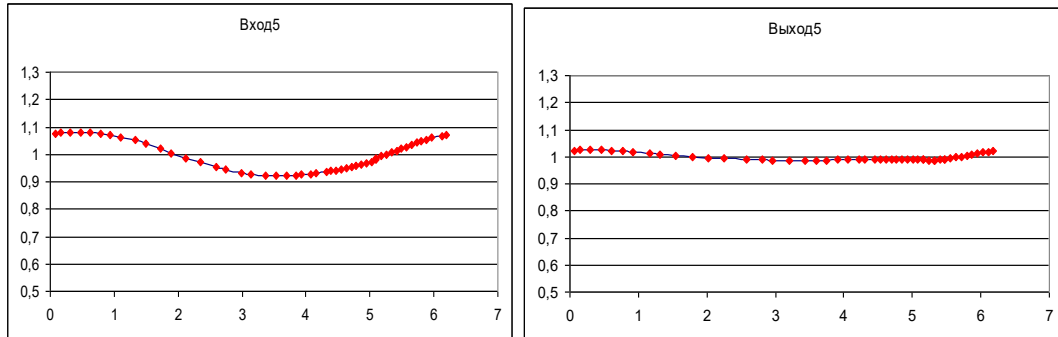


Рис. 3.8. Скорости электронов до и после взаимодействия с разгруппирующим резонатором в зависимости от фазы.

На рисунке 3.9 представлено распределение скоростей электронов перед взаимодействием и после взаимодействия с зазором выходного резонатора. В данном расчёте электроны «антисгустка» перед влётом в резонатор попадают в промежуток фазы с 1 до 5. Периферийные электроны имеют значения скоростей, находящиеся в диапазонах $0,8-0,9v_0$ и $1,1-1,2v_0$ (v_0 – скорость электронов после вылета из электронной пушки).

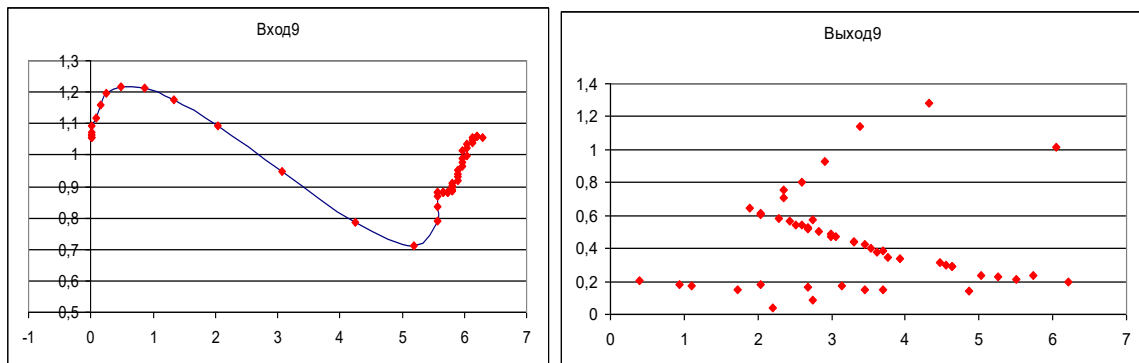


Рис. 3.9. Скорости электронов до и после взаимодействия с выходным резонатором в зависимости от фазы.

Для получения высокой эффективности необходимо найти такие параметры выходной системы клистрона (частота, фаза, ширина зазора выходного резонатора, характеристическое сопротивление, нагруженная добротность и т.д.), при которых скорость всех электронов после прохождения выходного резонатора будет находиться примерно на

одном уровне. Уровень $0,4 v_0$ соответствует электронному КПД 84% ($\eta = 1 - \frac{v^2}{v_0^2}$), где v – скорость электронов после прохождения выходного резонатора.

§ 3.4. Оптимизация первого экспериментального БАК – клистрона

Оптимизация электродинамики клистронного усилителя – это многопараметрическая задача, в которой параметрами выступают ток и напряжение пучка, рабочая частота, уровень входного сигнала (Вт), частоты (ГГц), характеристические сопротивления (Ом) и соответственно геометрические размеры всех резонаторов, добротности собственных колебаний (Q – фактор), нагруженные добротности входной и выходной систем, зазоры всех резонаторов и соответственно их коэффициенты взаимодействия, длины и радиусы труб дрейфа.

Высокая эффективность (72,9% в расчете по программе DEV5.1.) клистрона достигается с помощью ВАС – метода [109]. КПД в случае 9-резонаторного клистрона ВТ258 уменьшилось с 77% до 72,9% в связи с изменением конфигурации резонаторного блока, поскольку полюсные наконечники магнитной системы не позволяли расположить резонаторы в аноде так, как расположены в расчёте с 77% эффективностью. На рисунке 3.10 показана группировка электронов с учётом конструктивных особенностей клистрона.

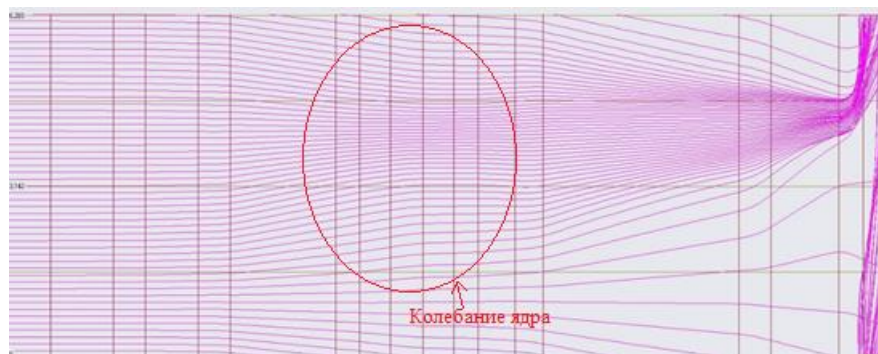


Рис. 3.10. Фазовые траектории электронов в клистроне ВТ258 (DEV 5.1.).

Уменьшение КПД также связано с уменьшением диаметра электронного пучка и, соответственно, с ухудшением взаимодействия в зазорах резонаторов. Диаметр пучка был уменьшен для увеличения токопрохождения электронов через пролётные каналы клистрона. На рисунке 3.11 показано распределение конвекционного тока вдоль осей пролётных каналов. В данном случае амплитуда первой гармоники конвекционного тока уменьшается после прохождения электронами разгруппирующего резонатора.

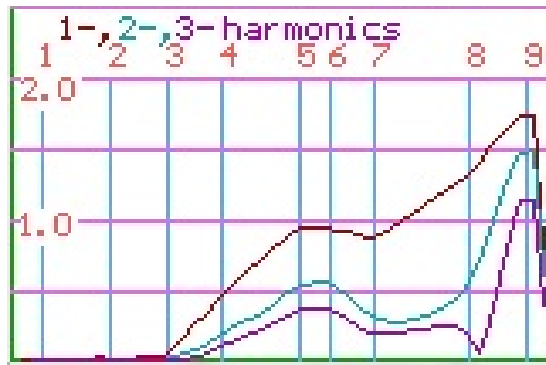


Рис. 3.11. Распределение амплитуд первой, второй и третьей гармоник конвекционного тока вдоль резонаторного блока.

Электронные процессы в клистроне ВТ258 были также протестированы, используя и другие программы. Одномерная программа KlypWin показала КПД 69,5%. Расчёт электродинамики представлен на рисунке 3.12. Двумерная программа Klys2D предсказывает эффективность 66%. Формирование сгустков и амплитуда конвекционного тока в этой программе представлены на рисунках 3.13 и 3.14 соответственно.

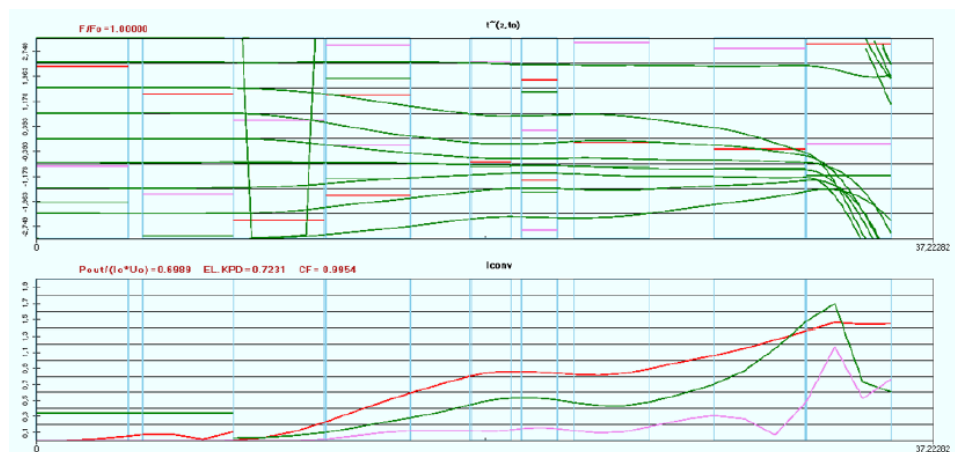


Рис. 3.12. Фазовые траектории электронов в БАК – методе (KlypWin).

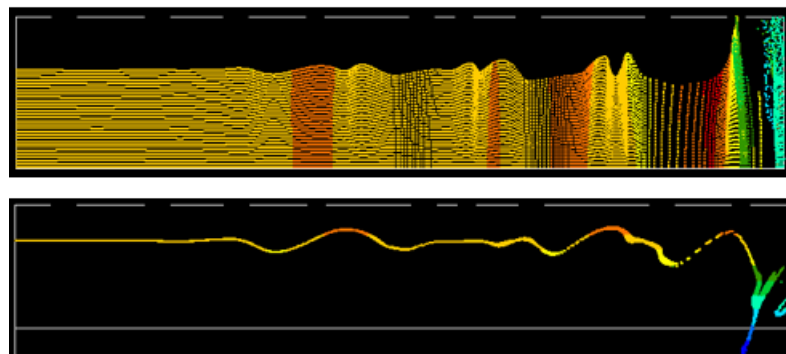


Рис. 3.13. Расчёт электродинамики ВАС – клистрона в двумерной программе Klys2D.

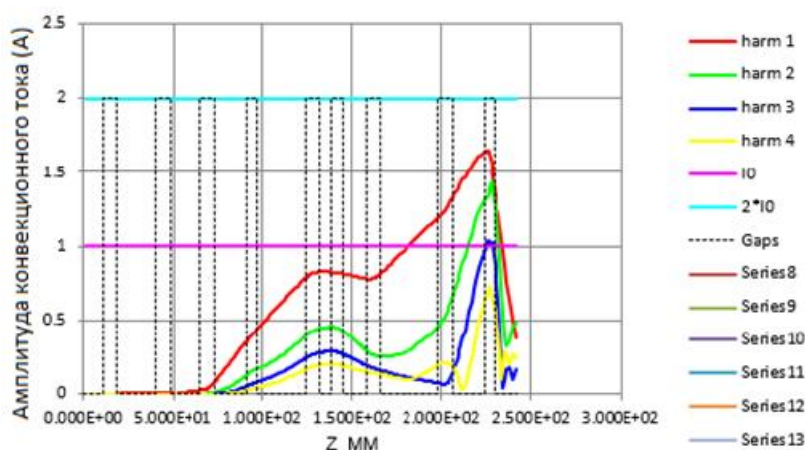


Рис. 3.14. Амплитуда конвекционного тока в двумерной программе Klys2D.

Были проведены расчёты в двумерной программе KlyC с параметрами, взятыми из одномерной задачи ВТ258, в которой эффективность составила 72,9%. Двухмерность программного комплекса заключается в том, что группировку электронов можно исследовать не только по оси Oz, но и в радиальном направлении от оси труб дрейфа.

На рисунке 3.15. представлено формирование сгустков электронов на расстоянии от оси труб дрейфа клистрона, на котором рассчитывается кулоновское взаимодействие. Красными гауссовыми кривыми представлены распределения электрической поля в зазорах резонаторов, за начало отсчёта резонаторного блока взята середина зазора входного резонатора. Результаты расчёта показывают эффективность преобразования энергии электронов в энергию СВЧ – колебаний на уровне 68%.

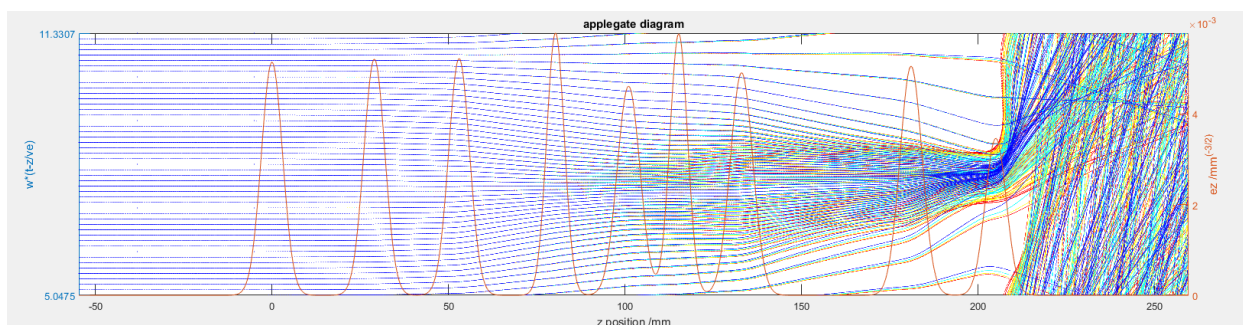


Рис. 3.15. Фазовые траектории электронов клистрона ВТ258 (двумерный комплекс KlyC).

Амплитуды первых гармоник конвекционного тока на различных расстояниях от оси пролётного канала представлены на рисунке 3.16. Следует заметить, что при влёте электронов к выходному резонатору амплитуда конвекционного тока больше там, где больше расстояние от оси труб дрейфа ($1,6I_0$ на оси канала, $1,75I_0$ на расстоянии $0,6$ радиуса труб дрейфа). Связано это тем, что чем дальше электроны находятся от оси

цилиндрического канала, тем сильнее продольное высокочастотное электрического поле резонатора группирует эти электроны. В результате группировки к выходному резонатору прилетают «ромбовидные» сгустки, имея меньшие продольные размеры ближе к полости резонатора. Обратим внимание на то, что в этом расчёте амплитуда тока первой гармоники продолжает увеличиваться после прохождения электронами разгруппирующего резонатора. В результате такой оптимизации требуется увеличивать частоты последующих резонаторов (последняя стадия «collecting» БАК – группировки), то есть ослаблять конечную группировку.

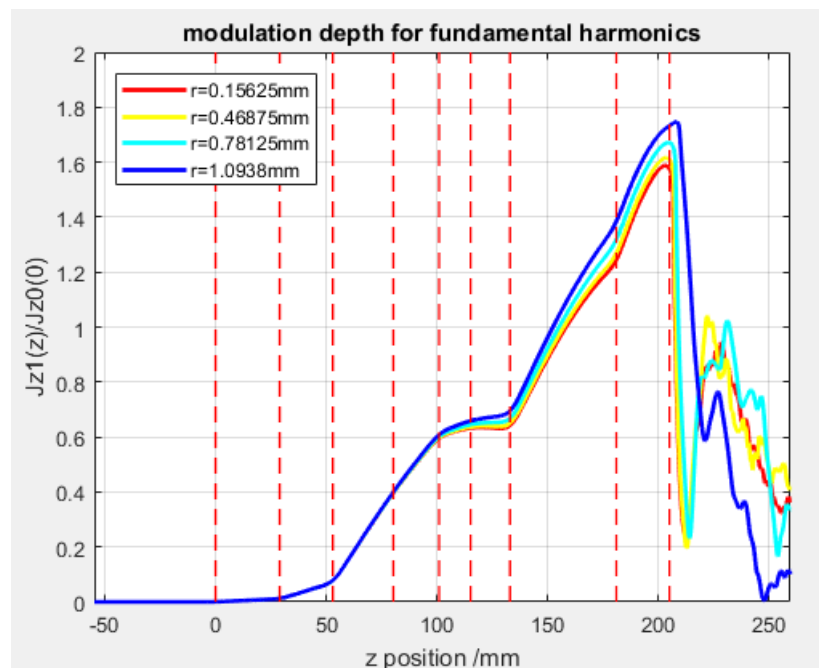


Рис. 3.16. Амплитуда конвекционного тока первой гармоники (двумерный комплекс KlyC).

На рисунке 3.17. представлена электронная эффективность клистрона в данной задаче. Электронная эффективность рассчитывается результатом усреднения скоростей электронов перед влётом и после вылета выходного резонатора. Электронное КПД является критерием проверки эффективности расчёта с помощью амплитуд конвекционного тока. В данном случае КПД превышает уровень 70%.

Распределение разброса скоростей в единицах скорости света можно проследить на рисунке 3.18. Электроны, скорость которых превышает 0,5 c после прохождения выходного резонатора, находились в «антисгустке» до влёта в резонатор (в выходном резонаторе встретились с ускоряющей фазой высокочастотного поля). Задачей любой оптимизации является уменьшение количества таких электронов.

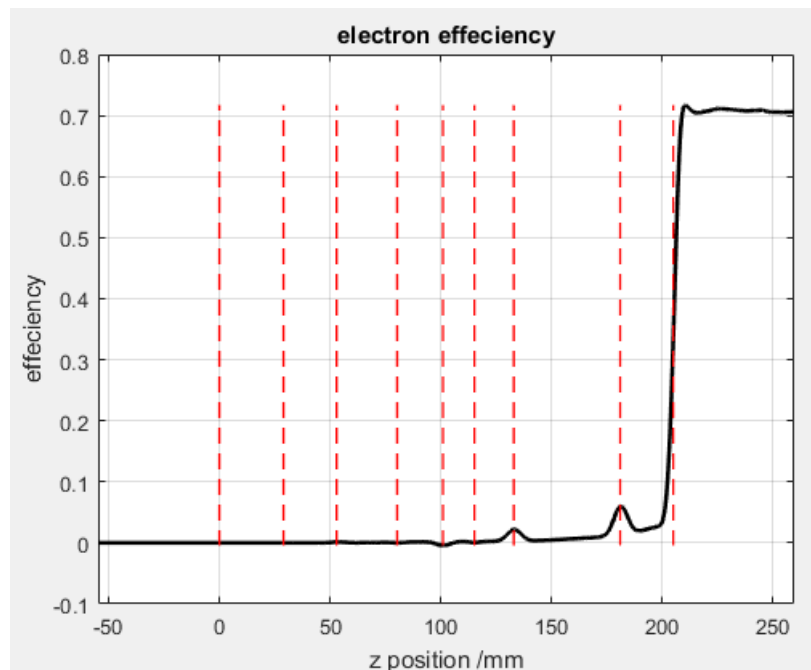


Рис. 3.17. Электронное КПД клистрона ВТ258 (двумерный комплекс КлуС).

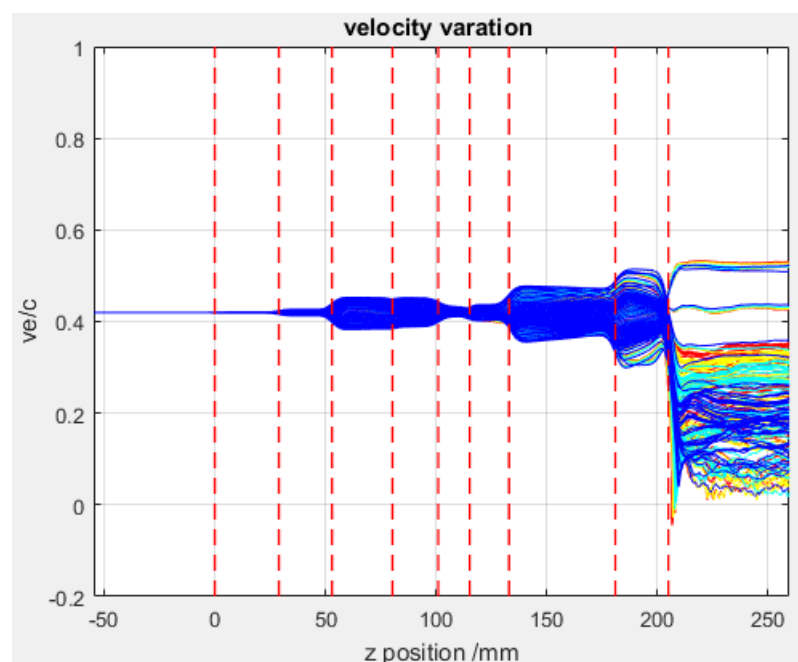


Рис. 3.18. Изменение скоростей электронов в единицах скорости света при прохождении электронов от катода до коллектора (двумерный комплекс КлуС).

После встречи с разгруппирующим (вторая стадия «alignment» БАК – метода) резонатором (в данном случае это пятый резонатор) скорости электронов выровнялись, уменьшился разброс скоростей, при этом сформировался предварительный сгусток (красные штриховые линии означают середины зазоров резонаторов).

Зависимости средних скоростей электронов в единицах c вдоль оси прибора от катода до коллектора при различных расстояниях от оси труб дрейфа представлены на рисунке (красные штриховые линии означают середины зазоров резонаторов) 3.19.

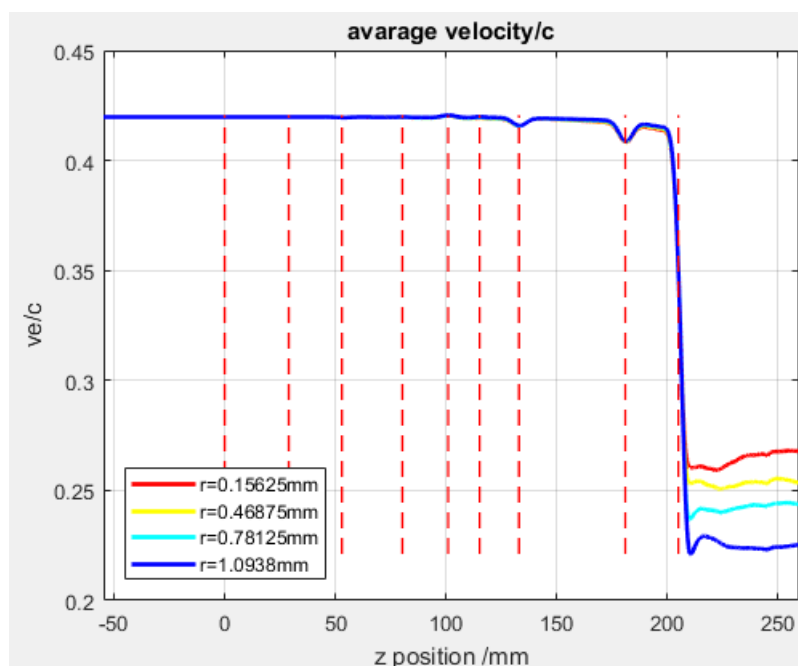


Рис. 3.19. Средние скорости на различных расстояниях от оси канала (двумерный комплекс KlyC).

Следует заметить, что торможение электронов, которые находятся на оси труб дрейфа происходит хуже, чем тех электронов, которые находятся ближе к полости в момент торможения (продольное электрическое поле слабее на оси канала по сравнению с полем возле полости резонатора).

Несмотря на такой разброс результатов расчётов различных одномерных и двумерных программ (67-72% в эффективности), все программные комплексы хорошо предсказывают эффективность выше целевого значения в 60%.

Задачи расчёта группирователей клистронов с целью получения максимально возможного КПД сводятся к поиску оптимального распределения скоростей электронов, пространственного распределения заряда в сгустке, и выяснение условий такой реализации в процессе формирования и торможения сгустков.

Отметим, что в начале таких исследований необходимо увеличить расстройки (сдвиги частот) всех резонаторов, так чтобы группирование электронов было не очень сильным, то есть без пересечения фазовых траекторий (обгона одних электронов другими).

Цель этих исследований – понять, как различные факторы влияют на процесс группирования электронов и сформировать сгусток с хорошей упорядоченностью группирования («слетающийся» сгусток).

§ 3.5. Два БАК – колебания ядра для клистрона с высокой эффективностью

Рассмотрена возможность применения БАК – метода к существующему однолучевому клистрону, который используется будет использоваться в ускорителе FCC. Однолучевой клистрон работает на частоте 800 МГц (L – band) при силе тока 12,6 А и напряжении пучка 133,55 кВ (микроперванс пучка составляет $0,26 \text{ мкА/В}^{3/2}$). Оптимизация проводилась в одномерном программном комплексе DEV 5.1.

Исследована идея использовать два БАК – колебания для получения максимальной эффективности при требуемых габаритах анодного блока. Основной задачей первого БАК – колебания является частичное формирование сгустка с целью дальнейшей разгруппировки во второй секции БАК – резонаторов [110].

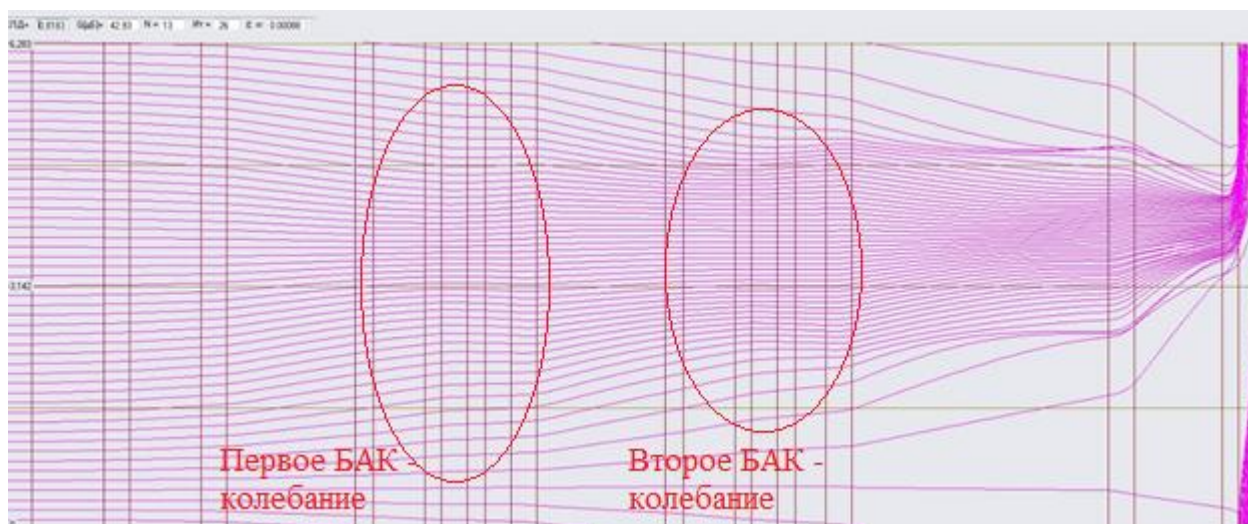


Рис. 3.20. Фазовые траектории электронов в оптимизированном клистроне с двумя БАК – колебаниями.

Оптимизированный клистрон состоит из 13 одноззорных резонаторов, включая две группы БАК – резонаторов по 3 штуки в каждой. Фазовые траектории электронов этого клистронного усилителя представлены на рисунке 3.20. Зазоры резонаторов (сетки) на рисунке фазовых траекторий обозначены парными линиями.

Первая группа БАК – резонаторов – это резонаторы под номерами 4,5,6, 4 и 6 резонаторы настроены на вторую гармонику основного сигнала. Вторая группа БАК –

резонаторов – это резонаторы с порядковыми номерами 8,9,10 (8 и 10 резонаторы – резонаторы второй гармоники). Разгруппирующими резонаторами являются 5 и 9, настроены эти резонаторы на частоту существенно более низкую, чем частота входного сигнала. Расстояние между 11 и 12 секциями выбирается значительно большим, чем длины труб дрейфа между другими секциями для того, что позволить всем электронам собраться в основной сгусток.

По результатам оптимизации получена эффективность 82%. Изменяемыми параметрами были длины труб дрейфа, частоты всех резонаторов, уровень входного сигнала, характеристическое сопротивление и нагруженная добротность входного и выходного резонаторов. Показано, что в конечном «антисгустке» находятся частицы в фазах 0,5, 2, 4,6, выраженных в единицах 2π . График зависимости скоростей электронов в единицах v_{z0} от фазы влёта в выходной резонатор представлен на рисунке 3.21. Периферийные электроны имеют скорости порядка $0,9 v_{z0}$ и $1,05 v_{z0}$. Скорости основного сгустка сосредоточены в диапазоне $0,93 v_{z0} \div 1,03 v_{z0}$ (v_{z0} – скорость, полученная ускоряющим напряжением).

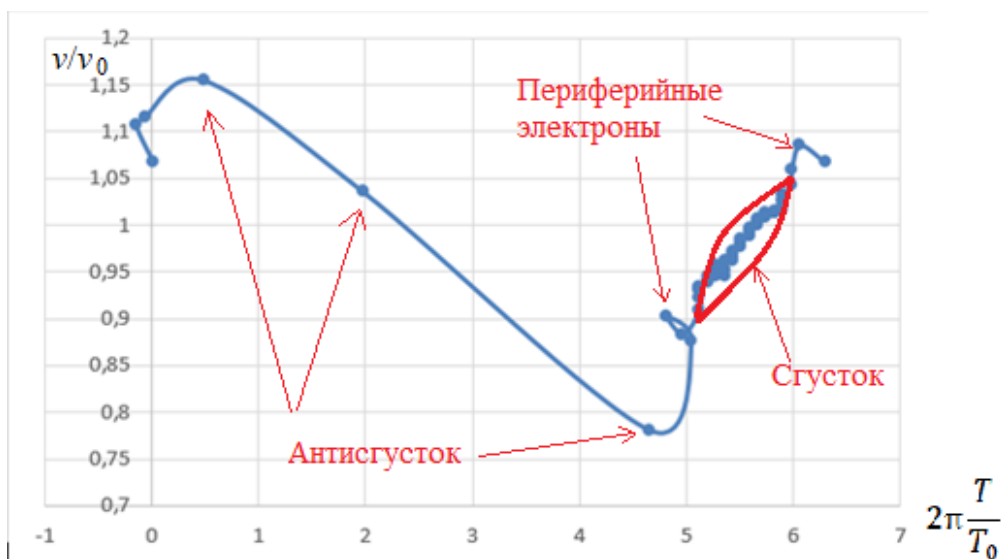


Рис. 3.21. Зависимость скоростей электронов от фазы при влёте в выходной резонатор.

Заметим, что после прохождения разгруппирующих резонаторов, в этом расчёте 5 и 9 резонаторы (пара сеток резонатора показана на рисунке одной линией – центром зазора резонатора), амплитуда конвекционного тока первой гармоники перестаёт расти, выходит в насыщение (рис. 3.22). Электроны частично сгруппировались, а после этого встретились с противоположной фазой высокочастотного поля разгруппирующего резонатора, при этом

произошло выравнивание скоростей. Максимальное значение амплитуды конвекционного тока первой гармоники в выходном резонаторе достигает значения $(1,8 \div 1,82)I_0$.

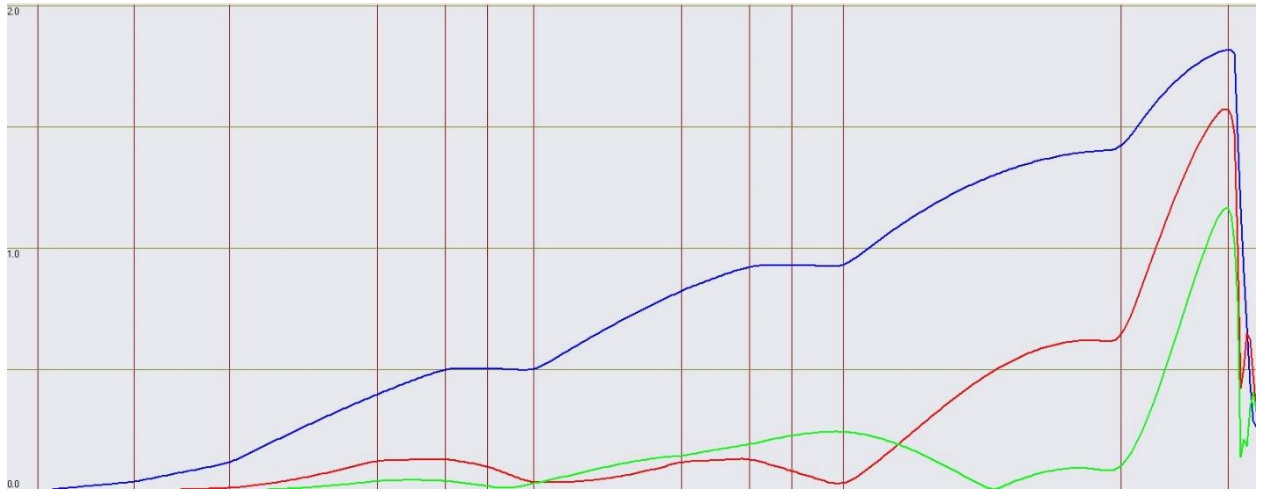


Рис. 3.22. Распределение конвекционного тока в оптимизированном клистроне с двумя БАК – колебаниями (полосами изображены середины зазоров резонаторов).

Распределение высокочастотного напряжения в зазорах резонаторов вдоль оси прибора при использовании группировки с двумя БАК – колебаниями показано на рисунке 3.23. Амплитуды первой гармоники наведенного высокочастотного напряжения в 4, 6, 8, 10 резонаторах отсутствуют (точками обозначены номера резонаторов), поскольку эти резонаторы настроены на вторую гармонику основного сигнала. Наведенное напряжение в выходном резонаторе находится на уровне $1,18 U_0$, где U_0 – ускоряющее напряжение.

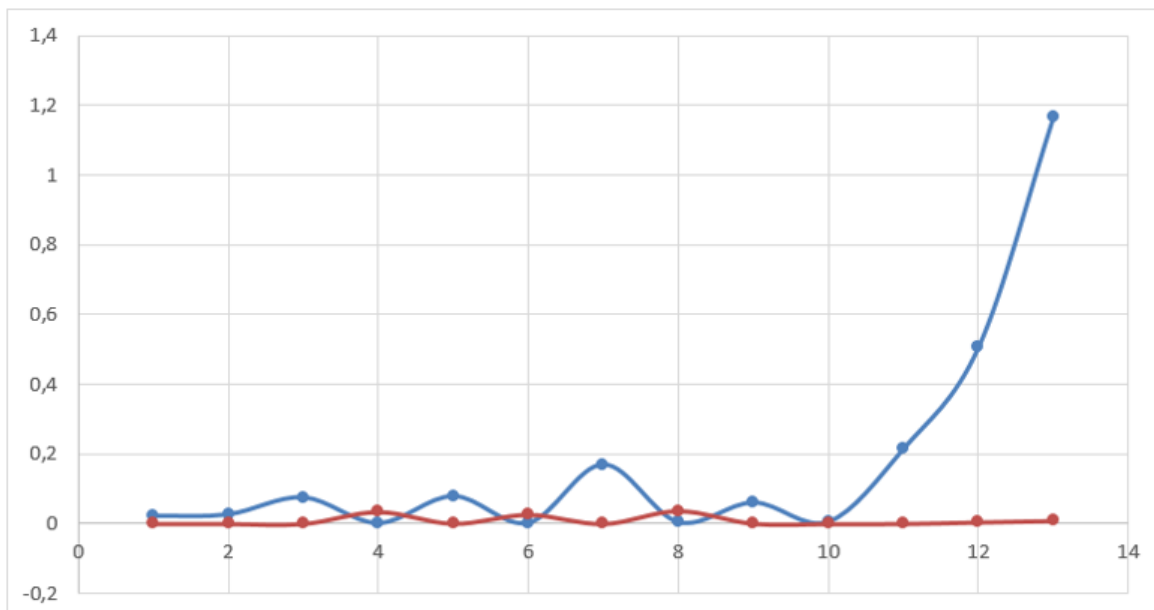


Рис. 3.23. График зависимости наведенных напряжений от номера резонатора (синяя линия – первая гармоника, красная линия – вторая гармоника наведенного напряжения).

Проведём оценку КПД клистрона в первом приближении выражением (3.18):

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{U_1^2}{2\rho Q_n I_0 U_0} \quad (3.18)$$

, где P_0 – мощность пучка, P_1 – мощность высокочастотного поля, U_1 – амплитуда первой гармоники наведенного напряжения в выходном резонаторе, ρ – характеристическое или волновое сопротивление выходного резонатора, которое берется на расстоянии от оси пролётного канала, в котором рассчитывается кулоновское взаимодействие, Q_n – нагруженная добротность выходного резонатора. Значения последних величин берутся из трёхмерного программного комплекса при моделировании конструкции выходного резонатора с нагруженным выходным волноводным трактом.

$$\eta = \frac{U_1^2}{2\rho Q_n I_0 U_0} = \frac{1,18 \cdot 1,18 \cdot U_0}{2 \cdot 140 \cdot 63 \cdot I_0} = 0,84 \quad (3.19)$$

Оценка (3.19) показывает эффективность 84%. Отметим, что режим, близкий к максимально возможной эффективности, является неустойчивым, поскольку при небольшом изменении каких-либо параметров (расстройки частот и волновых сопротивлений резонаторов, длины труб дрейфа и т.д.) или режима питания клистрона (уровень входной мощности, частота входного сигнала, рабочее напряжение, сила тока) электроны, имеющие очень малые скорости, могут начать двигаться в противоположном направлении, отбирая энергию высокочастотного поля резонатора. При проведении расчётов необходимо избегать отражений этих электронов, поскольку они начинают вносить отрицательный вклад в общую эффективность.

Проведено сравнение двух методов группировки электронов в клистронах с одинаковой эффективностью, работающих на одной и той же частоте при одном и том же питающем напряжении. На рисунке 3.24. представлены сравнительные фазовые траектории электронов для СОМ – метода (верхний рисунок) и ВАС – метода (нижний рисунок) при одинаковом КПД 80% и двух колебаниях ядра сгустка. В нерелятивистском случае электронная длина волны задаётся выражением (3.20):

$$L_e = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}} \cdot T \quad (3.20)$$

, где $T = 1/f_0$ – период колебаний высокочастотного поля, U_0 – рабочее напряжение.

В первом случае длина пространства взаимодействия составляет около 13 электронных длин волн, во втором – около 6, что более чем в 2 раза меньше. Таким образом, БАК – метод позволяет получить такую же высокую эффективность (80%) на сравнительно меньшей длине пространства взаимодействия.

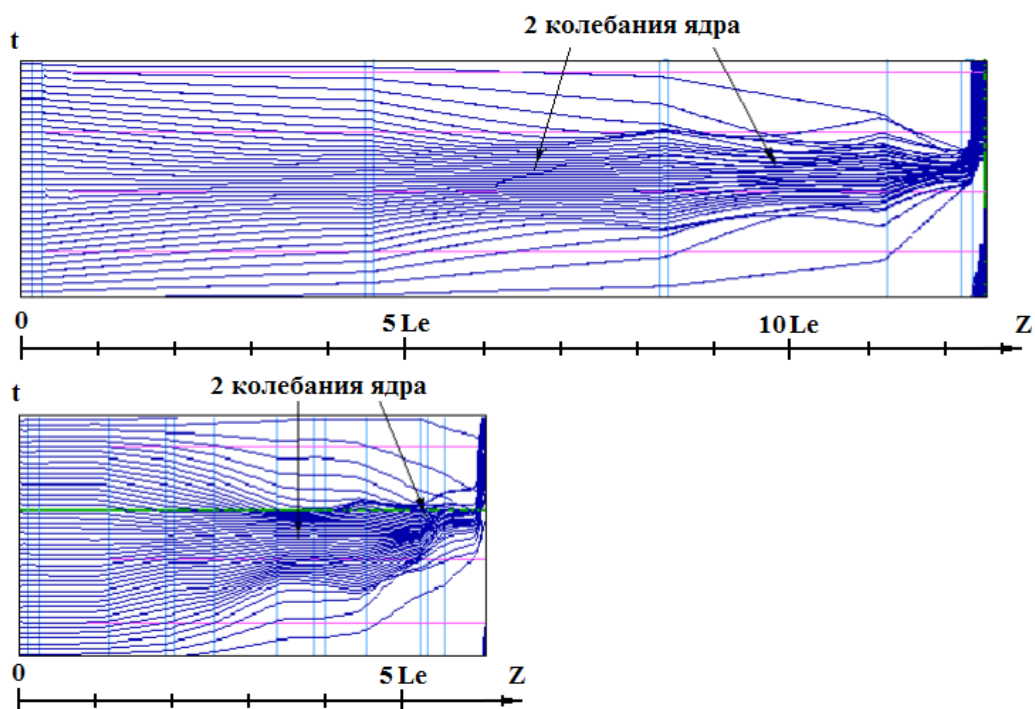


Рис. 3.24. Сравнение группировки СОМ – методом (верхний) и БАК – методом (нижний).

Длина пространства взаимодействия при заявляемом способе становится сравнима с традиционными способами группировки (4-8 L_e), что позволяет использовать предлагаемый способ на практике без увеличения массы и габаритов клистрона.

Полученные результаты (эффективность на уровне 82-83%) могут быть использованы с целью модернизации клистрона для ускорительной техники, поскольку его основные параметры (напряжение, сила тока, длина клистрона) брались у существующего аналога.

Несколько лет назад (2014 г.) исследователями из России (Гузиловым И.А., Байковым Ю.А., Масленниковым О.Ю.) были опубликованы результаты теоретических исследований с новыми идеями группировки электронов (ВАС и СОМ методы) в высокоэффективных клистронах [1-5]. Полученные в 2016 г. Результаты экспериментальных исследований первых двух ВАС – клистронов, разработанных первоначально в России, подтвердили справедливость этих идей.

Идеи СОМ и ВАС группировки электронов были восприняты научным сообществом положительно, после этого исследователи и разработчики по всему миру начали применять эти идеи при создании мощных высокоэффективных клистронов. Активно ведутся работы, использующие СОМ и ВАС методы группировки электронов, первоначально предложенные в России, за рубежом (Китай, Япония, США, Франция) [111].

В 2017 году совместными усилиями группа исследователей из Великобритании, России, США получила расчётную эффективность 84,6% в одномерной программе, используя СОМ технологию группировки электронов, для однолучевого клистрона с выходной мощностью 1,5 МВт, работающего на частоте 800 МГц. Главным недостатком этого клистрона является слишком большая длина его анодного блока (6 м). В настоящий момент группа продолжает работать над идеей, чтобы значительно уменьшить длину анодного блока. Одно из решений – пересчёт имеющегося клистрона на более высокую частоту [112].

В 2017 году в отделении инженерной физики университета Tsinghua (Китай), используя СОМ – метод группировки электронов, было получено расчётное значение эффективности 81% в однолучевом клистроне, работающем на частоте 5,712 ГГц (С-band) при напряжении 50 кВ и силе тока 100 А. Расчётная выходная мощность находится на уровне 4 МВт. Расчёты проводились в одномерной программе AJDisk. Группа рассматривает возможность получения параметров в многолучевом клистроне [113].

В 2017 году в организации Toshiba Electron Tubes and Devices Co., Ltd. (Япония) был разработан однолучевой клистрон, работающий на частоте 2,856 ГГц (S – band), использующий СОМ – группировку электронов. В новой конструкции область группировки за исключением выходного резонатора была изменена при условии сохранения общей длины клистрона. Стандартная область группировки клистрона содержала пять резонаторов. Новая конструкция содержит область двойного колебания ядра и область нелинейного группирователя из трёх резонаторов для формирования плотного сгустка. Общее число резонаторов – десять, два из которых резонаторы 2-й гармоники, они были включены с схему группирователя для уменьшения общей длины. В процессе колебания ядра электроны вне сгустка собираются в основной сгусток, а скорости электронов в нём выравниваются. Описанная многорезонаторная группировка пучка даёт возможность формировать плотный сгусток с малым разбросом энергий в следствии более низких модулирующих напряжений в резонаторах и ослабления влияния пространственного заряда в области ядра сгустка. По результатам испытаний была получена выходная мощность 6,2 МВт с эффективностью 56,9% при напряжении 131,1 кВ и силе тока 83,4 А. Максимальная

мощность в испытаниях составляла 7,5 МВт, КПД при этом снижался до 54,7% (напряжение пучка 144,8 кВ, сила тока пучка 95,2 А). Длительность импульса в обоих режимах была 4,5 мкс при частоте повторения 100 Гц [114].

В 2017 в Пекинском научно-исследовательском институте вакуумной электроники группа исследователей провела расчёты эффективности, в которых был применён БАК – метод группировки электронов, существующего клистрона, предназначенного для медицинских ускорителей. В расчётах однолучевого клистрона, работающего на частоте 2,856 ГГц с выходной мощностью 5,5 МВт при напряжении питания 130 кВ и силе тока 90 А, группе удалось поднять КПД на 10% с помощью БАК – группирования [115].

В 2017 году группа американских исследователей из Национальной ускорительной лаборатории SLAC испытала реконструированный однолучевой клистрон 5045, в котором резонаторный блок имел 10 резонаторов, включая БАК – резонаторы, вместо 6 резонаторов предыдущей версии клистрона 5045. Клистрон работает на частоте 2,856 ГГц (S – band) с пиковой выходной мощностью 65 МВт. С помощью БАК – метода группировки электронного потока разработчикам удалось повысить КПД экспериментального клистрона с 45 до 55%. Во время динамических испытаний группа исследователей испытала проблемы, связанные с длительностью импульса. При длительности импульса большей 1 мкс связывались виды колебаний резонаторов второй гармоники в клистроне [116-117].

§ 3.6. Выводы

1) Методами компьютерного моделирования исследован новый БАК – метод («bunching, alignment, collecting») группирования электронов, в котором плотность конечного сгустка увеличивается с помощью его разгруппировки и сбора периферийных (крайних) электронов сгустка электрическими полями дополнительных резонаторов как первой, так и второй гармоники. При этом принудительно уменьшается амплитуда конвекционного тока разгруппирующими резонаторами. Результаты моделирования подтвердили обоснованность и перспективность данного метода.

2) Показано, что частота разгруппирующего резонатора БАК – клистрона с одним колебанием ядра должна быть существенно ниже частоты основного сигнала, и выбрана из диапазона $0,7 f_0 < f_5 < f_0$, где f_0 – частота основного сигнала. В распределении скоростей электронов после вылета из разгруппирующего резонатора происходит выравнивание их скоростей (электроны встречаются с противоположной фазой высокочастотного поля). В оптимизированном варианте на третьей стадии («collecting») БАК – метода амплитуды

первой гармоники высокочастотного напряжения предвыходных резонаторов находятся на уровне $0,3 U_0$ и $0,4 U_0$ соответственно.

3) Показано, что с помощью БАК – метода может быть достигнут рост эффективности на 12% исходного клистрона, взятого за прототип. Несмотря на разброс результатов расчётов (67-72% в эффективности) различных одномерных и двумерных программ, все они хорошо предсказывают эффективность выше целевого значения в 60%.

4) По результатам расчётов БАК – клистронов в двумерных программах было выяснено, что к выходному резонатору прилетают «ромбовидные» сгустки, имея меньшие продольные размеры ближе к полости резонатора, поскольку чем дальше электроны находятся от оси цилиндрического канала, тем сильнее продольное электрического поле резонатора группирует эти электроны.

5) Было предложено использовать два БАК – колебания для получения максимальной эффективности однолучевого клистрона, работающего на частоте 800 МГц (L – band). Клистрон состоит из 13 однозачорных резонаторов, включая две группы БАК – резонаторов по 3 штуки в каждой. Максимальное значение амплитуды конвекционного тока первой гармоники в выходном резонаторе достигает значения $(1,8 \div 1,82)I_0$. Эффективность клистрона при этом находится на уровне 82-83%. Полученные результаты могут быть использованы с целью модернизации клистронов для ускорительной техники.

6) Проведено сравнение БАК – метода группировки электронов с двумя колебаниями ядра и СОМ – метода группировки в клистромах с одинаковой эффективностью (80%), работающих на одной и той же частоте при одном и том же питающем напряжении. Во втором случае длина пространства взаимодействия составляет около 13 электронных длин волн, во первом – около 6. Таким образом, БАК – метод позволяет получить такую же высокую эффективность на сравнительно меньшей длине пространства взаимодействия. Длина пространства взаимодействия в БАК – методе сравнима с традиционными способами группировки (4-8 L_c), что позволяет использовать предлагаемый способ на практике без увеличения массы и габаритов клистрона.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ БАК – КЛИСТРОНА

§ 4.1. Введение

Для практической реализации первого БАК – клистрона, параметры которого представлены в таблице 4.1, необходимо решить следующие задачи:

- задачи на собственные значения для резонаторов клистрона с целью определения собственных частот, добротности, волнового или характеристического сопротивления, распределения электрических полей;

- задачи электронной оптики и формирования электронного пучка в фокусирующих магнитных полях, определения величины магнитного поля в рабочих промежутках;

- задачи энергообмена в выходной системе прибора, оптимизации выходной системы прибора, необходимо провести анализ высших типов колебаний и их взаимодействия с пучком для предотвращения перекачки энергии в эти высшие типы колебаний и возможного самовозбуждения системы.

- задачи вывода «отработанного» после выходной системы пучка в коллекторную систему и решение задачи равномерного осаждения пучка на её поверхности.

Таблица 4.1. Параметры многолучевого клистрона.

Частота, ГГц	2,9985
Пиковая выходная мощность, МВт	>6
Средняя мощность, кВт	30
Напряжение пучка, кВ	<60
Количество пучков	40
Длина импульса, мкс	5
Эффективность, %	>60
Частота повторения импульсов, Гц	300

Решение всех этих проблем будет представлено в последующих параграфах этой главы.

§ 4.2. 3D модель кольцевого резонатора

Существуют различные методы решения задач электроники СВЧ: метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной или частотной области, метод конечных интегралов и многие другие.

Метод конечных интегралов, предложенный Томасом Вейландом в 1977 г., представляет собой дискретную формулировку уравнений Максвелла в интегральной форме. Этот метод позволяет моделировать реальные структуры со сложной конфигурацией, заполняя пространство тетраэдральными элементами. Метод конечных интегралов эффективен при расчете статических полей сложной конфигурации и позволяет проводить моделирование трехмерных систем различной сложности. Он может быть реализован как в частотной, так и во временной области.

Система уравнений Максвелла решается в ограниченной односвязной пространственной области $\Omega \in R^3$. Для произвольных S и $V \in R^3$ уравнения Максвелла в интегральном виде (4.1) с материальными уравнениями (4.2) имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_{\partial S} \vec{E}(\vec{r}, t) d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} d\vec{s}, \\ \oint_{\partial S} \vec{H}(\vec{r}, t) d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{j}(\vec{r}, t) \right) d\vec{s}, \\ \oint_{\partial V} \vec{D}(\vec{r}, t) d\vec{s} = \iiint_V \rho(\vec{r}, t) dV, \\ \oint_{\partial V} \vec{B}(\vec{r}, t) d\vec{s} = 0. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_s. \quad (4.2)$$

, где \vec{E} – вектор напряжённости электрического поля, \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{D} – вектор индукции электрического поля, \vec{H} – вектор напряжённости магнитного поля, \vec{j} – плотность тока, \vec{j}_s – плотность свободных токов, ρ – плотность электрического заряда, ε – диэлектрическая проницаемость среды, μ – магнитная проницаемость среды, σ – проводимость, S – поверхность, ограниченная замкнутым контуром ∂S , V – объем, ограниченный замкнутой поверхностью ∂V , $d\vec{l}$ – бесконечно малый векторный элемент контура ∂S , $d\vec{s}$ – бесконечно малый векторный элемент поверхности S .

Область разбивается на конечное число непересекающихся тетраэдральных (четырёхгранных), гексагональных (шестигранных) ячеек, то есть все ячейки точно прилегают друг к другу. Разбиение проводится при помощи расчетных сеток. Это могут быть как декартовы сетки, так и любые другие координатные сетки.

Положим, что область Ω имеет форму куба, и разбиение на сетку вводится для декартовой системы координат так, что имеем набор ячеек

$$G = \{V_{i,j,k} \in R^3 \mid V_{i,j,k} = [x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}] \times [z_k, z_{k+1}], \\ i = \overline{1, I-1}, j = \overline{1, J-1}, k = \overline{1, K-1}\}$$

, где узловые точки (x_i, y_j, z_k) пронумерованы в соответствии с координатами i, j, k вдоль осей X, Y, Z. Общее количество точек $I \cdot J \cdot K$ для $(I-1)(J-1)(K-1)$. Закон Фарадея может быть переписан для $S_z(i, j, k)$ ячейки V_n (рис. 4.1) как обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i+1, j, k) - \hat{e}_x(i, j+1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) = -\frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k) \quad (4.3)$$

, где скалярная величина

$$\hat{e}_x(i, j, k) = \int_{(x_i, y_j, z_k)}^{(x_{i+1}, y_j, z_k)} \overline{E} \cdot \overline{dl} \quad (4.4)$$

является электрическим напряжением вдоль одного ребра поверхности $S_z(i, j, k)$.

Скалярная величина $\overline{B} \cdot \overline{dS}$

$$\hat{b}_z(i, j, k) = \oiint \overline{B} \cdot \overline{dS} \quad (4.5)$$

является магнитным потоком, т. е. величиной плотности магнитного потока через грань $S_z(i, j, k)$ ячейки (рис. 4.1).

Такие же выражения можно получить для всех граней ячеек сетки. При этом электрические напряжения $\hat{e}_x(i, j, k)$, $\hat{e}_y(i, j, k)$, $\hat{e}_z(i, j, k)$ и магнитные потоки $\hat{b}_x(i, j, k)$, $\hat{b}_y(i, j, k)$, $\hat{b}_z(i, j, k)$, можно сгруппировать в отдельные вектора-столбцы \overline{e} и \overline{b} .

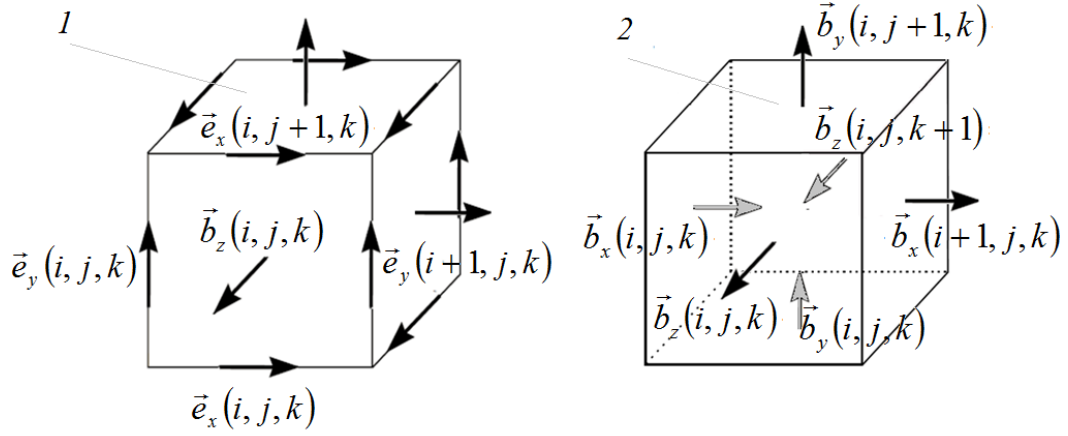


Рис. 4.1. Ячейка $V_{i,j,k-1}$ с указанными электрическими напряжениями на рёбрах и магнитными потоками через поверхность.

Тогда уравнение для всех ячеек сетки может быть записано в матричном виде:

$$C\bar{e} = -\frac{d}{dt}\bar{b}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}_x(0,0,0) \\ \dots \\ \hat{e}_z(I,J,K) \end{pmatrix} = -\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{b}_x(0,0,0) \\ \dots \\ \hat{b}_z(I,J,K) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Матрица C представляет собой дискретный оператор ротора на сетке. Элементы матрицы принимают целочисленные значения $C_{ij} = \{-1; 0; 1\}$.

Если рассмотреть ячейку справа на рис. 4.1, то оценка для интеграла, описывающего отсутствие магнитных зарядов, по поверхности имеет вид:

$$-\hat{b}_x(i,j,k) + \hat{b}_x(i+1,j,k) - \hat{b}_y(i,j,k) + \hat{b}_y(i,j+1,k) - \hat{b}_z(i,j,k) + \hat{b}_z(i,j,k+1) = 0 \quad (4.7)$$

При расширении соотношения на все ячейки получим матрицу дискретной дивергенции. Уравнение (4.7) представляет собой дискретную запись четвертого уравнения системы уравнений Максвелла (4.1).

$$S\bar{b} = 0$$

$$\left(\begin{array}{ccccccc} \dots & & & & & & \\ \dots & -1 & 1 & & & & \\ \dots & & \dots & & & & \\ \dots & & & -1 & 1 & \dots & \\ \dots & & & & & & \end{array} \right) \begin{pmatrix} \dots \\ \hat{b}_x(i, j, k) \\ \hat{b}_x(i+1, j, k) \\ \hat{b}_y(i, j, k) \\ \hat{b}_y(i, j+1, k) \\ -\hat{b}_z(i, j, k) \\ \hat{b}_z(i, j, k+1) \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix} = 0 \quad (4.8)$$

Элементы матрицы принимают целочисленные значения $S_{ij} = \{-1; 0; 1\}$.

Для дискретизации второго и третьего уравнений системы (4.1) используется такая же схема, как и для дискретизации первого и четвертого уравнений, примененная к вторичной ортогональной сетке \tilde{G} , дуальной (вторичная) основному набору ячеек G . Под дуальностью подразумевается 1) каждую грань ячеек основной сетки пересекает только одно ребро дуальной сетки и наоборот, 2) каждая ячейка основной сетки содержит одну и только одну вершину дуальной сетки и наоборот. Для декартовой системы координат дуальная сетка определяется путем выбора для вершин ячеек сетки \tilde{G} центры ячеек G .

В итоге уравнения Максвелла переписываются следующим образом:

$$\begin{cases} c\bar{e} = -\frac{d}{dt}\bar{b} \\ \tilde{c}\bar{h} = -\frac{d}{dt}\bar{d} + \bar{j} \\ \tilde{S}\bar{d} = q \\ \tilde{S}\bar{b} = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Систему уравнений (4.9) называют системой сеточных уравнений Максвелла. Матрицы \tilde{C} и \tilde{S} представляют собой дискретные операторы ротора и дивергенции соответственно на вторичной сетке.

Дискретные материальные матричные уравнения имеют вид:

$$\bar{d} = M_\epsilon \bar{e} + \bar{p}, \quad \bar{j} = M_\sigma \bar{e}, \quad \bar{h} = M_\mu \bar{b} - \bar{m}, \quad (4.10)$$

, где M_ϵ , M_μ и M_σ – матрицы диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и проводимости соответственно, \bar{p} и \bar{m} – происходят от электрической и магнитной поляризаций.

Преобразование в частотной области для уравнений Максвелла гармоническим полем $\bar{e}(t) = Re(\bar{e}_0 \exp(j\omega t))$ для случая материалов без потерь ($M_\sigma = 0$) и без внешнего источника тока $\bar{j}^{ex} = 0$ дает систему:

$$\begin{aligned} C\bar{e}_0 &= -j\omega\bar{b}_0, \\ \tilde{C}M_\mu\bar{b}_0 &= j\omega M_\varepsilon\bar{e}_0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Объединение этих уравнений приводит к алгебраической задаче поиска собственных частот

$$\tilde{C}M_\mu C\bar{e}_0 = \omega^2 M_\varepsilon\bar{e}_0 \quad (4.12)$$

Это выражение положено в основу задачи вычисления собственных частот резонирующих структур.

Моделирование резонатора в режиме вычисления собственных значений позволяет получить значения частот и структуры мод основной и высших мод высокочастотных колебаний резонатора. Также определяются характеристические или волновые сопротивления (R/Q – фактор) на оси каналов резонатора каждой моды высокочастотного поля по полученному распределению электрического поля.

По результатам оптимизации электродинамической системы клистрона ВТ258 принято решение использовать девять кольцевых резонаторов, два резонатора настроены на вторую гармонику. Фрейдовичем И.А. был предложен вариант конструкции кольцевого резонатора первой гармоники для многолучевого клистрона. В каждом резонаторе находится 40 пролётных каналов: 21 внешних и 19 внутренних (рис. 4.2) [118].

В полости резонатора имеются ёмкостная часть, содержащая 40 пролётных каналов, расположенных в два ряда по азимуту, а также две индуктивные части. Резонаторы обладают осевой симметрией. Все девять резонаторов клистрона рассчитывались в трёхмерных пакетах, в которых число разбиений сетки определяет время и точность расчёта.

В данном исследовании первоначально проводился расчёт частоты f и величины характеристического сопротивления ρ в осях каналов для определения неоднородности электромагнитного поля в резонаторах. Затем в ходе оптимизации геометрические размеры индуктивной части резонаторов подбирались таким образом, чтобы создать одинаковое характеристическое сопротивление для внутреннего и внешнего рядов каналов (создать одинаковые условия для группировки электронов всех пучков) при сохранении требуемой

частоты резонатора. Такой порядок действий был выполнен для всех 9 резонаторов клистрона.

Неоднородность электрического поля исследовалась по относительному характеристическому волновому сопротивлению ρ ($(\rho_{\max}-\rho)/\rho_{\max}$), где ρ_{\max} – максимальное волновое сопротивление в определенном пролётном канале резонатора. Чем ближе к нулю эта величина, тем однороднее электрическое поле в каналах резонатора.

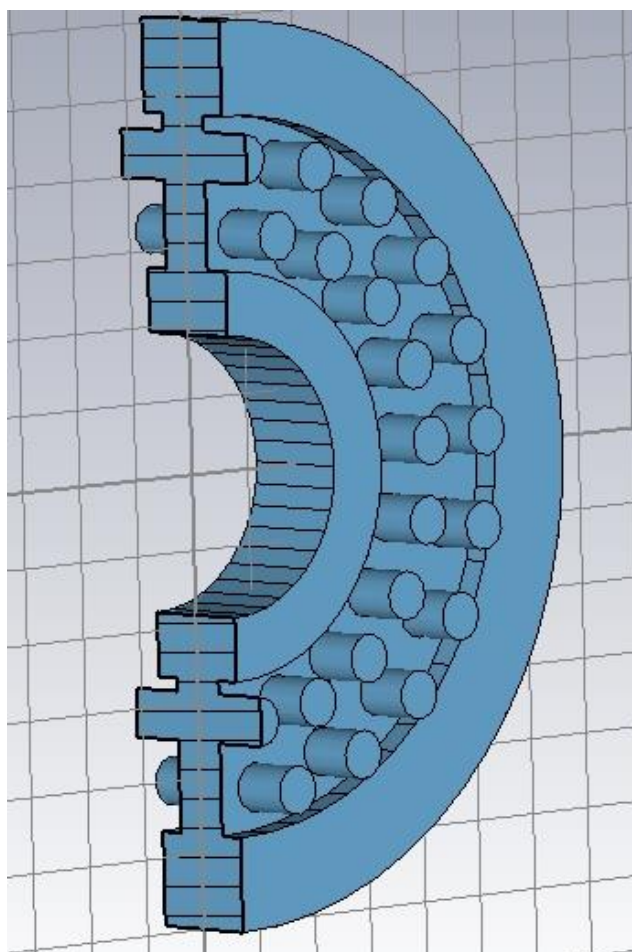


Рис. 4.2. Разрез вакуумной части резонатора первой гармоники.

На рисунке 4.3 показан спектр пяти первых мод собственных колебаний этого резонатора. Количество тетраэдров в разбиении при расчёте составляло величину около 80000, расчётное время составляло около получаса. На рисунках 4.4 – 4.6 показано распределение высокочастотного электрического поля первых пяти мод этого резонатора (рис. 4.2). Все моды являются азимутальными. Максимальное значение электрического поля соответствует красному цвету. Вторая и третья моды (TM_{110}) имеют два минимума электрического поля (рис. 4.5), то есть две полуволны укладываются в азимутальном направлении. Четвертая и пятая моды (TM_{120}) имеют 4 минимума электрического поля,

наблюдаются 4 полуволны в плоскости поперечного сечения (рис. 4.6) [119,120]. Вторая и третья, а также четвертая и пятая моды являются связанными, имеют близкие частоты. Распределения высокочастотных электрических полей этих видов колебаний смещены на $\pi/2$ друг относительно друга.

Frequency (GHz)	
Mode 1	(2.97770e+000, 0.00000e+000)
Mode 2	(3.24583e+000, 0.00000e+000)
Mode 3	(3.24586e+000, 0.00000e+000)
Mode 4	(3.92235e+000, 0.00000e+000)
Mode 5	(3.92276e+000, 0.00000e+000)

Рис. 4.3. Модовый состав кольцевого резонатора первой гармоники.

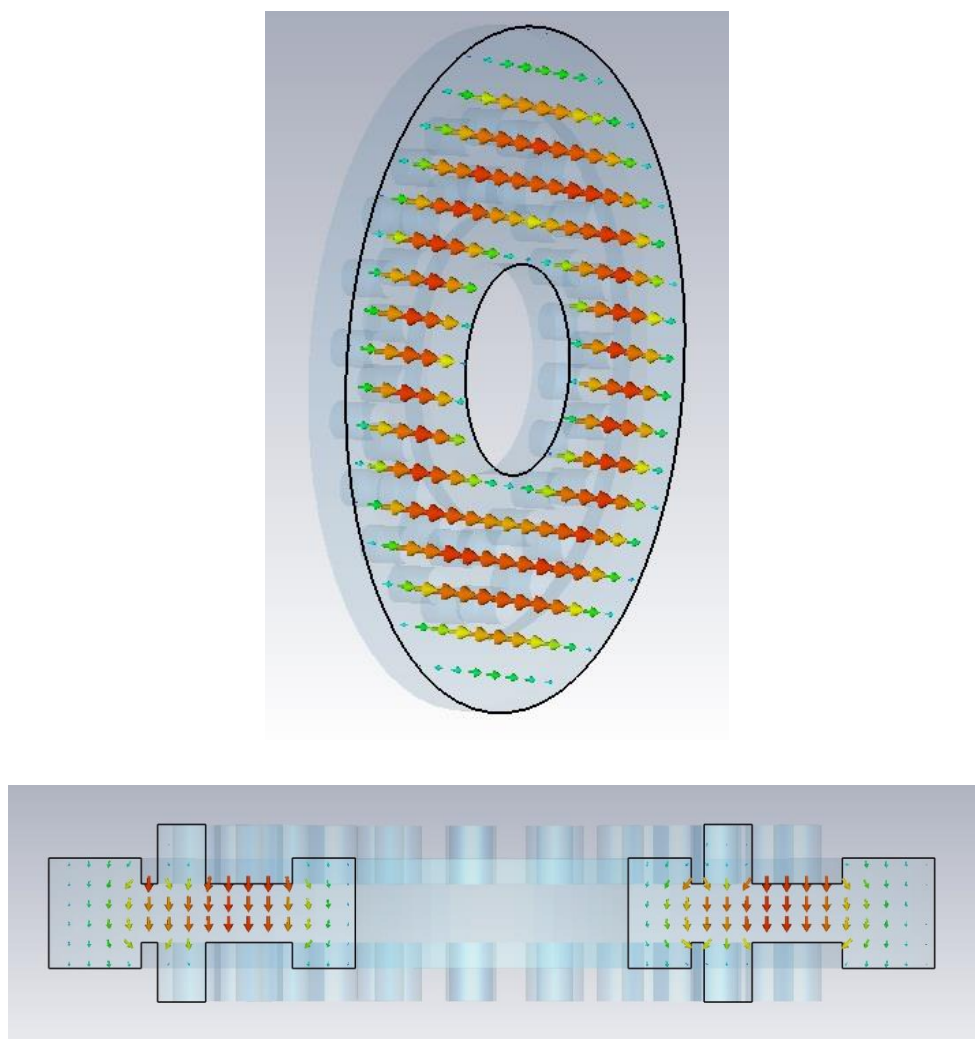


Рис. 4.4. Распределение векторов электрического поля первой (рабочей) моды колебаний (TM₁₀₀).

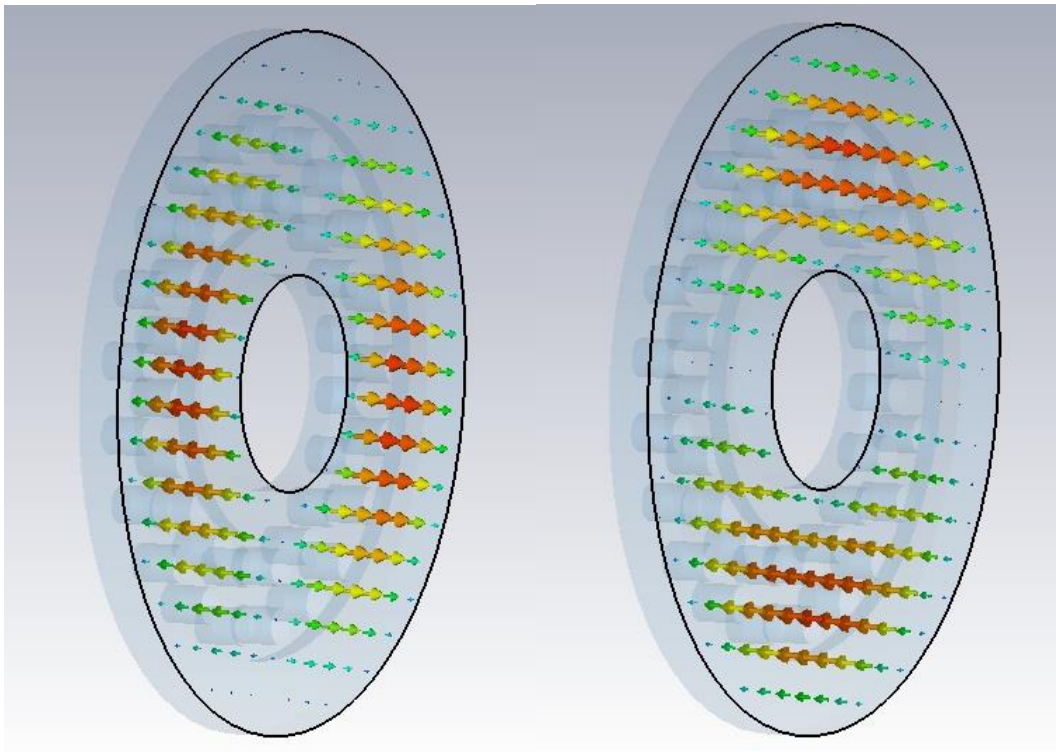


Рис. 4.5. Распределение векторов электрического поля моды TM_{110} .

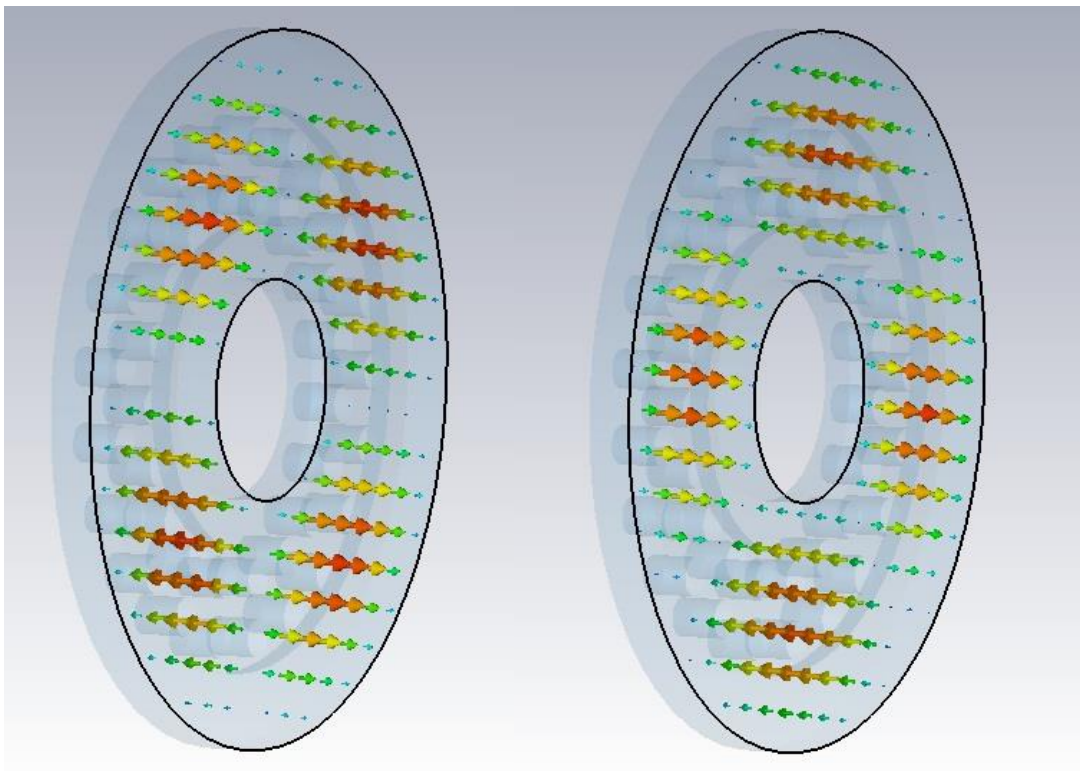


Рис. 4.6. Распределение векторов электрического поля моды TM_{120} .

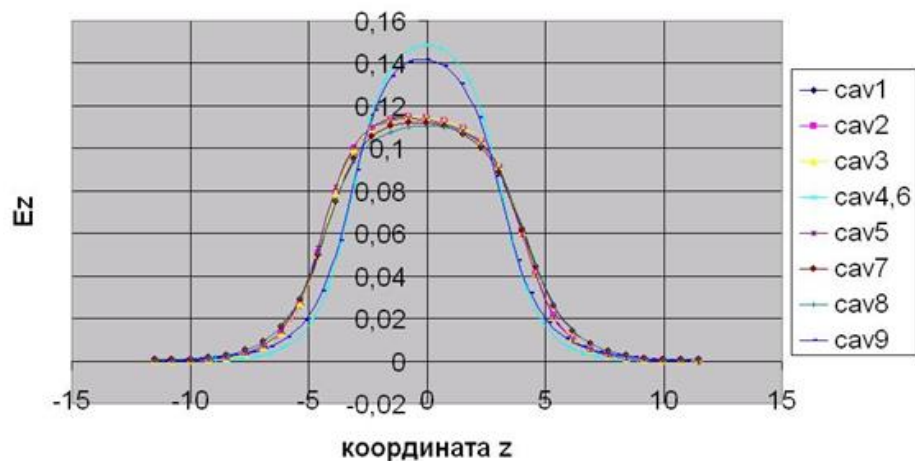


Рис. 4.7. Распределения продольных компонент электрического поля в зазорах резонаторов.

Нормированные распределения продольных компонент электрического поля в зазорах всех резонаторов, выбранных в одном из каналов (рис. 4.7). Распределения компонент электрического поля резонаторов под номерами 4 и 6, резонаторов второй гармоники, существенно отличается от распределений резонаторов первой гармоники в связи с существенно меньшим зазором (примерно в 2 раза) резонаторов второй гармоники.

СВЧ сигнал вводится в клистрон посредством петли связи (рис. 4.8), размещенной перпендикулярно силовым линиям высокочастотного магнитного поля рабочего вида колебаний. Размеры петли подбираются в эксперименте для обеспечения необходимой частоты поля и равномерности его распределения в азимутальном направлении.

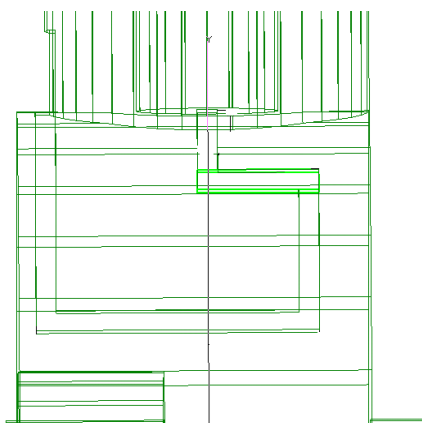


Рис. 4.8. Конфигурация петли связи в клистроне.

Модовый состав и структура мод выходного резонатора будут рассмотрены в §4 этой главы.

§ 4.3. Электронная оптика и магнитная система

Следующим важным шагом является подбор оптимального внешнего фокусирующего магнитного поля и оптимизация электронно-оптической системы клистрона, поскольку в отсутствие необходимых параметров электронного потока из-за различных оседаний выходная мощность и КПД клистрона будут иметь недостаточные значения.

Диаметр пучка остаётся постоянным при вращении и продольном движении от катода до коллектора в отсутствие радиальных компонент скоростей в трубах дрейфа, если силы, сжимающие пучок (внешнее магнитное поле) уравновешены силами, расширяющими электронный пучок (силы пространственного заряда, центробежные силы).

Если плотность пространственного заряда пучка неизменна на всей его длине и на катоде отсутствует магнитное поле, то значение внешнего магнитного поля, при котором оно полностью компенсирует поля пространственного заряда и центробежные силы, называется бриллюэновским. Вращающееся движение электронов пучка с постоянным диаметром называется бриллюэновским потоком. Когда пучок покидает магнитное поле при движении в коллектор, радиальная сжимающая сила исчезает и вращение пучка прекращается. После этого пучок расходится под действием сил пространственного заряда [121].

Равновесный радиус пучка определяется соотношением (4.13) (система единиц СИ):

$$a = \frac{1}{B_z} \sqrt{\left(\frac{2I_0}{\pi\gamma\epsilon_0 v_0}\right)} \quad (4.13)$$

, B_z – аксиальная индукция магнитного поля, I_0 – ток пучка, v_0 – продольная скорость пучка, γ – отношение заряда электрона к его массе, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная

На практике очень сложно достичь условия полного баланса действующих сил, выполнение которого требуется для получения потока Бриллюэна. Радиус пучка колеблется при его движении в продольном направлении. Периодическое изменение радиуса пучка называется пульсациями. Пучок сужается и начинает пульсировать из-за того, что внешние фокусирующие силы больше, чем поля пространственного заряда и центробежные силы. Несоосность пучка приводит к тому, что весь пучок вращается по спирали вокруг оси магнитного поля с циклотронной частотой.

Существует ряд проблем, с которыми можно столкнуться при попытке сформировать бриллюэновский поток,двигающийся в продольном направлении (индукция магнитного поля чрезмерно мала или избыточно велика, расходимость или сходимостъ пучка на входе в магнитное поле, смещение оси распространения пучка).

Поток Бриллюэна имеет преимущество, состоящее в том, что требуемое для его формирования магнитное поле меньше, чем при других способах фокусировки. Главный же недостаток заключается в крайней чувствительности пучка к малейшим несоосностям и возмущениям, которые могут возникать из-за модуляции скоростей электронов высокочастотным полем.

На практике используемое фокусирующее магнитное поле больше бриллюэновского значения. Связано это с наличием поперечных скоростей электронов и увеличения размеров пучка вследствие высокочастотной модуляции и дальнейшего формирования сгустков. Магнитное поле увеличивается по направлению к коллектору для того, чтобы держать пучок, компенсируя эффекты пространственного заряда, которые значительно возрастают с увеличением плотности электронов в сгустке.

В настоящее время главная проблема для катодной технологии многолучевого клистрона – разработка эмиттеров с высокой плотностью тока и длительным рабочим временем жизни. Требования в плотности тока для эмиттера одного пучка находятся в диапазоне от 10 А/см² и может достигать 40 А/см² в зависимости от мощности и частоты работы клистрона. Практические ограничения катодной нагрузки приблизительно составляют 15 А/см².

Присутствие радиального магнитного поля, которое является причиной азимутального вращения в пучках, - другая важная проблема. Спиральное движение должно быть подавлено для того, чтобы осуществить хорошую передачу пучка. Отношение радиально магнитного поля к аксиальному магнитному полю должно быть меньше или равно 2%, чтобы обеспечить 99% токопрохождение без модуляции СВЧ сигнала и 96% в СВЧ режиме.

Важным преимуществом разработанного БАК – клистрона ВТ258 является применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид. Такой выбор позволяет уменьшить потребление энергии, вес и стоимость клистрона [122-123].

Проведена оптимизация электронно-оптической системы на основе реверсивной магнитной фокусировки. Целью оптимизации было уменьшение радиуса пучка для предотвращения потерь тока на стенках каналов. Проведен выбор оптимальных значений магнитного поля в рабочих промежутках магнитной системы для получения 100% токопрохождения электронов вдоль пролётных каналов резонаторного блока до коллектора (рис. 4.9-4.10).

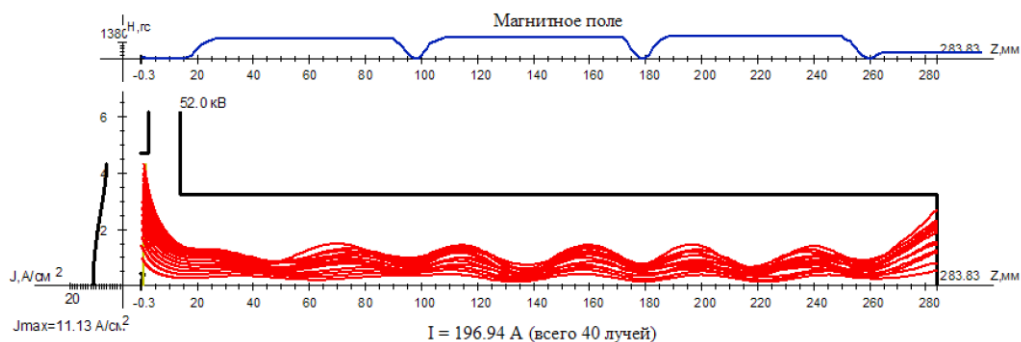


Рис. 4.9. Результаты оптимизации электронной оптики.

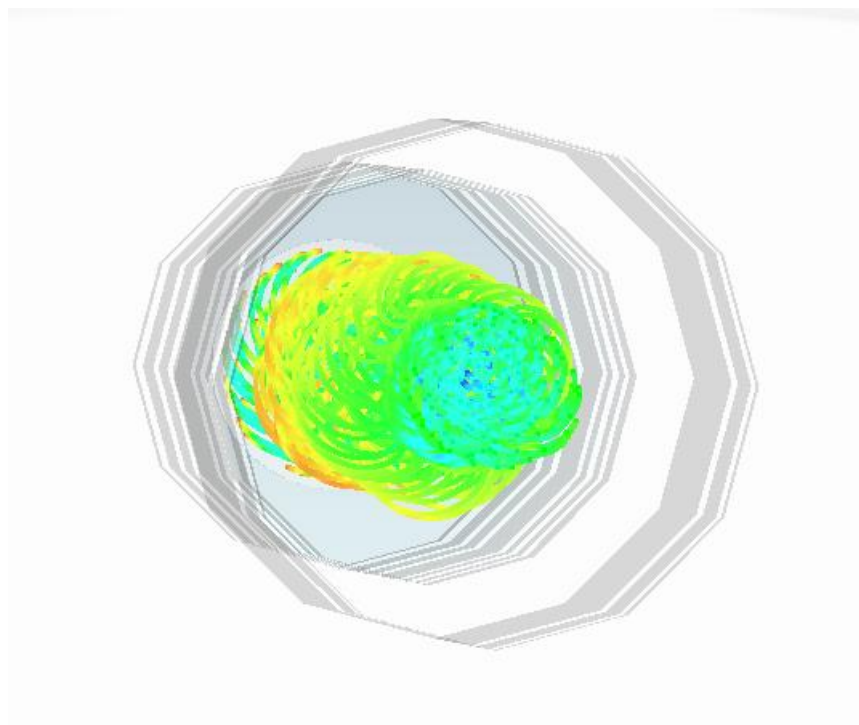


Рис. 4.10. Токопрохождение вдоль трубы дрейфа в реверсивном магнитном поле в случае отсутствия входного сигнала.

Следует отметить, что электронный поток должен быть сходящимся при прохождении реверсов магнитного поля. Это способствует сохранению максимального диаметра луча в пределах половины диаметра канала.

Значения магнитных полей достигают величины 1400 Гс в третьем рабочем промежутке. Расчёт магнитного поля по известной конфигурации полюсных наконечников проводился в одномерном программном комплексе FEMM (рис. 4.11).

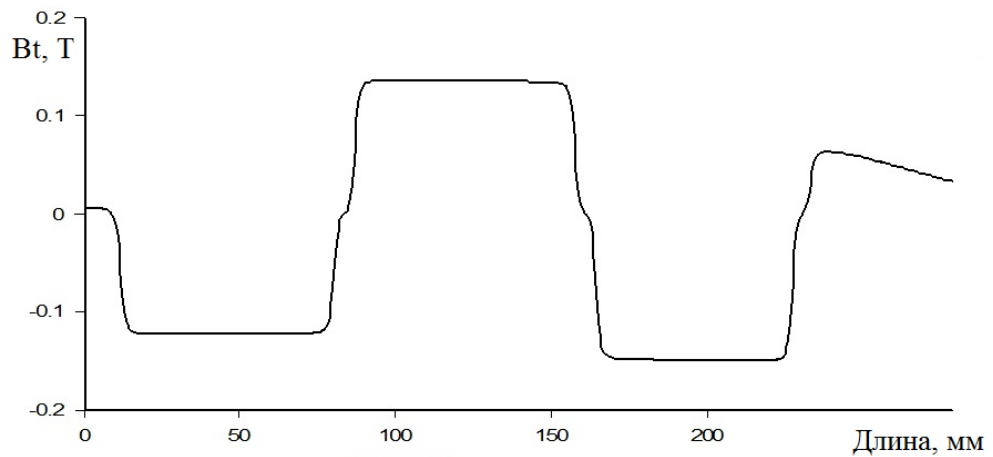


Рис. 4.11. Расчётные значения магнитного поля в рабочих промежутках.

Увеличение магнитного поля во втором и последнем рабочих промежутках необходимо для компенсации повышения плотности пространственного заряда в сгустке при группировке. На рисунке 4.12 показано экспериментальное распределение магнитного поля (чёрными линиями – B_r , красными линиями – B_z).

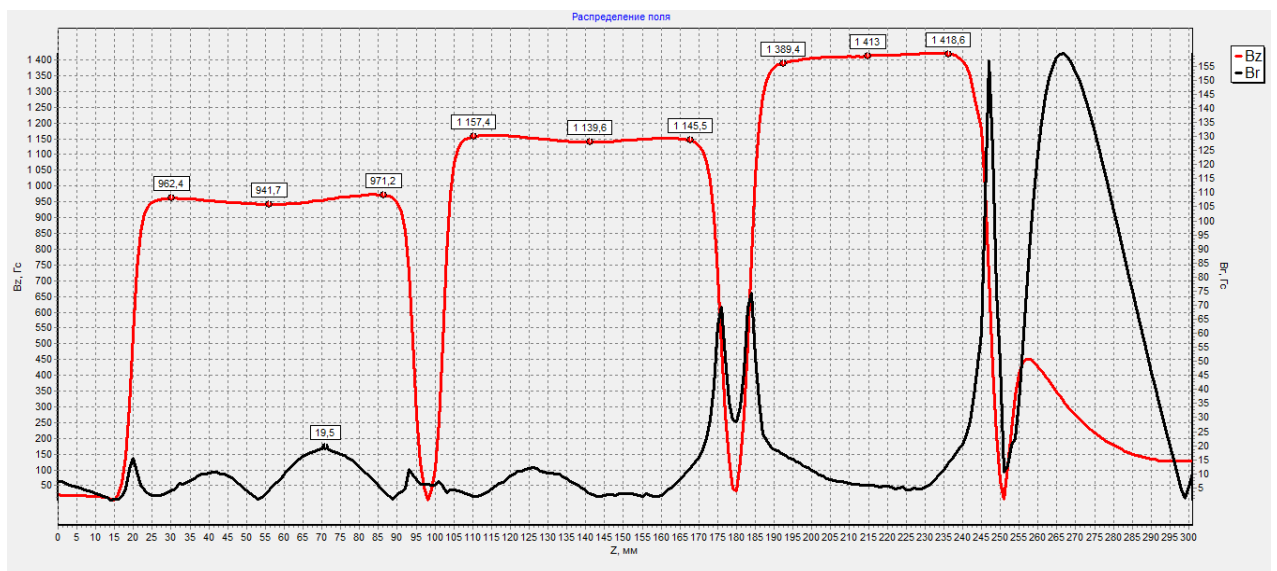


Рис. 4.12. Экспериментальное распределение модуля фокусирующего магнитного поля вдоль оси резонаторного блока.

§ 4.4. Исследование выходного резонатора с волноводным трактом

Отдельного внимания заслуживает исследование выходного резонатора (рис. 4.13), поскольку необходимо было корректно решать задачу вывода энергии, проводить анализ напряженности электромагнитного поля в зазорах резонатора и в щели связи, изучить влияние «паразитных» видов колебаний. Данная работа проводилась в трёхмерных программах.

Использование метода конечных элементов в трёхмерном электродинамическом моделировании обеспечивает высокую степень универсальности численных алгоритмов. Пакет включает в себя программу расчета собственных колебаний СВЧ резонаторов и собственных волн волноведущих структур. Эта программа вычисляет резонансные частоты собственных колебаний, постоянные распространения собственных волн структуры в частотной области, а также электрические и магнитные поля на этих резонансных частотах на основании конструкции электродинамической системы, свойств материалов и граничных условий. В этом режиме можно вывести реальные и мнимые (наличие мнимой части связано с потерями) частоты и соответствующие им добротности. Данные решения могут также просматриваться во время выполнения задачи.

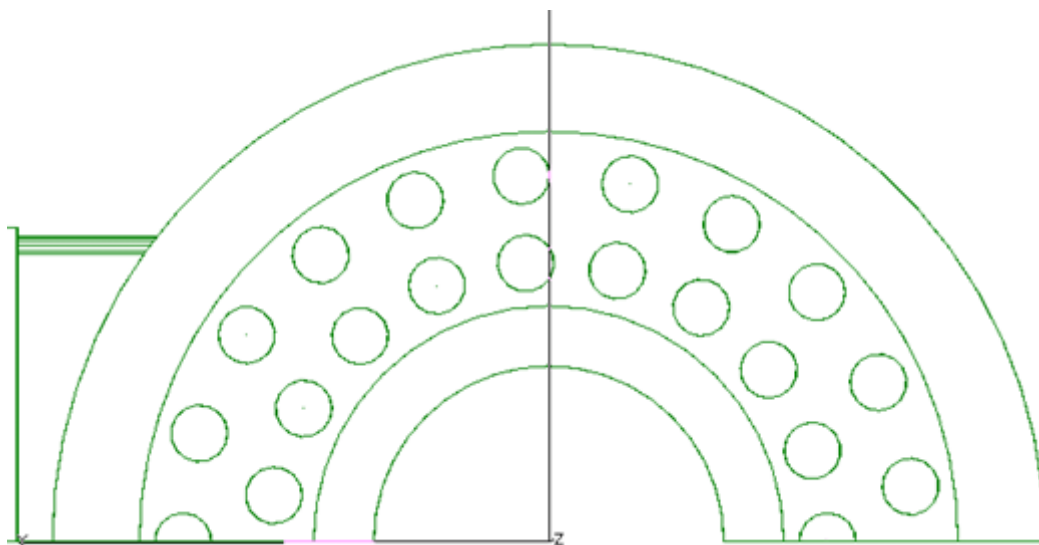


Рис. 4.13. Конфигурация выходного резонатора и расположение каналов.

Моделирование показало, что из-за примыкания волноводного тракта в выходном резонаторе частота второй моды (высший «паразитный» вид колебаний) находится ближе к рабочей моде колебаний по сравнению с резонаторами без каких-либо связей с внешними устройствами (рис. 4.14). Распределение векторов электрического поля «паразитной» моды представлено на рисунке 4.15.

Eigenmodes for Eigenmode Adaptive Pass 12		
	Frequency (GHz)	Q
Mode 1	(2.98694e+000, 1.18594e-002)	1.25932e+002
Mode 2	(3.13136e+000, 7.83185e-003)	1.99913e+002
Mode 3	(3.24039e+000, 8.11789e-009)	1.99584e+008

Рис. 4.14. Высшие моды и их нагруженные добротности в выходном резонаторе.

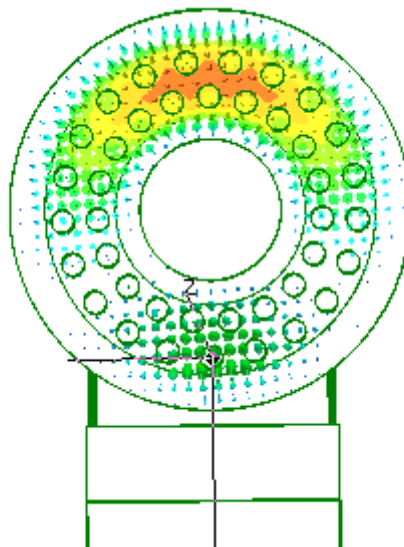


Рис. 4.15. Распределение вектора напряженности электрического поля второй моды.

Для уменьшения влияния высшего типа колебаний на рабочий вид в случае какой-либо связи этих мод пучками частиц в динамическом режиме было предложено подрезать резонатор с той стороны (рис. 4.16), с которой наблюдается максимум электрического поля этого вида колебаний. Проведено моделирование, в котором выяснилось, что при новой конструкции разница частот между «паразитным» видом и основным увеличивается по сравнению с исходной конфигурацией, а также уменьшается амплитуда высокочастотного электрического поля этой моды с противоположной волноводному тракту стороны (часть резонатора, в которой наблюдается максимум поля). Необходимость такого рассмотрения возникла из-за того, что рабочая и «паразитная» моды колебаний имеют низкие добротности (достаточно широкие полосы частот) и их частоты расположены в непосредственной близости друг от друга (отличие составляет 4%).

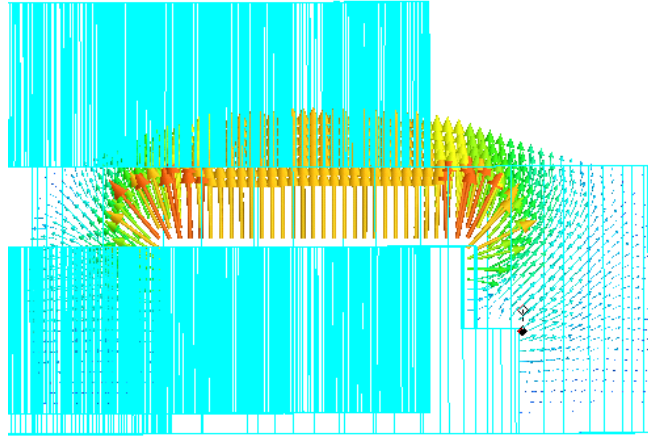


Рис. 4.16. Распределение электрического поля второй моды после подрезания резонатора.

Предложены механизмы перестройки частоты и добротности основного вида выходного резонатора. Перестройка осуществляется четырьмя стержнями, расположенными в волноводном тракте выходного резонатора. Ближайшие стержни по отношению к резонатору изменяют его частоту (рис. 4.17), а дальние – нагруженную добротность (рис 4.18). Связано это с тем, что первые расположены в максимуме напряженности электрического поля, а вторые в минимуме [120].

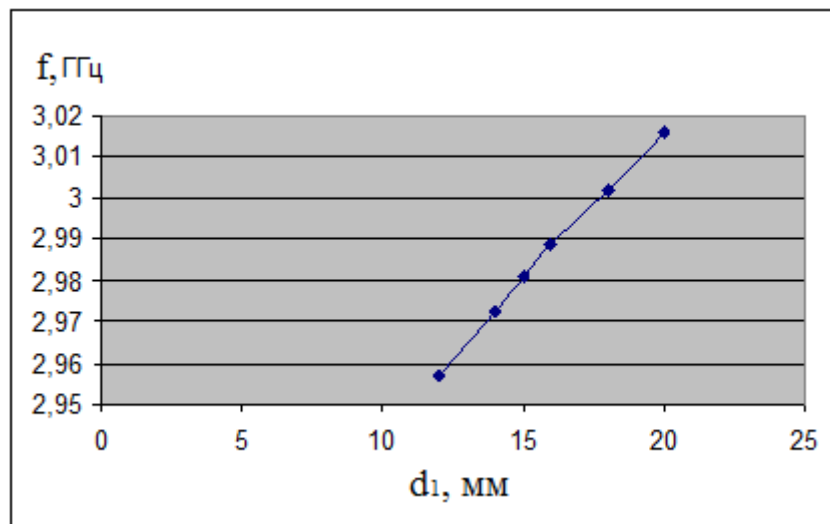


Рис. 4.17. График зависимости частоты резонатора от расстояния между ближайшими к резонатору стержнями в тракте (мм).

Увеличение расстояния между ближайшими к резонатору стержнями приводит к увеличению частоты, нагруженная добротность при этом существенно не изменяется.

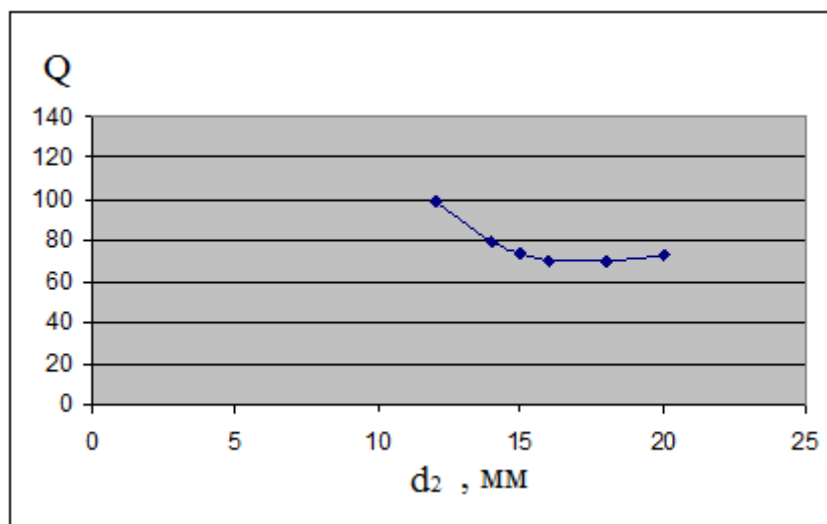


Рис. 4.18. График зависимости нагруженной добротности от расстояния (мм) между дальними по отношению к резонатору стержнями в тракте.

Уменьшение расстояния между дальними по отношению к резонатору стержнями приводит к увеличению нагруженной добротности.

§ 4.5. Моделирование распределения электронов на коллекторе

Коллектор поглощает электронные пучки после прохождения через анодный блок клистрона. Пространственный заряд в пучке увеличивает его радиус, когда он пролетел область магнитного поля. Это помогает распределить мощность в коллекторе. Коллектор должен иметь возможность принимать полную мощность пучка в случае отсутствия СВЧ модуляции [124].

Одним из побочных эффектов высокой эффективности является образование медленных электронов, которые могут отражаются от коллектора, что приводит к нежелательным колебаниям в выходной системе и возможным «паразитным» возбуждениям.

Было рассмотрено распределение электронов на коллекторе (рис. 4.19) в СВЧ – режиме. Для этого в трёхмерном программном пакете решились сразу три задачи: магнитостатическая задача (расчёт магнитного поля заданной магнитной системы), электростатическая задача (распределение электрического поля и потенциала элементов конструкции), расчет электронно-оптической задачи (прохождение электронов через анод при фиксированных потенциалах во внешнем фокусирующем магнитном поле, заданном с помощью постоянных магнитов).

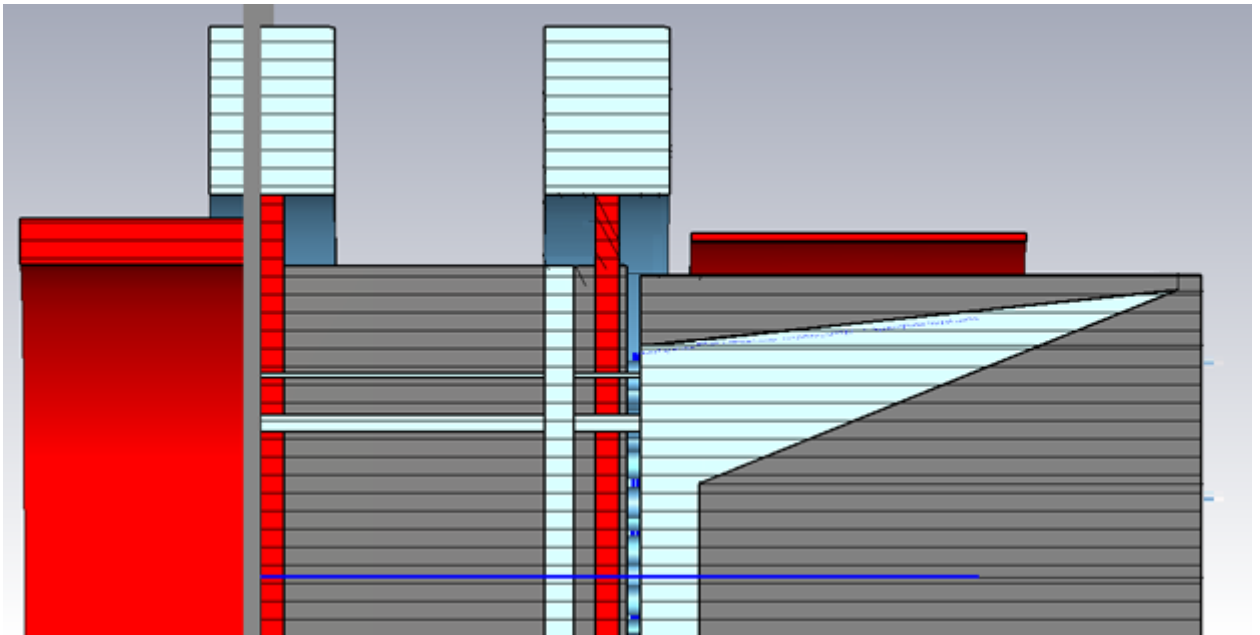


Рис. 4.19. Конфигурация коллектора.

Красным цветом на рисунке 4.19 изображены магнитные полюсные наконечники для обеспечения необходимого магнитного поля. Фокусирующее магнитное поле в каналах анода составляет 1500 Гс. Потенциал анода равен 52 кВ, а потенциалы элементов прибора, расположенных за зазором выходного резонатора – 16 кВ (СВЧ – режим). Общий постоянный ток равен 195 А (фиксированный). Парциальный ток в каждом канале приблизительно равен 5 А. В расчёте было получено 100% токопрохождение. Распределение электронов в коллекторе показано на рисунке 4.20, траектории электронов во внешних и внутренних пролётных трубах дрефа изображены на рисунках 4.21 и 4.22 соответственно.

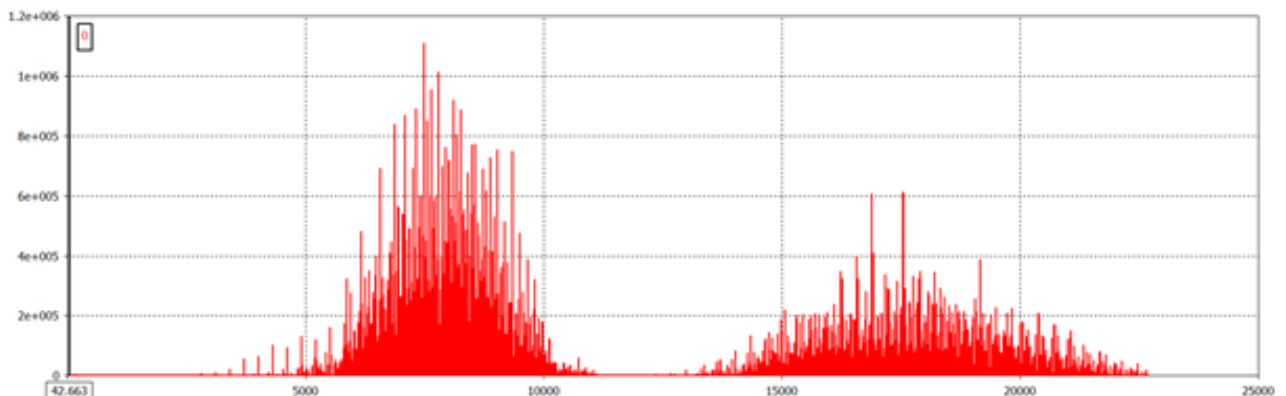


Рис. 4.20. Плотность тока в местах оседания электронов на коллекторе.

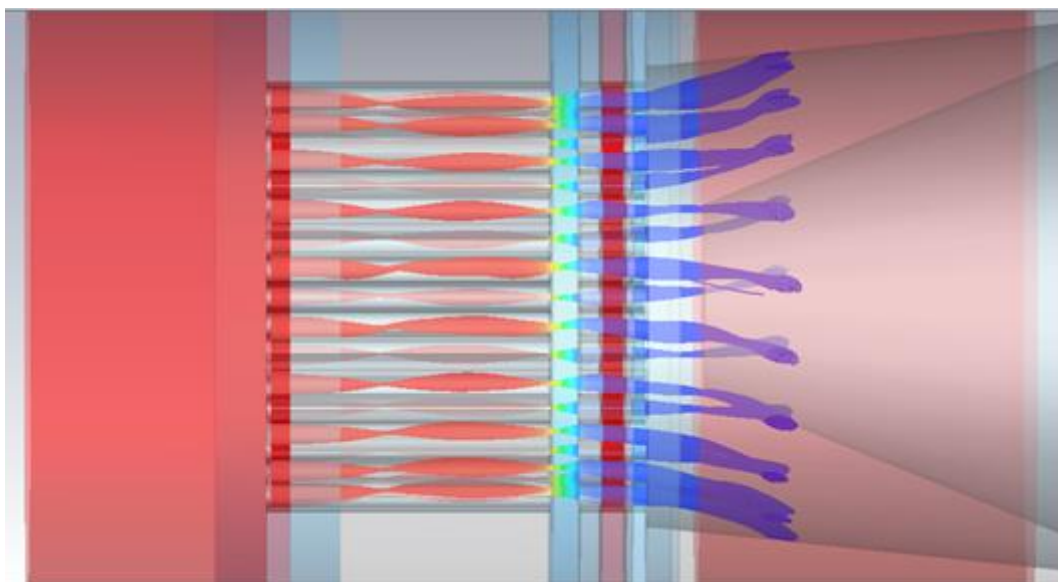


Рис. 4.21. Траектории электронов во внешних пролётных каналах СВЧ-режима.

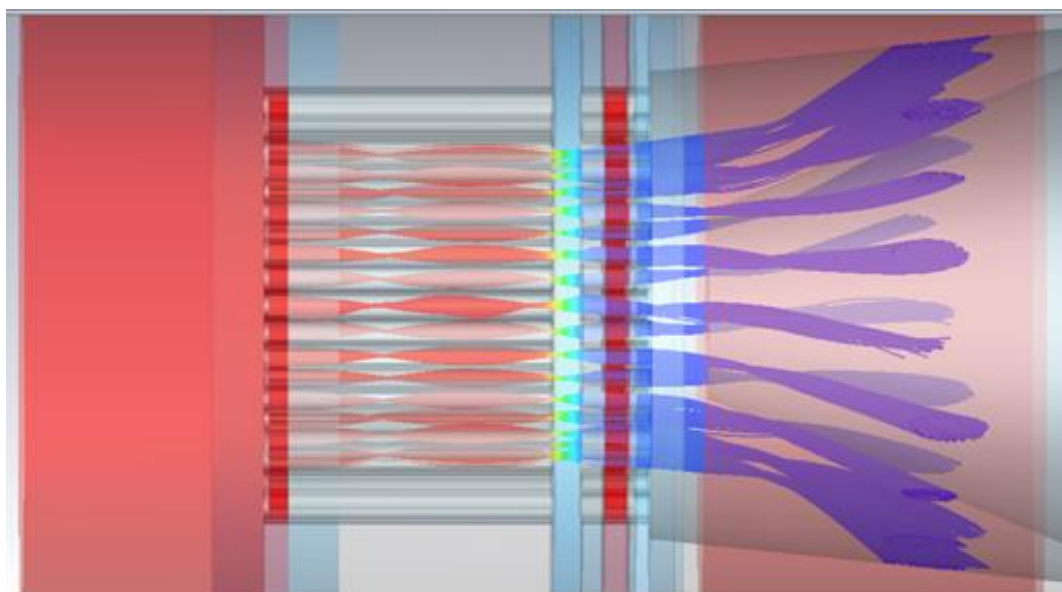


Рис. 4.22. Траектории электронов во внутренних пролётных каналах СВЧ-режима.

Электроны внутренних каналов проходят большее расстояние до оседания и распределены на большей площади коллектора, то есть создают меньшую тепловую нагрузку по сравнению с электронами внешних каналов. Размер электронных пятен внутренних каналов приблизительно в 5 раз больше размера электронных пятен внешних каналов. Средняя тепловая нагрузка составляет $300-400 \text{ Вт/см}^2$. На рисунке 4.23 представлено распределение электрического потенциала коллектора в сечении с координатой $x=0$. Синим цветом представлен минимум потенциала (15,5 кВ), красным цветом – максимум потенциала (17,7 кВ). Полученное место оседания электронов имеет жёлто-зеленые цвета, потенциал имеет значения в диапазоне 16,5-17,3 кВ.

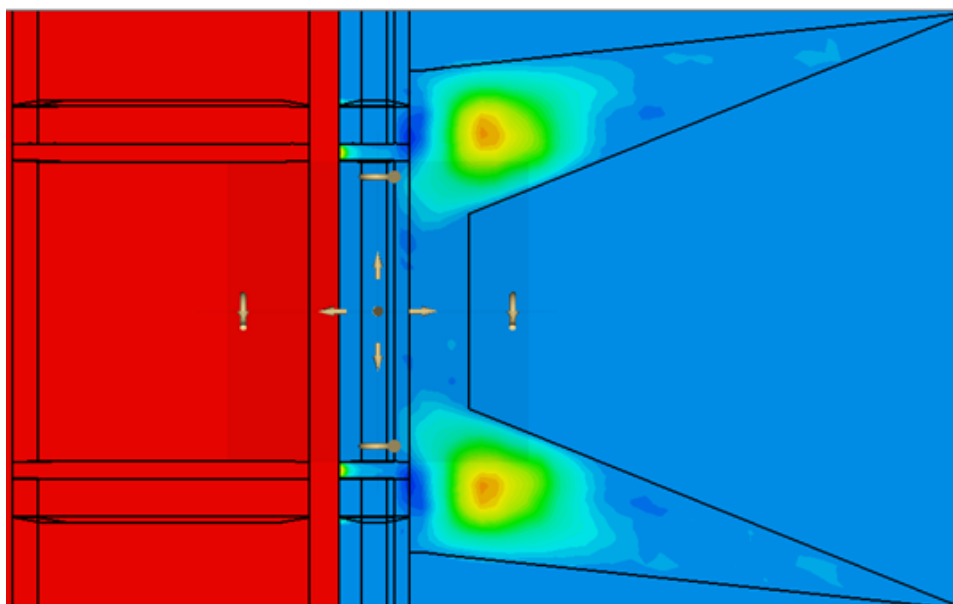


Рис. 4.23. Распределение потенциала в сечении коллектора.

§ 4.6. Выводы

1) По результатам оптимизации электродинамической системы принято решение в первом экспериментальном БАК – клистроне использовать девять кольцевых резонаторов, два из которых настроены на вторую гармонику. Резонаторы обладают осевой симметрией. В полости резонатора имеются ёмкостная часть, содержащая 40 каналов, расположенных в два ряда по азимуту, а также две индуктивные части. Геометрические размеры индуктивной части резонаторов подбираются таким образом, чтобы создать одинаковое характеристическое сопротивление для внутреннего и внешнего рядов каналов (создать одинаковые условия для группировки электронов всех пучков).

2) Важным преимуществом клистрона является применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид. Такой выбор позволяет уменьшить потребление энергии, вес и стоимость клистрона. Проведён выбор оптимальных значений магнитного поля в рабочих промежутках магнитной системы для получения 100% токопрохождения электронов через каналы резонаторного блока до коллектора. Увеличение магнитного поля в каждом последующих рабочих промежутках необходимо для компенсации повышения плотности пространственного заряда в сгустке при группировке.

3) Для уменьшения влияния высшего типа колебаний на рабочий вид колебаний в выходном резонаторе было предложено подрезать резонатор с той стороны, с которой

наблюдается максимум электрического поля этого вида колебаний. Также предложены механизмы перестройки частоты и добротности выходного резонатора.

4) Размер электронных пятен в коллекторе электронов из внутренних каналов приблизительно в 5 раз больше размера электронных пятен электронов внешних каналов, поскольку электроны внутренних каналов проходят большее расстояние до оседания и распределены на большей площади коллектора, то есть создают меньшую тепловую нагрузку по сравнению с электронами внешних каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПЕРВОГО БАК – КЛИСТРОНА

§ 5.1. Введение

Проведенные в процессе выполнения диссертационной работы численные расчеты группирователя БАК – клистрона ВТ258 (Глава 3), высокочастотных полей в резонаторах электродинамической системы, электронной оптики многолучевого потока, профиля магнитного поля в каналах резонаторов, возникающих процессов в выходном резонаторе, токопрохождения до коллектора и распределения тепловой нагрузки в коллекторе (Глава 4) с применением современных пакетов программ позволили определить параметры конструкции первых многолучевых БАК – клистронов S – диапазона длин волн.

Чтобы минимизировать риски разработки и стоимость производства, было решено улучшить технические параметры существующего клистрона КИУ – 147 – повысить его эффективность и снизить энергопотребление заменой резонаторного блока с традиционной группировкой новым БАК – блоком с добавлением трёх резонаторов при сохранении длины клистрона, выходного окна и использовании идентичного катодного узла.

§ 5.2. Механизм вакуумной подстройки резонаторов

Предложены методы динамической перестройки группировки сгустка с помощью вакуумных настроек частот разгруппирующего и выходного резонаторов, а также нагруженной добротности выходного резонатора.

Принцип работы вакуумной настройки следующий: предположим, частота третьего резонатора после пайки или после сборки сместилась на 0,5% вверх, расчётное КПД клистрона при этом падает до 55 % (рис. 5.1).

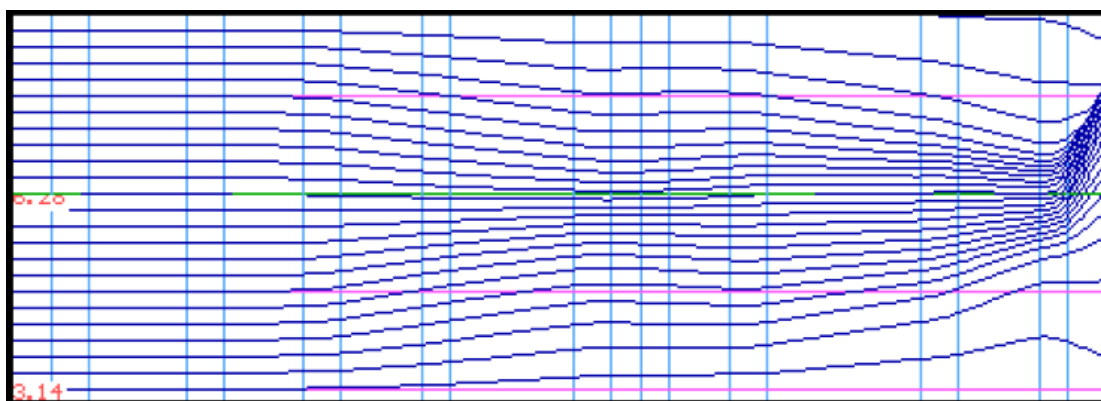


Рис. 5.1. Группировка электронов при отстроенной частоте третьего резонатора.

Перестройка частоты разгруппирующего резонатора вниз на 0,8% вакуумной динамической настройкой позволяет вернуться к исходному КПД (рис. 5.2).

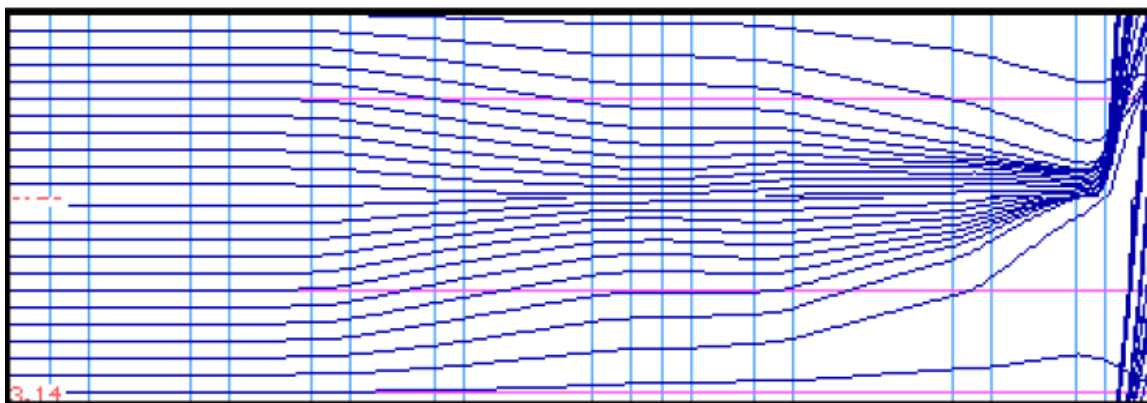


Рис. 5.2. Группировка электронов клистрона после вакуумной перестройки частоты резонатора.

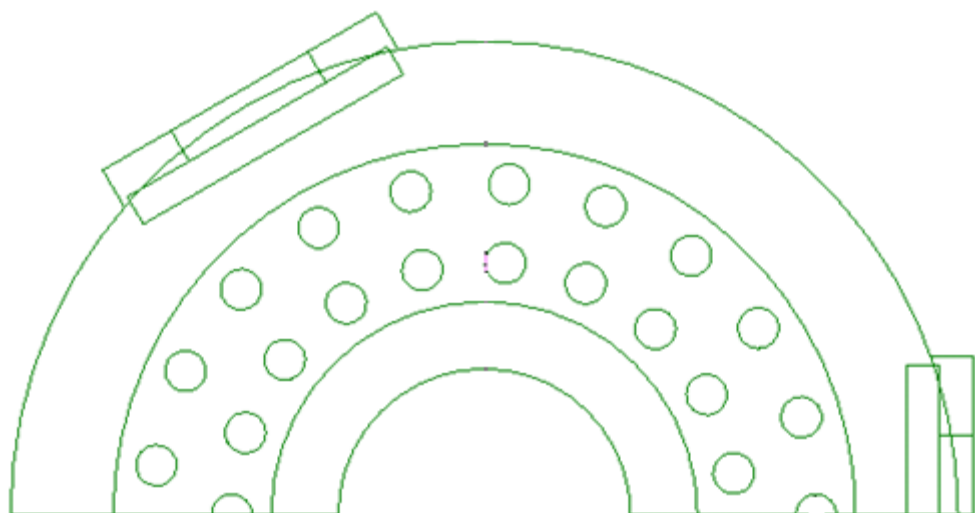


Рис. 5.3. Разрез резонатора клистрона с вакуумной настройкой.

Проводилась настройка частоты резонатора пластинами в количестве трёх штук. Пластины имеют осевую симметрию (120 градусов между соседними пластинами) (рис. 5.3). Изучено влияние перемещения вакуумных настроек на частоту (рис. 5.4) и характеристические сопротивления в пролётных каналах резонатора. При достаточно глубоком перемещении пластин в индуктивную область резонатора на практике наблюдается значительное снижение характеристических сопротивлений в тех каналах, со стороны которых находятся пластины. Объясняется это тем, что характеристическое сопротивление пропорционально квадратному корню из индуктивности резонатора.

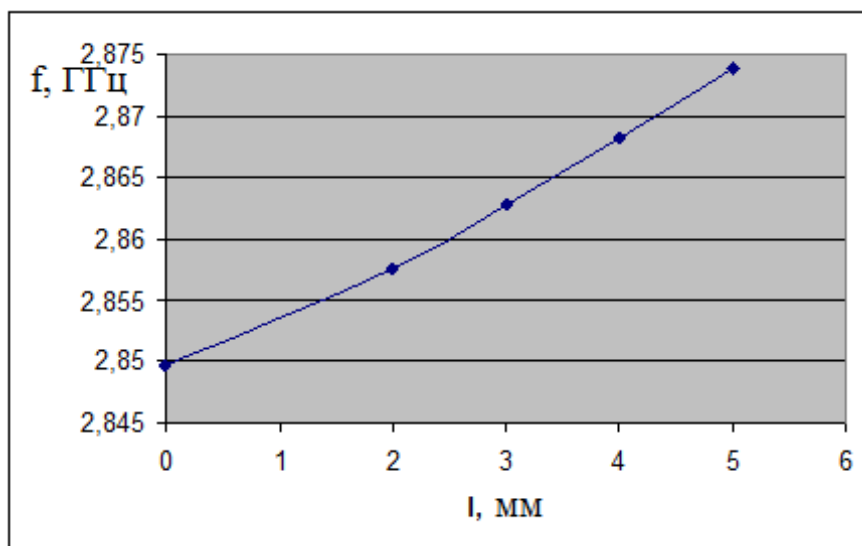


Рис. 5.4. График зависимости частоты разгруппирующего резонатора от глубины вставки пластины.

При увеличении глубины пластин частота резонатора увеличивается (рис. 5.4), поскольку уменьшается индуктивный объём резонатора, а частота резонатора обратно пропорциональна квадратному корню из индуктивности резонатора.

Разработана конструкция и проведены «холодные» эксперименты, подтверждающие эффективность перестройки частот (рис. 5.5).

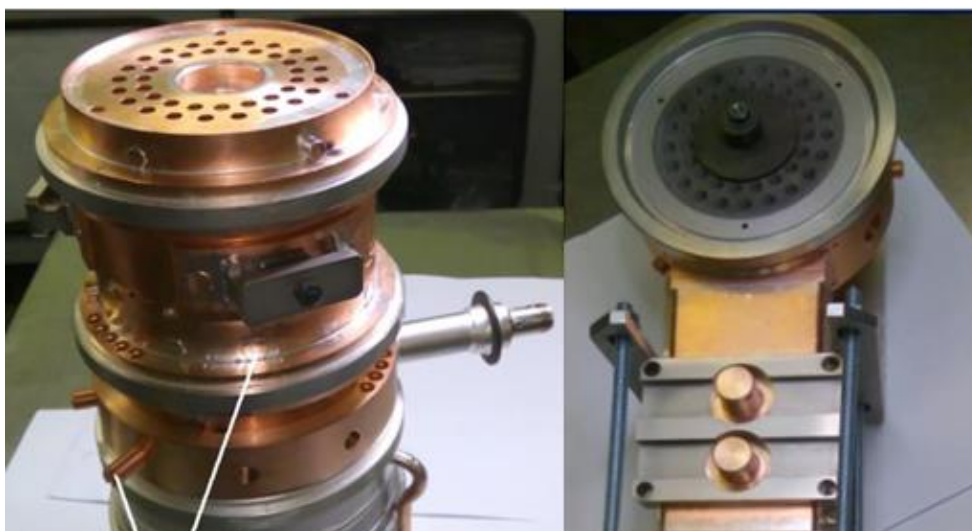


Рис. 5.5. Вакуумная настройка в экспериментальном образце.

Вакуумная настройка позволяет компенсировать возможные сдвиги частот после пайки и сварки, различные двумерные и трехмерные эффекты, уменьшение тока и изменение радиуса пучка вдоль канала [28].

§ 5.3. Экспериментальный БАК – клистрон и «холодные» измерения

Резонаторный блок с выходным волноводным трактом на «холодных» измерениях изображены на рисунке 5.6. На «холодных» измерениях настраивались частоты всех резонаторов в соответствии с расчётом ВТ258, КПД которого в одномерной программе составило 72,9%. Также на «холодных» измерениях проводилось выравнивание характеристического сопротивления в пролётных каналах резонаторов.

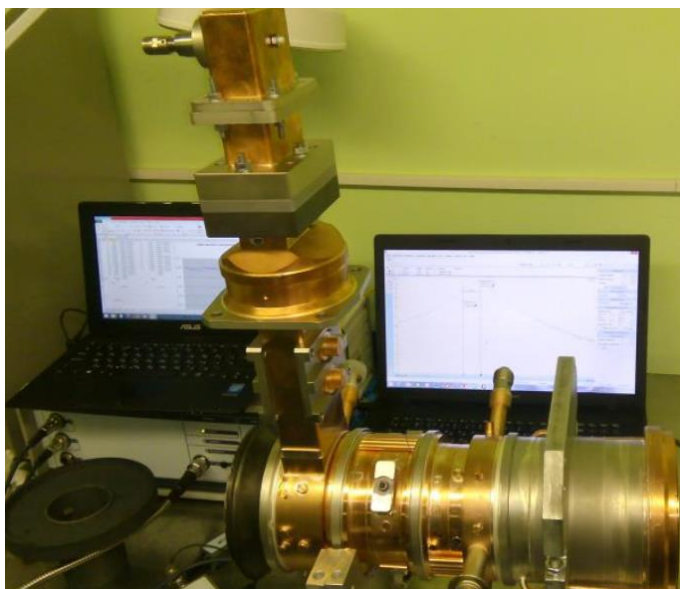


Рис. 5.6. «Холодные» измерения клистрона.

Спектр резонансов одного из резонаторов первой гармоники изображён на рисунке 5.7. Частоты резонаторов определяются двумя зондами методом прохождения. На рисунке 5.7 изображены 5 пиков. Рабочим является первый резонанс, находящийся на частоте около 3 ГГц. «Паразитный» вид ТМ₁₁₀ расположен около частоты 3,200 ГГц.

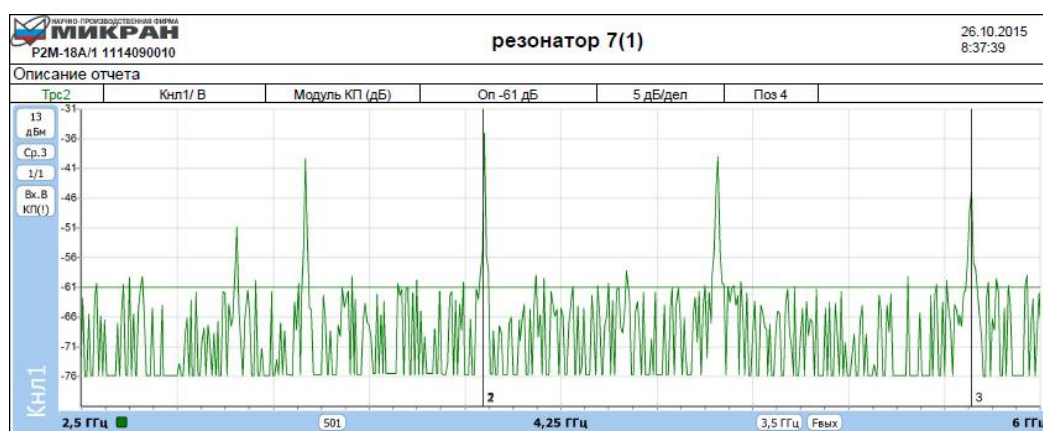


Рис. 5.7. Расположение резонансов одного из резонаторов первой гармоники в эксперименте.

Были настроены все резонаторы клистрона, при этом особое внимание было уделено выравниванию характеристического сопротивления (R/Q – фактор) во всех 40 каналах всех резонаторов, то есть создание однородности электрического поля как по азимуту, так и радиусу кольцевого резонатора (внутренние и внешние каналы), так как для высокого КПД необходимо создать равные условия группировки электронов.

Для измерения характеристического сопротивления используется метод, основанный на помещении диэлектрика в область однородного поля ёмкостного зазора и последующим вычислении величины ρ с помощью формулы (5.1), где d – длина ёмкостного зазора, Δf – малое возмущение, f_0 – резонансная частота, ε – диэлектрическая проницаемость помещаемого материала, S – площадь поперечного сечения диэлектрика [125,126].

$$\rho \cong 36 \frac{\Delta f [\text{МГц}] d [\text{мм}]}{f_0^2 [\text{ГГц}] (\varepsilon - 1) S [\text{мм}^2]} \quad (5.1)$$

Формула (5.1) была выведена в предположении малости возмущения, вносимого в электрическое поле в зазоре. В качестве диэлектрика выступал фторопластовый стержень ($\varepsilon = 2,1$).

На рисунках 5.8 и 5.9 представлены графики зависимости распределения характеристического сопротивления ρ относительно максимального значения в зависимости от номера канала резонатора. Синим цветом показано распределение для внешнего ряда каналов, а розовым для внутреннего.

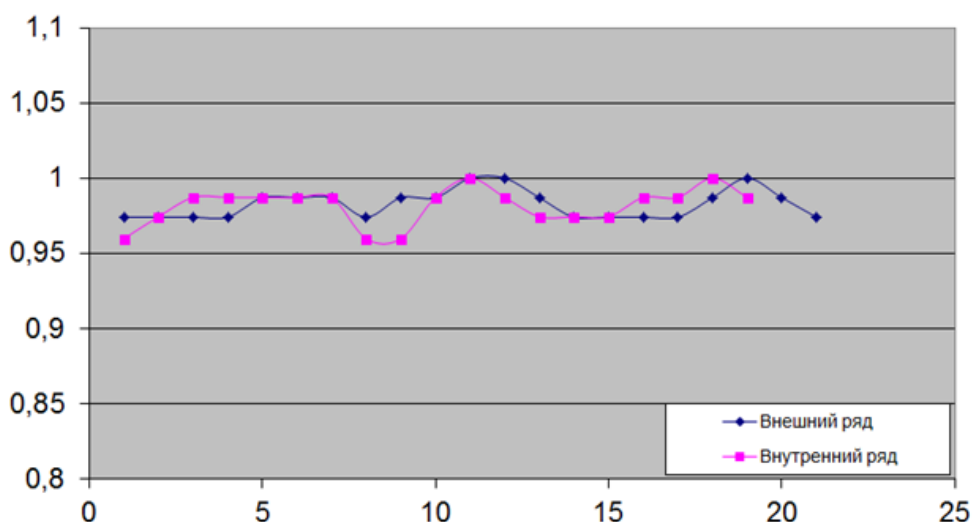


Рис. 5.8. График зависимости распределения относительного характеристического сопротивления от номера канала одного из резонаторов первой гармоники.

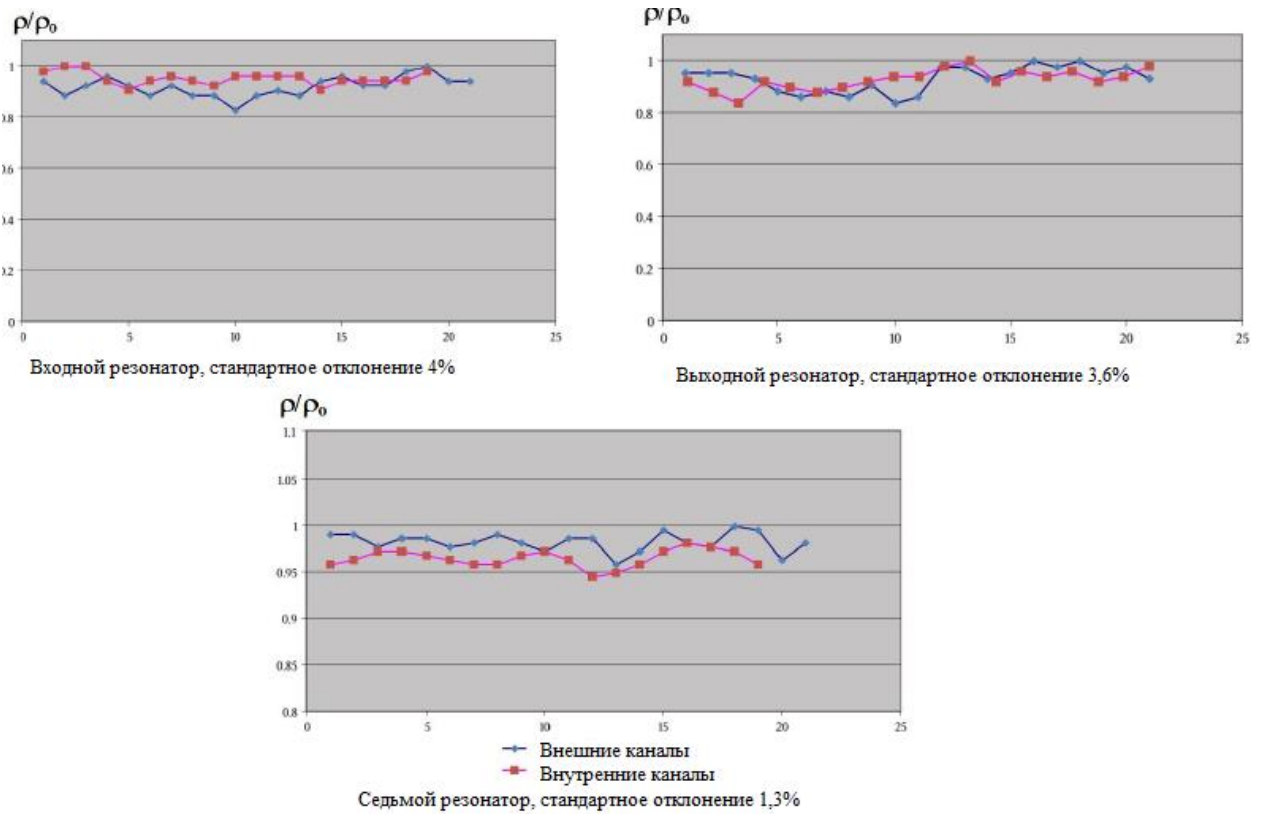


Рис. 5.9. График зависимости распределения относительного характеристического сопротивления от номера канала входного, выходного и седьмого резонаторов.

Частоты некоторых резонаторов после пайки отличались от частот до пайки. Электродинамика клистрона была пересчитана в программном комплексе KLYS 4.5 с учётом изменения частот. Расчеты показали, что частота, на которой наблюдается максимум КПД, сдвинулась на 5 МГц вверх с падением в эффективности на несколько процентов.

§ 5.4. Динамические испытания

Конечная длина первого экспериментального БАК многолучевого клистрона составляет 90 см, включая коллектор и катодный узел. Общая масса клистрона 90 кг, включая массу фокусирующей магнитной системы. Фокусирующая магнитная система состоит из 4 постоянных магнитов. Входной сигнал вводится в первый резонатор с помощью петли связи. СВЧ мощность выводится из выходного резонатора с помощью волновода. Отработанный пучок оседает в коллекторе с водяным охлаждением, также возможно использование воздушного охлаждения.

§ 5.4.1. Испытания в ОИЯИ г. Дубна

Первоначально испытания были проведены в ОИЯИ г. Дубна [127-129]. Испытательный стенд и клистрон, установленный на стенде, изображены на рисунках 5.10 и 5.11 соответственно. Напряжение на клистрон подавалось с модулятора, произведенного в ОИЯИ г. Дубна. СВЧ – мощность поступала с СВЧ – генератора первоначально на предусилитель РТ6801 (Великобритания). Затем с выхода предусилителя сигнал поступал на вход клистрона. Предусилитель работает на частоте 2,9985 ГГц с максимальной выходной мощностью 300 Вт. Выходная мощность клистрона измерялась, используя калиброванный детектор в цепи направленного ответвителя с ослаблением 60 дБ прямой волны и 54 дБ отраженной волны. Водяная нагрузка рассчитана на сигнал с частотой 3 ГГц и мощностью до 50 МВт, при этом длительность импульса может составлять 4,5 мкс, а частота повторения – 50 Гц.

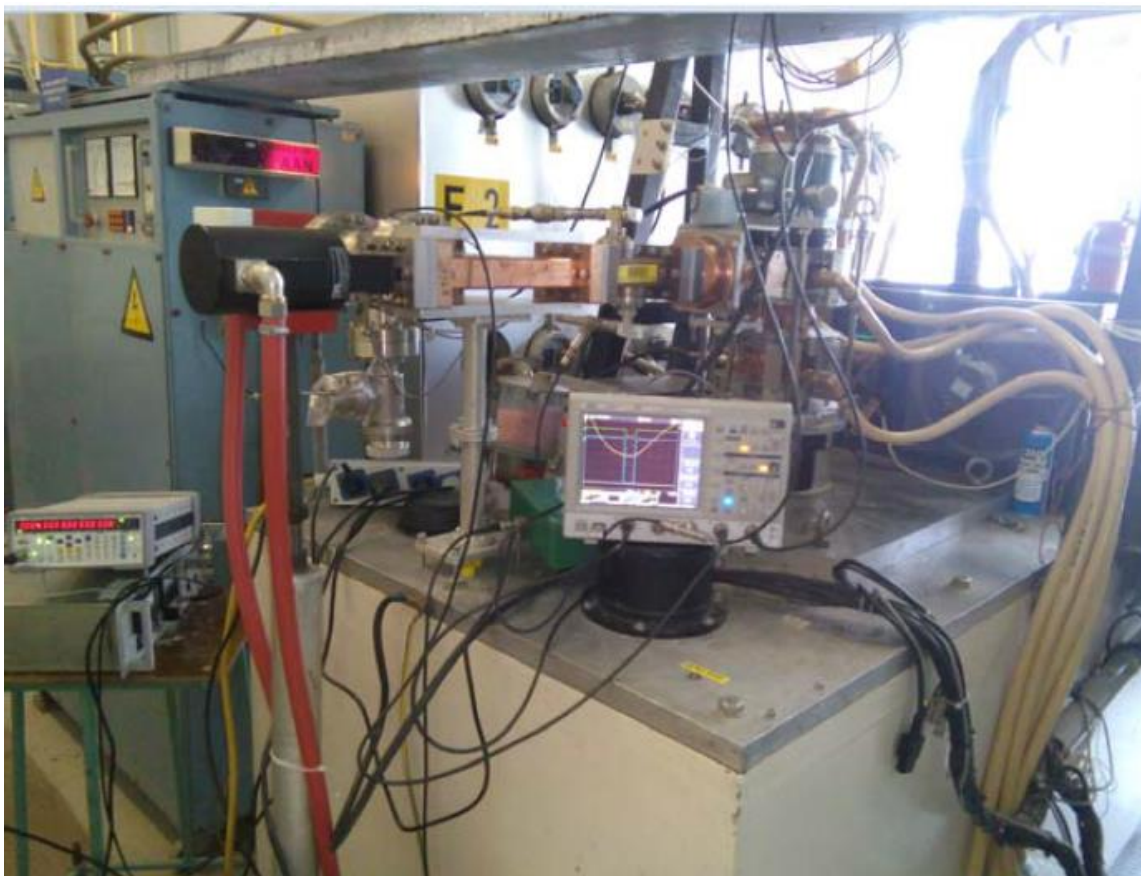


Рис. 5.10. Испытательный стенд.

Первоначально были проведены испытания в статическом режиме (диодный режим). При перестройке катодного напряжения от 48 до 55 кВ токопрохождение электронов от катода до коллектора изменялось в пределах от 94 до 96 %.



Рис. 5.11. БАК многолучевой клистрон на испытательном стенде.

Во время динамических испытаний с входным сигналом была получена зависимость выходной мощности клистрона от мощности, поступающей с предусилителя. Максимум выходной мощности наблюдался при мощности входного сигнала 105 Вт. Входная мощность была выше расчетной в связи с тем, что КСВ входного тракта отличался от 1,0, что привело к отражениям входного сигнала и необходимости увеличения мощности входного сигнала.

График зависимости выходной мощности при частоте 3,004 ГГц как функция входной мощности показан на рисунке 5.12.

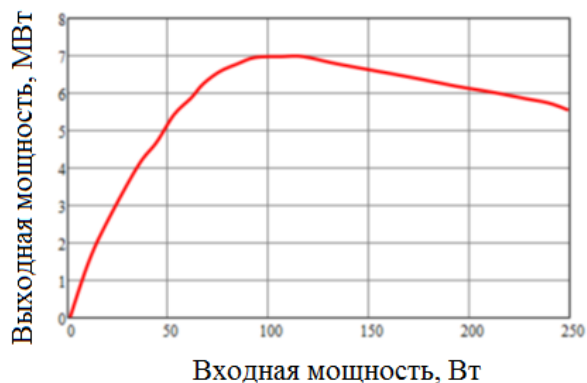


Рис. 5.12. График зависимости выходной мощности от входной мощности.

На клистрон подавались высоковольтные импульсы длительностью 5 мкс и частотой повторения 10 Гц, что является максимальным значением для используемого модулятора. График зависимости выходной мощности от частоты входного сигнала представлен на рисунке 5.13.

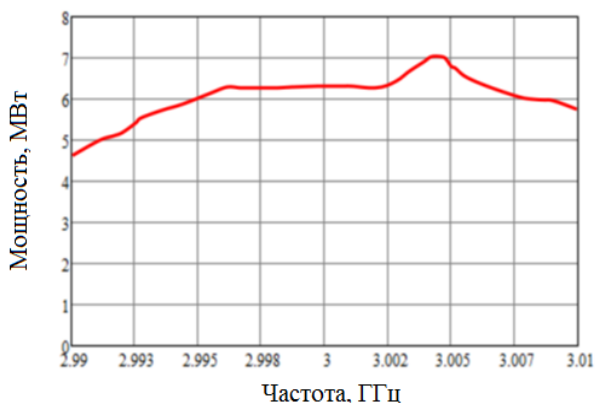


Рис. 5.13. График зависимости выходной мощности от частоты входного сигнала при напряжении 51,7 кВ, силе тока 205 А и входной мощности 105 Вт (в насыщении).

Самая большая выходная мощность 7 МВт была измерена на частоте 3,004 ГГц при напряжении пучка 51,7 кВ и силе тока 205 А (микропервеанс на луч составляет 0,42) (рис. 5.13). КПД на этой частоте составляет 66%.

Результаты испытаний представлены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1. Ток, напряжение и параметры импульса модулятора, уровень входного сигнала с предусилителя в рабочей точке.

Входная мощность, Вт	105
Катодное напряжение, кВ	51,7
Сила тока, А	205
Длина импульса, мкс	5
Частота повторения, Гц	10

Максимальная выходная мощность в динамических испытаниях, проведенных в ОИЯИ г. Дубна, первого многолучевого БАК – клистрона составила 7 МВт, максимальная эффективность была на уровне 66%, коэффициент усиления мощности при этом составил 48 дБ. Результаты испытаний доказывают, что новая БАК-технология группировки электронного потока может значительно повысить КПД клистронных усилителей.

Таблица 5.2. Результаты испытаний на частоте с максимальной эффективностью и на номинальной частоте.

Частота, ГГц	3,004	2,9985
Эффективность токопрохождения, %	96	96
Пиковая мощность, МВт	7,0	6,4
КПД (катодный ток), %	66,0	60,4
КПД (коллекторный ток), %	68,8	62,9
Усиление, дБ	48	48

§ 5.4.2. Испытания в ЦЕРН г. Женева

БАК – клистрон был испытан на установке, схема которой приведена на рисунке 5.14. Импульсы высокого напряжения поступали на клистрон от модулятора ScandiNova K2, SE-75651 Uppsala, Швеция. Модулятор был разработан для питания однолучевых клистронов и магнетронов с сопротивлением луча около 1 кОм. Он был модернизирован специалистами фирмы, чтобы соответствовать сопротивлению многолучевого клистрона (около 300 Ом).

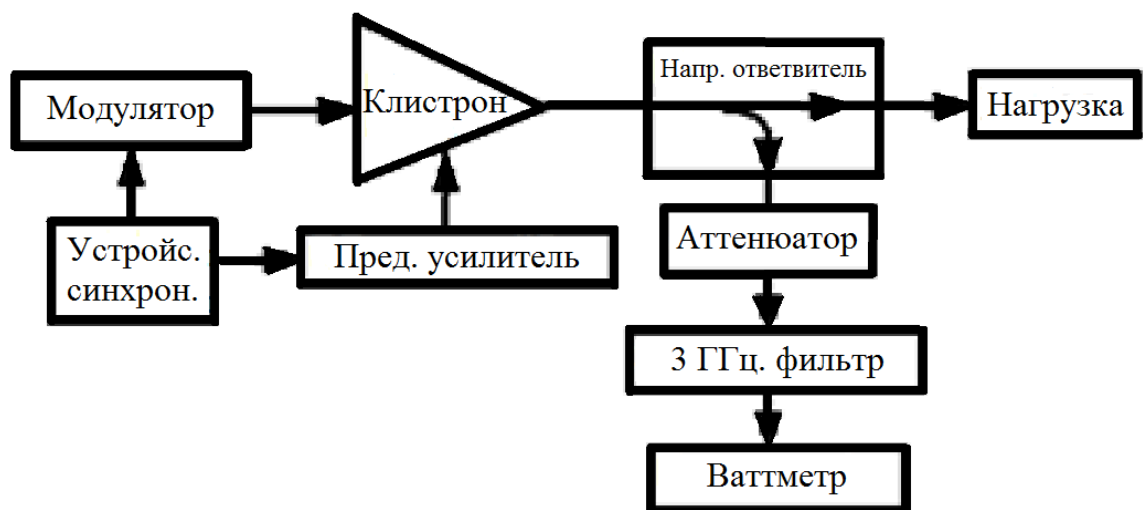


Рис. 5.14. Схематическая установка испытаний.

Источник входного сигнала РТ6801 был произведён в Великобритании и рассчитан на мощность до 300 Вт. Радиочастотная цепь была калибрована на месте, используя

векторный анализатор цепей. Общее измеренное ослабление мощности было 80,31 дБ для волны бегущей в прямом направлении. После аттенюатора СВЧ энергия поступала в измеритель мощности. Нагрузка была изготовлена в ЦЕРН'е, рассчитана на мощность 50 МВт при длительности импульсов 4,5 мкс с максимальной частотой повторения 50 Гц. На рисунках 5.15. – 5.17. показан клистрон, установленный на испытательном стенде [130-132].

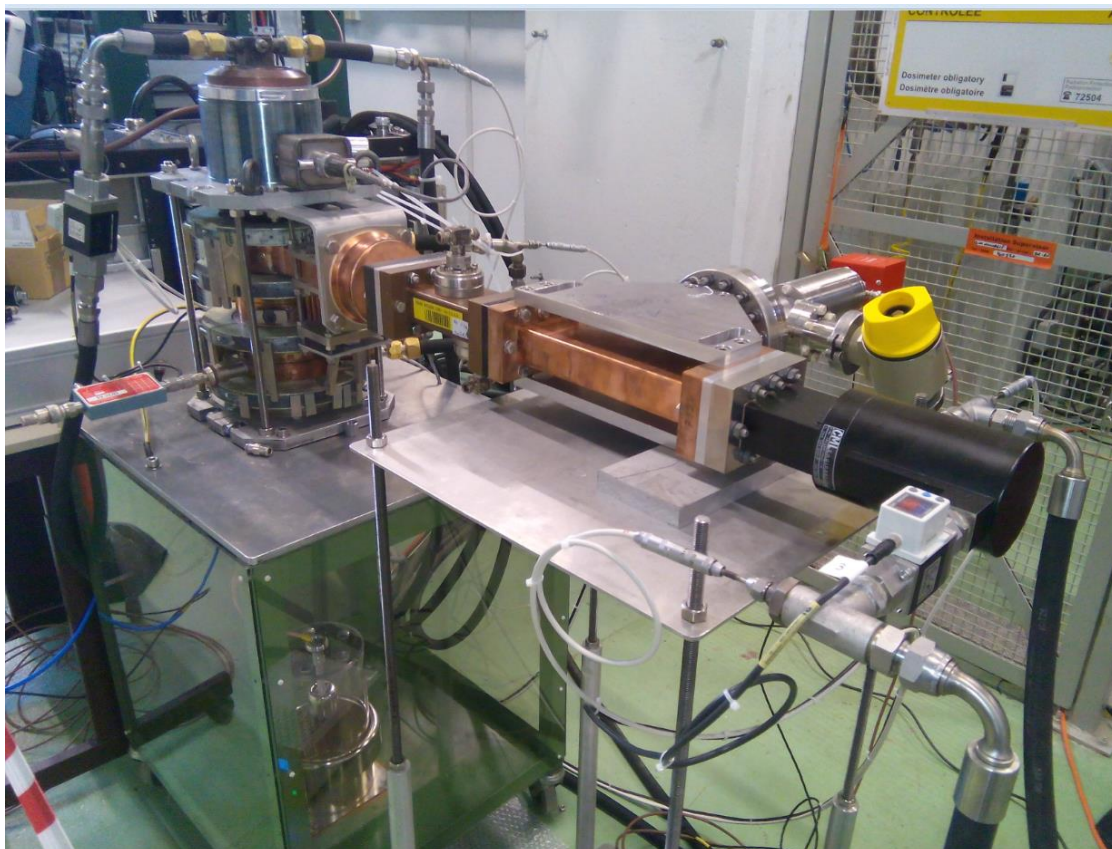


Рис. 5.15. Установка клистрона для испытаний.

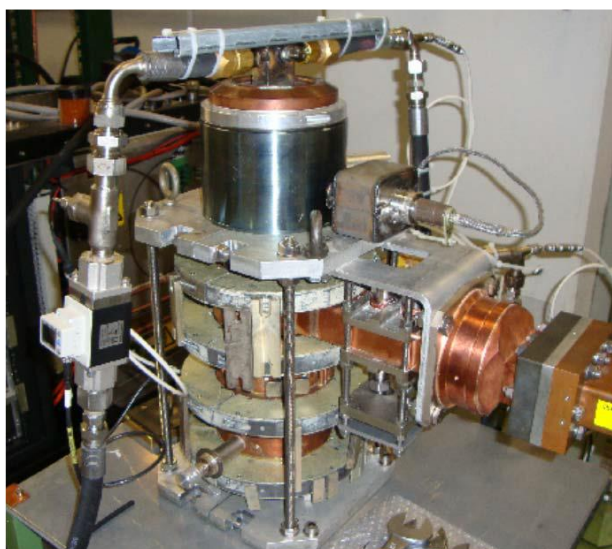


Рис. 5.16. Установка БАК многолучевого клистрона на испытательном стенде.

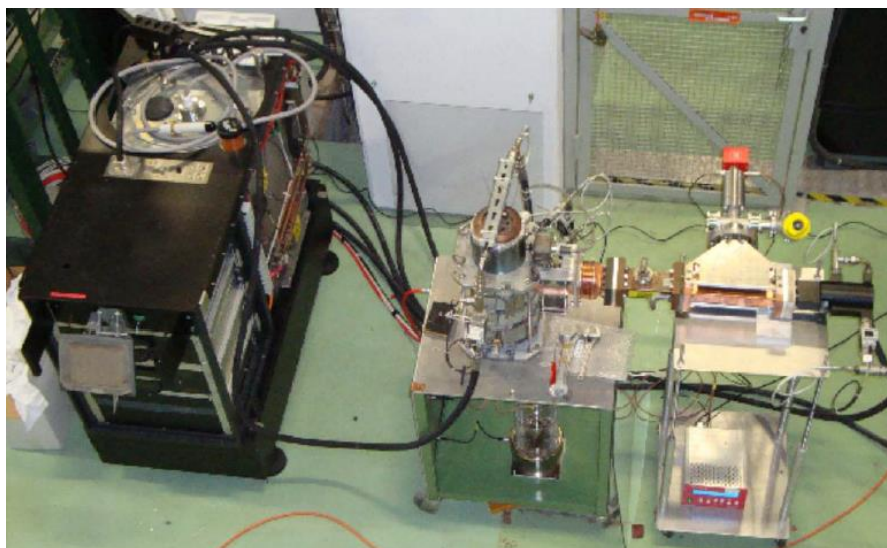


Рис. 5.17. Испытательный стенд в ЦЕРН'е.

Сначала было измерено токопрохождение. Во всём диапазоне действующего напряжения (48-55 кВ) токопрохождение составляло 94-96%. В ЦЕРН'е клистрон был испытан с частотой повторения импульсов 110 Гц и длительностью импульса, доходящей до 7,5 мкс, что является ограничением доступного источника. На рисунках 5.18 и 5.20 показаны график зависимости эффективности клистрона и усиления клистрона от частоты подаваемого сигнала. Измерения проводились при фиксированной мощности пучка электронов 10,8 МВт.

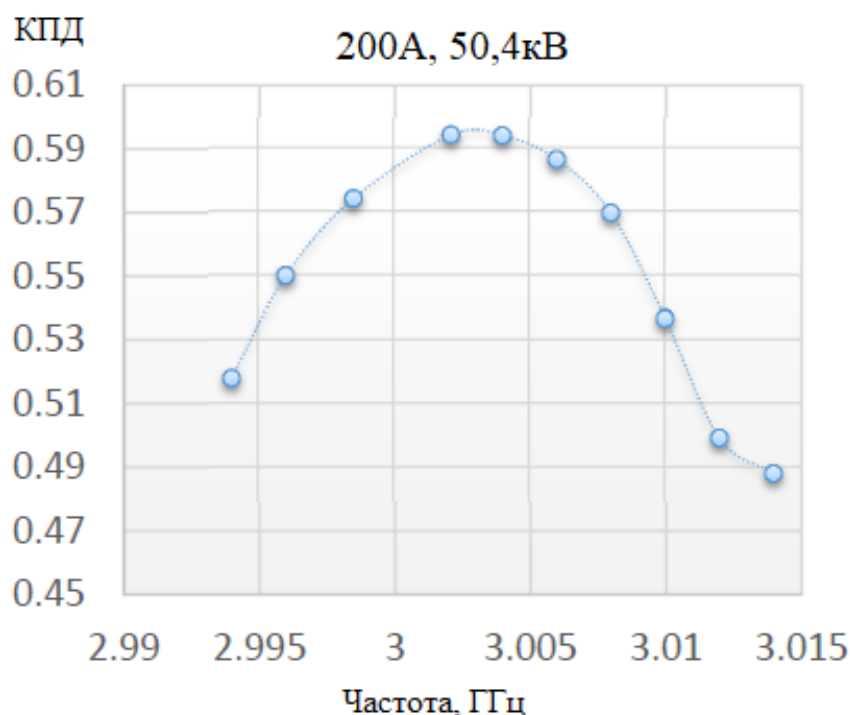


Рис. 5.18. График зависимости эффективности клистрона от частоты сигнала (ГГц).



Рис. 5.19. Рабочая точка для максимальной эффективности.

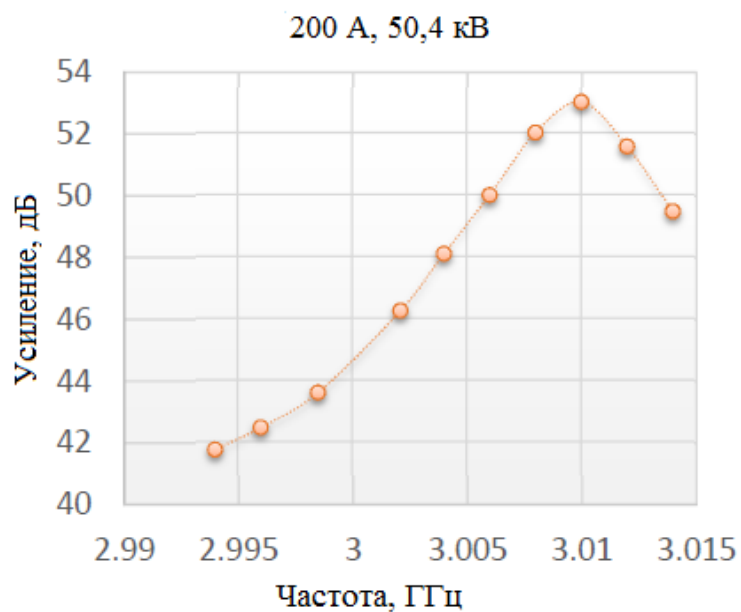


Рис. 5.20. График зависимости усиления клистрона от частоты сигнала (ГГц).

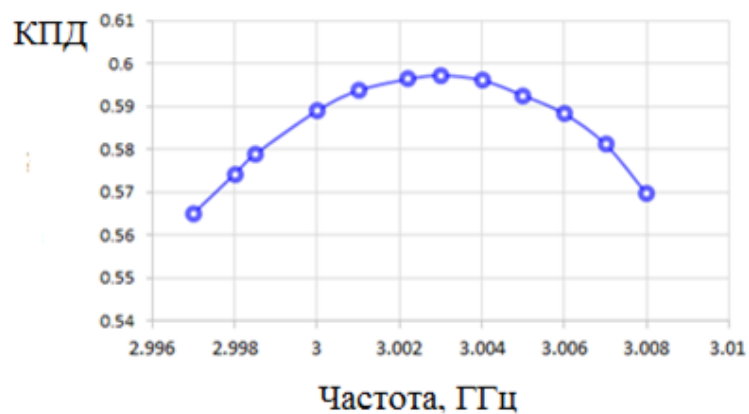


Рис. 5.21. График зависимости КПД от частоты входного сигнала при напряжении 50,25 кВ и токе 195 А (в насыщении).

Как показано на рисунке 5.21, самая большая эффективность в насыщении 59,7% была измерена на частоте 3,003 ГГц при напряжении пучка 50,25 кВ и силе тока 195 А (микропервеанс на луч составляет 0,42). Рабочая точка для максимальной эффективности показана на рисунке 5.19. КПД и выходная мощность при этой частоте как функция напряжения пучка показаны на рисунке 5.22.

Отсутствие пика на частоте 3,003 ГГц, полученного на испытаниях в Дубне, объясняется наличием в измерительной цепи фильтра второй гармоники. Пик возникал при прохождении волны второй гармоники в измерительную цепь без ослабления. Отсутствием фильтра второй гармоники при испытаниях в Дубне объясняется и более высокие показатели КПД (66% вместо 59,7% на испытаниях в Церне). Рабочая точка для максимальной выходной мощности показана на рисунке 5.23.

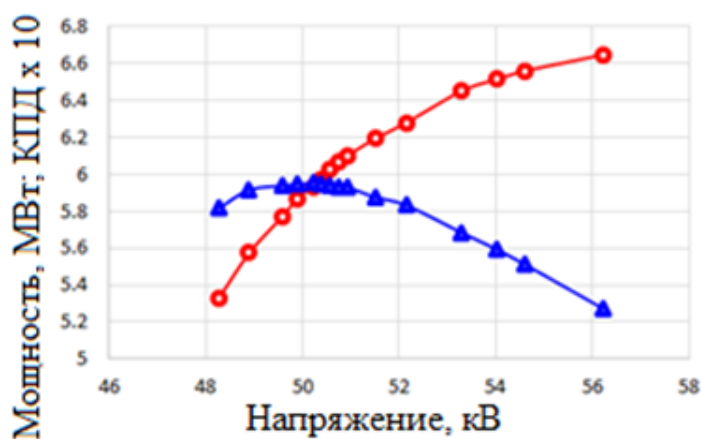


Рис. 5.22. График зависимости эффективности (треугольники) и выходной СВЧ – мощности (кружки) в насыщении при 3,003 ГГц от напряжения.

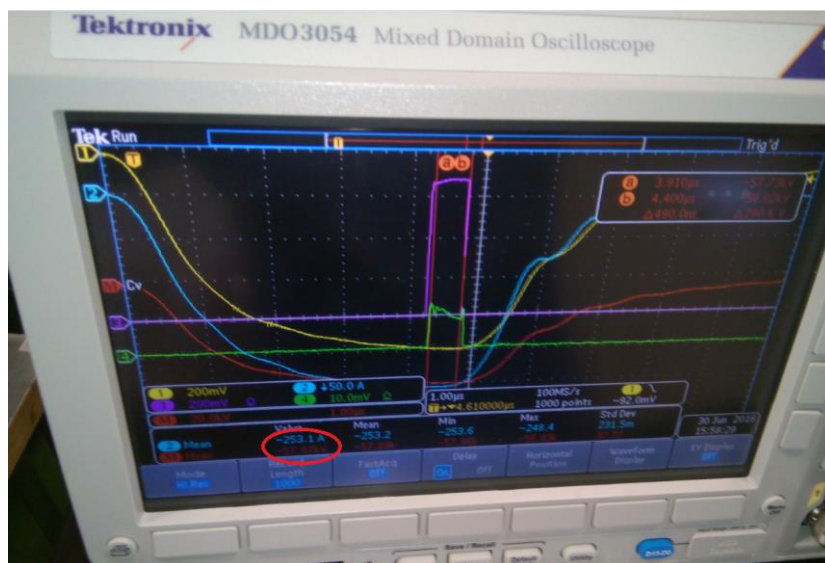


Рис. 5.23. Рабочая точка для максимальной выходной мощности.

При изменении тока накала первеанс клистрона может меняться в пределах 10%. На рисунке 5.24 показано, что оптимальный микропервеанс на луч составляет 0,42-0,44% (ток накала примерно 25А).

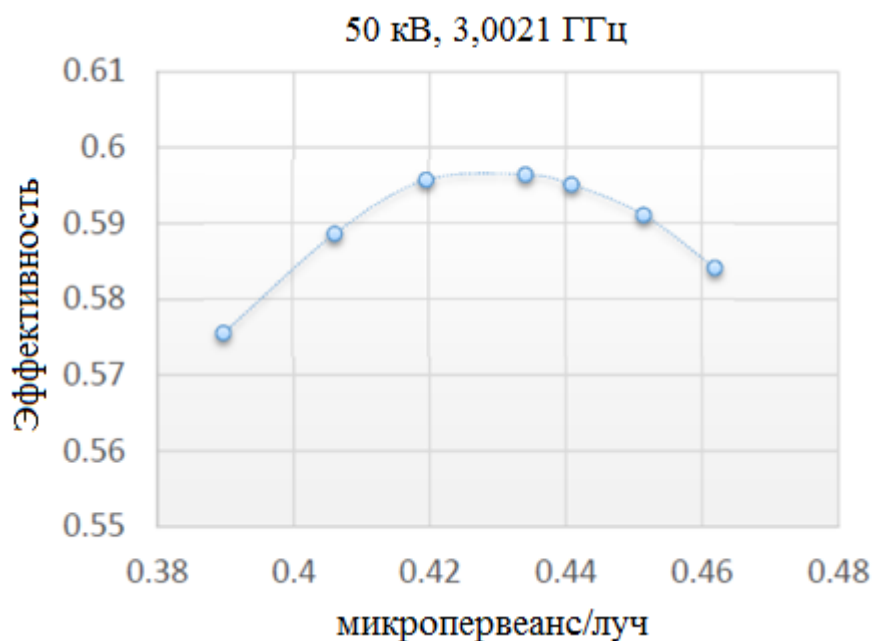


Рис. 5.24. График зависимости КПД клистрона от микропервеанса на луч.

В конечном итоге, модулятор был доведён до насыщения в 14 МВт (56,8 кВ и 247 А, 0,454 микропервеанс на луч) с 500 нс импульсом. В таком режиме КПД клистрона упало до 50%, а выходная мощность составила 7 МВт (рис. 5.25).

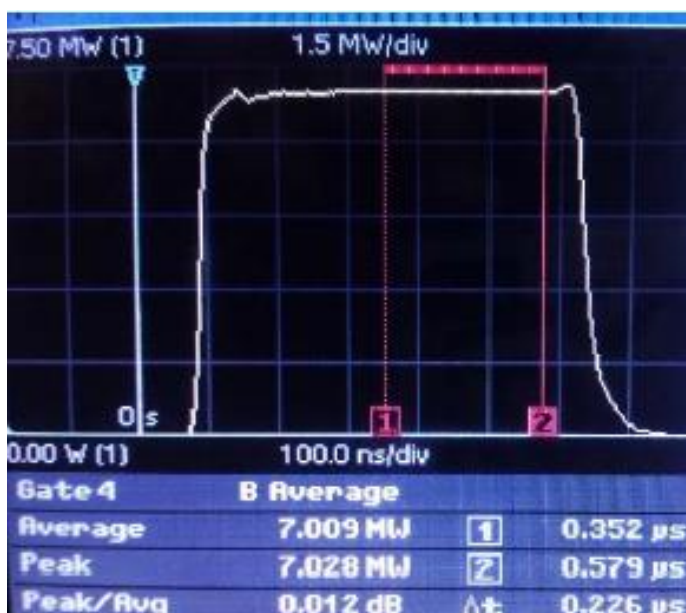


Рис. 5.25. Форма импульса мощностью 7 МВт.

§ 5.4.3. Калориметрические измерения

В ЦЕРН'е также были проведены калориметрические измерения средней мощности и эффективности клистрона. На рисунке 5.26 представлена осциллограмма, на которой голубым цветом изображён импульс катодного напряжения, розовым цветом – катодного тока, жёлтым цветом – синхронизирующего импульса. Длина синхронизирующего импульса составляет 7,5 мкс.

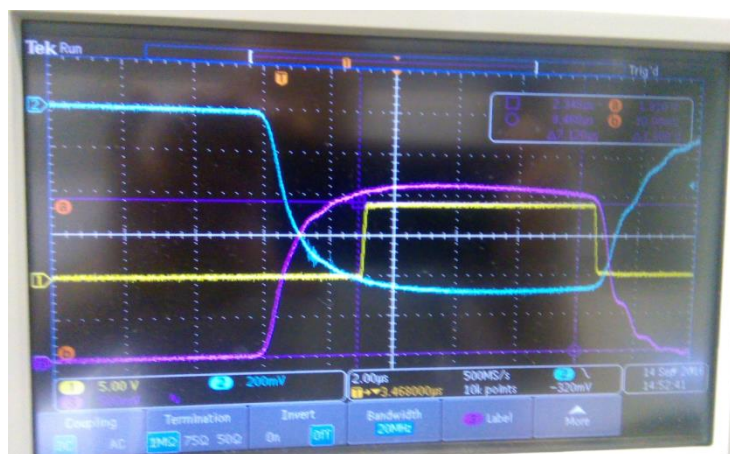


Рис. 5.26. Осциллограмма синхронизирующего импульса, импульсов катодного напряжения и катодного тока.

На рисунке 5.27 представлен импульс длительностью 7,5 мкс выходной мощности 6,02 МВт, частота повторения при этом составляет 110 Гц.



Рис. 5.27. Осциллограмма импульса выходной мощности.

Входная и выходная температуры коллектора, анодного блока и водяной нагрузки, рассчитанной на частоту 3 ГГц, при калориметрических измерениях показаны на фотографии рисунка 5.28.



Рис. 5.28. Входная и выходная температуры коллектора, анода и нагрузки.

На фотографиях представлены поток воды в нагрузке (рис. 5.29) и в аноде (рис. 5.30).

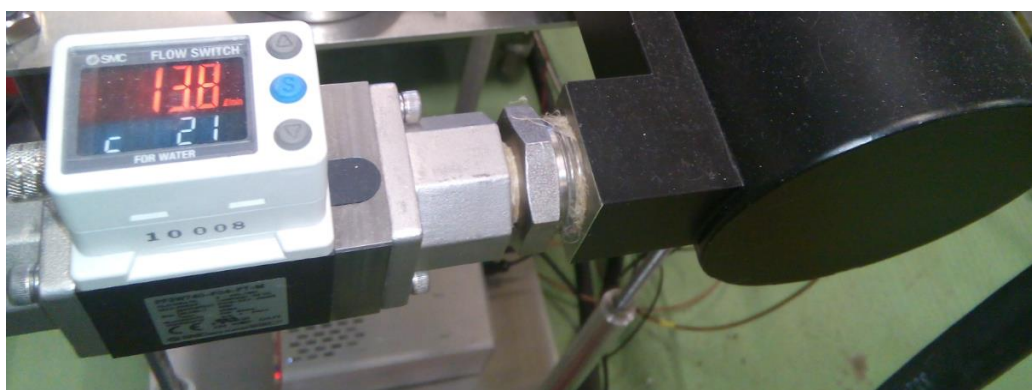


Рис. 5.29. Поток воды в нагрузке.



Рис. 5.30. Поток воды в аноде.

Рабочий цикл определим произведением длительности подаваемых импульсов на частоту их повторения (или отношение длительности импульсов к периоду их следования):

$$D = \tau \cdot f_p \quad (5.2)$$

, где τ – длительность импульса, f_p – частота повторения импульсов.

Связь средней выходной мощности с импульсной выходной мощностью через рабочий цикл:

$$P_{ave} = D \cdot P_{pulse} \quad (5.3)$$

В динамических испытаниях, проведенных в ЦЕРН’е, рабочий цикл (5.2), выраженный в процентах составлял ($\tau = 7,5$ мкс, $f_p = 110$ Гц): $D = 7,5 \cdot 110 / 1000000 \cdot 100\% = 0,0825\%$.

Средняя мощность и импульсная мощность в нагрузке:

$$P_{out.av.rf} = 13,8 \frac{\text{Л}}{\text{мин}} / 60 \cdot 4,18 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}} \cdot (30,7-24,8 \text{ К}) \cdot 1000 = 5,6 \text{ кВт},$$

$$P_{out,pulse} = P_{out.av} / \text{Рабочий цикл (\%)} \cdot 100\% = 6,86 \text{ МВт}.$$

Средняя мощность в коллекторе (для целой длины импульса, включая действующую и недействующую части):

$$P_{col.av.total} = 14,5 \frac{\text{Л}}{\text{мин}} / 60 \cdot 4,18 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}} \cdot (6,2 \text{ К}) \cdot 1000 = 6,2 \text{ кВт}.$$

Средняя мощность в аноде (для целой длины импульса, включая действующую и недействующую части):

$$P_{body.av.total} = 11,5 \frac{\text{Л}}{\text{мин}} / 60 \cdot 4,18 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}} \cdot (3,4 \text{ К}) = 2,7 \text{ кВт}.$$

Как показано на рисунке 5.26, часть импульса в отсутствии СВЧ – сигнала составляет 3,5 мкс. Таким образом, средняя мощность на коллекторе для недействующей части импульса в отсутствии СВЧ – сигнала составляет

$$P_{col.av.no} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ с} \cdot 201 \text{ А} \cdot 51,2 \text{ кВ} \cdot 110 = 4,0 \text{ кВт}.$$

Предположим, что ток коллектора составляет 96% от тока катода в статическом режиме. Следовательно, средняя мощность на аноде для недействующей части импульса без СВЧ – сигнала вычисляется следующим образом:

$$P_{\text{body.av.no}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ с} \cdot 201 \text{ А} \cdot 51,2 \text{ кВ} \cdot 0,04 \cdot 110 = 0,2 \text{ кВт.}$$

Рассчитанная средняя мощность для различных частей клистрона в СВЧ – режиме составляет: нагрузка $P_{\text{out.av.rf}} = 5,6$ кВт, коллектор $P_{\text{col.av.rf}} = 6,2 - 4,0 = 2,2$ кВт, анод $P_{\text{body.av.rf}} = 2,7 - 0,2 = 2,5$ кВт. Общая мощность определяется их суммой: $P = 5,6 + 2,2 + 2,5 = 10,3$ кВт. КПД при этом примерно равняется $5,6 / 10,3 \cdot 100\% = 54,4 \%$.

Это только грубая оценка, поскольку не были рассчитаны интегралы статической и динамической части импульса. Для того чтобы получить лучшую точность, следует вычислить значения потока воды и интеграла $U_0 \cdot I_0$ в недействующей части осциллограммы.

§ 5.5. Сравнение с прототипом

Чтобы минимизировать риски разработки и стоимость производства, было решено улучшить технические параметры существующего клистрона КИУ – 147, разработанным под руководством Фрейдовича И.А., в эффективности и энергопотребления. КИУ – 147 находится в производстве в России («Торий») почти 15 лет и работает при напряжении 50 кВ, силе тока 290 А с 42% эффективностью (рис. 5.31). Параметры клистрона представлены в таблице 5.3.



Рис. 5.31. Клистрон КИУ-147.

В новой разработке основные изменения коснулись только резонаторного блока, в котором были представлены БАК резонаторы, при этом количество резонаторов увеличилось с 6 до 9.

Таблица 5.3. Параметры клистрона КИУ – 147.

Частота, МГц	2856
Катодное напряжение, кВ	52
Суммарный первеанс, мкА/В ^{3/2}	24
Выходная импульсная мощность, МВт	6
Выходная средняя мощность, кВт	25
КПД, %	45
Коэффициент усиления, дБ	50
Количество лучей	40
Способ фокусировки	МРФС
Масса клистрона с ФС, кг	90

Возможность достижения технического результата подтверждается экспериментальными данными по созданию клистрона S-диапазона с выходной импульсной мощностью 6 МВт. КПД клистрона ВТ258 (рис. 5.32) было повышено по сравнению с прототипом – клистроном КИУ-147 («Торий») с 42 до 64% [130,132]. Расчетный КПД БАК – клистрона составлял при этом 72,9%, а расчётный КПД прототипа с традиционной группировкой был 64%. Потери КПД по сравнению с расчетом связаны с многолучевой конструкцией клистрона (40 лучей), сверхразмерными резонаторами, фокусировкой электронов постоянными магнитами и, как следствие, уменьшением токопрохождения электронов через каналы клистрона.



Рис. 5.32. Клистрон ВТ-258

Впервые в мире экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности многолучевого клистрона за счет применения нового метода группирования (БАК – метода). Повышение КПД по сравнению с прототипом позволило в 1,5 раза снизить рабочий ток прибора (с 300 А до 200 А) и сократить в 1,5 раза потребляемую энергию при сохранении рабочего напряжения на уровне 50 кВ.

§ 5.6. Динамические испытания второго клистрона

Максимальная эффективность 64% была достигнута во втором клистроне. Импульсная выходная мощность была измерена направленным ответвителем, включенным в выходной тракт. Общее ослабление составляло 80,31 дБ. Испытания второго клистрона проводились в ОИЯИ г. Дубна с частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью импульса 3 мкс, поскольку высоковольтный модулятор имеет ограничения на параметры импульса. Рабочее напряжение и сила тока в рабочей точке составили 51,7 кВ и 192 А соответственно. На рисунке 5.33 показано сравнение частотных характеристик первого по результатам испытаний в ЦЕРН’е и второго клистрона по результатам испытаний в ОИЯИ. Эффективность второго клистрона оказалась выше, чем у первого [130,132]. Результаты испытаний второго БАК – клистрона превзошли результаты испытаний первого клистрона (были учтены технологические особенности первого), что является ещё одним практическим подтверждением эффективности новой идеи группировки электронного потока.

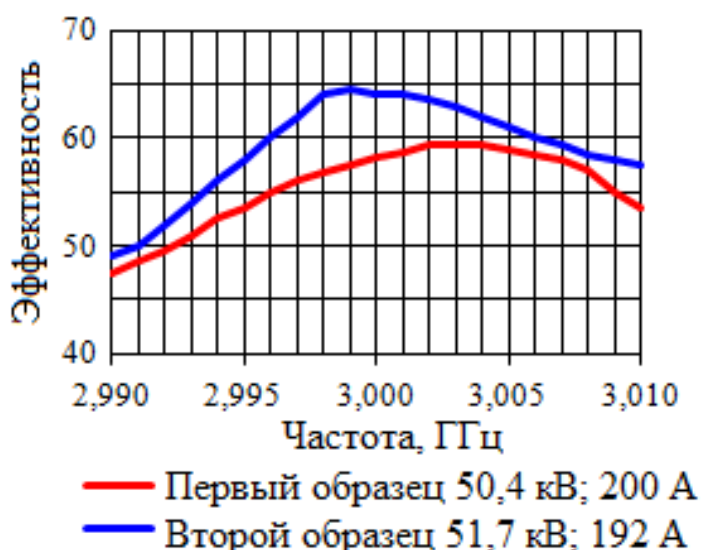


Рис. 5.33. Частотная характеристика первого и второго клистронов.

§ 5.7. Сравнение с зарубежными аналогами

Три известных мировых поставщика СРІ (США), Thales (Франция), Toshiba (Япония), поставляющие клистроны для современных ускорителей частиц, серийно выпускают однолучевые клистроны S – диапазона с выходной мощностью 6 МВт [131-132]. Клистроны показаны на рисунке 5.34. Сравнение характеристик однолучевых клистронов этих поставщиков и разработанного многолучевого БАК клистрона ВТ258 (Россия) приведено в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Параметры клистронов.

Клистрон	VKS – 8262	ТН 2173К	E3779	«ВТ258»
Производитель	СРІ	Thales	Toshiba	БТКВП
Страна	США	Франция	Япония	Россия
Частота, ГГц	2,9985	2,9985	2,9985	2,9985
Пиковая выходная мощность, МВт	6	5	6	7
КПД, %	45	50	42	64
Средняя выходная мощность, кВт	36	36	6	30
Пиковая входная мощность, Вт	200	40	75	125
Усиление, дБ	45	51	49	46,7
Пиковое напряжение, кВ	135	130	145	<52
Пиковый ток, А	109	90	105	190
Количество пучков	1	1	1	40
Длина импульса, мкс	17	17	2,5	17
Масса, кг	200	160	240	95
Длина, м	1,000	0,975	1,000	0,800



Рис. 5.34. Прототипы клистронов Toshiba, CPI, Thales, БТКВП.

Институт CSIR-CEERI (Индия) при финансовой поддержке Bhabha Atomic Research Centre (Мумбаи) к 2017 году разработали 3 однолучевых клистронов S – диапазона длин волн (2,856 ГГц) с пиковой выходной мощностью 6 МВт. Средняя мощность при этом составляла 24 кВт, напряжение пучка 135 кВ, сила тока 116 А. КПД такого клистронов составляет 38%.

Клистроны, представленные в таблице 5.4, работают в одном диапазоне частот с одинаковой импульсной выходной мощностью. При этом следует подчеркнуть преимущества разработанного многолучевого клистронов «BT258» [131]:

- 1) эффективность клистронов существенно выше эффективности аналогов;
- 2) низкое рабочее напряжение (ниже 60 кВ);
- 3) микропервенеанс на луч составляет 0,4;
- 4) долговечность;
- 5) применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид, что позволяет уменьшить массу всей системы, а также избежать энергопотребления магнитной системой;
- 6) самая маленькая длина из представленных клистронов;
- 7) низкий уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора;
- 8) возможность применения клистронов в мобильных установках, так как он может работать на воздухе без применения масляной изоляции в источнике питания.

Идеи СОМ и ВАС группировки электронов были восприняты научным сообществом положительно, после этого исследователи и разработчики по всему миру начали применять эти идеи при создании мощных высокоэффективных клистронов. Активно ведутся работы, использующие СОМ и ВАС методы группировки электронов, первоначально предложенные в России, за рубежом (Китай, Япония, США, Франция).

В 2018 году организация Toshiba (Япония) представила результаты испытаний своего первого клистрона S – диапазона (частота 2,856 ГГц), опирающегося на СОМ – метод группировки электронного потока, предложенного Байковым А. Ю. С помощью этого метода группировки им удалось поднять эффективность своего клистрона на 12% [114]. Результаты первых испытаний этого клистрона представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Результаты испытаний СОМ – клистрона (Япония).

Параметр	Испытание 1	Испытание 2
Частота, ГГц	2,856	2,856
Напряжение пучка, кВ	131,1	144,8
Ток пучка, А	83,4	95,2
Выходная мощность, МВт	6,2	7,5
Длина импульса, мкс	4,5	4,5
Частота повторения, Гц	100	100
Входная мощность, Вт	60	90
Эффективность, %	56,9	54,7
Усиление, дБ	50,5	49,0
Микропервеанс пучка, мкА/В ^{3/2}	1,76	1,73
Мощность соленоида, кВт	2,6	6,5

§ 5.8. Увеличение выходной мощности БАК – клистронов

Увеличение выходной мощности клистронов всегда являлось актуальной задачей современной СВЧ электроники. С этой целью были изучены возможности реализации разработанной конструкции БАК-клистрона для повышения выходной мощности до уровня 10 МВт и более [132-133].

Перспективы повышения выходной мощности до уровня 10 МВт

При расчёте фазовых траекторий электронного пучка в БАК-клистроне с выходной мощностью 10 МВт напряжение пучка сохраняется на уровне 60 кВ. Мощность клистрона возрастает за счёт увеличения тока пучка. Клистрон с выходной мощностью 10 МВт рассчитан на силу тока 300 А и напряжение 58 кВ. Для этого клистрона сохраняется прежняя электронно-оптическая система, он может быть сделан без существенного изменения конструкции (количество пучков остаётся равным 40). Оптимизированная расчётная эффективность для 10 МВт-ного БАК-клистрона может достигать 73,68%, что несколько превышает уровень расчётной эффективности для разработанного клистрона с выходной мощностью 7 МВт, усиление при этом находится на уровне 55 дБ с мощностью входного сигнала $P_{in} = 40$ Вт. По параметрам этот клистрон аналогичен клистрону КИУ – 147. За счёт повышения КПД с 42 до 64% выходная мощность будет находиться на уровне не 6 МВт, а 10 МВт. Результаты оптимизированного расчёта представлены на рисунке 5.35.

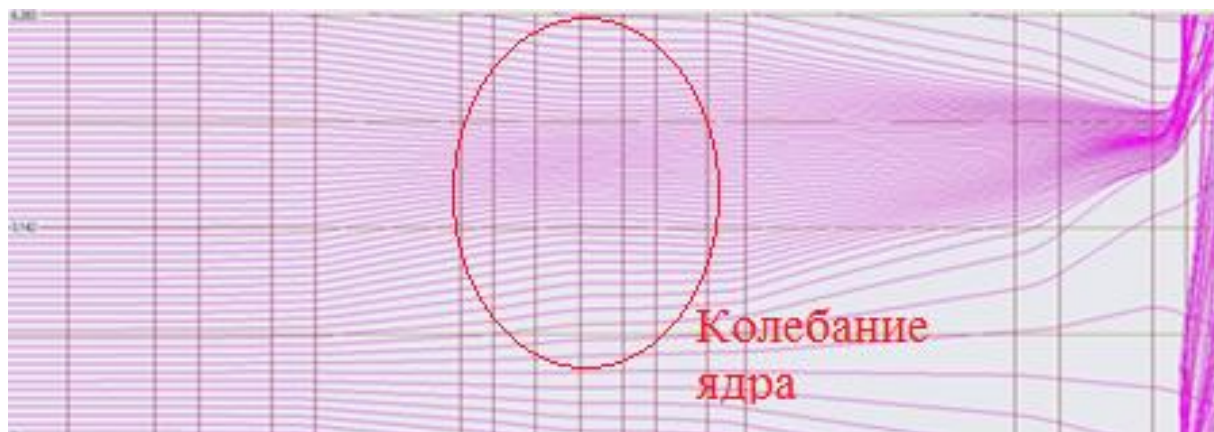


Рис. 5.35. Фазовые траектории БАК – клистрона с выходной мощностью 10 МВт (расчётное КПД 73,68%, сила тока – 300 А, напряжение пучка 58 кВ).

Перспективы повышения выходной мощности до уровня 20 МВт

Клистрону с уровнем выходной мощности 20 МВт потребуется напряжение 60 кВ и сила тока 550 А, распределённых на 54 парциальных пучка. Для сохранения физически реализуемого значения плотности тока электронов, эммитированных с поверхности катода, необходимо увеличивать количество пучков и внести изменения как в конструкцию электронной пушки, так и в конструкцию всего устройства.

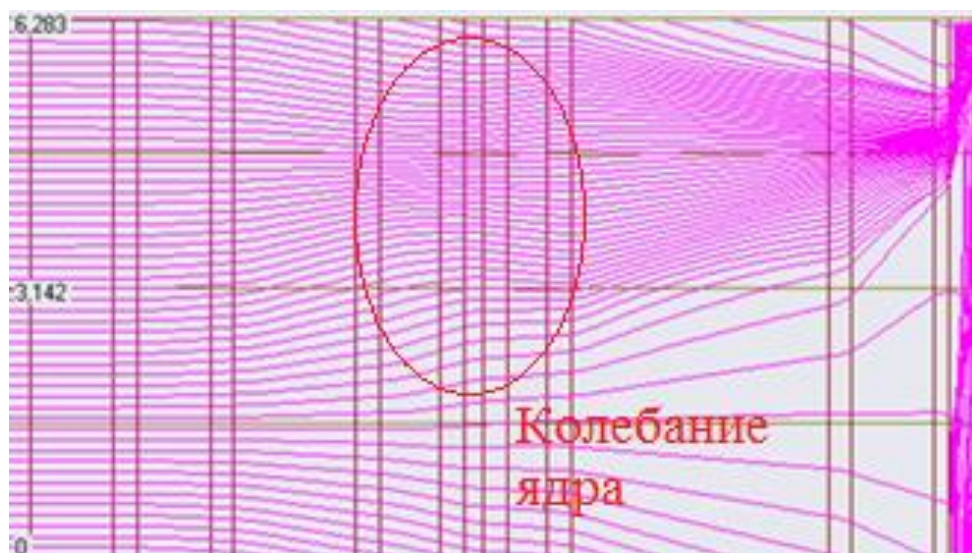


Рис. 5.36. Фазовые траектории БАК- клистрона с мощностью 20 МВт (расчётное КПД - 71,35%, ток – 550 А, напряжение 60 кВ, число парциальных пучков – 54).

По оценкам автора клистрон с выходной мощностью 20 МВт должен иметь 54 пучка. Сила тока парциального пучка в каждом канале такого клистрона будет немного превышать 10 А. Оптимизированная расчётная эффективность для 20 МВт-ного БАК-клистрона может достигать – 71,35%, при этом коэффициент усиления будет составлять 55 дБ (рис. 5.36). Таким образом, токопрохождение является сдерживающим фактором на пути получения мощности 25 ÷ 30 МВт в клистронах S – диапазона с катодным напряжением до 60 кВ. Тем не менее, экспериментальная эффективность клистронов с такой выходной мощностью может составить 60%.

Перспективы повышения выходной мощности до уровня 30÷40 МВт

Были проведены оценки получения выходной мощности на уровне 30÷40 МВт. Электродинамика рассчитывалась в двух одномерных программных комплексах (Klys 4.5, DEV 5.1). Параметры клистрона представлены в таблице 5.6. Для питания такого клистрона потребуется новый источник высокого напряжения с уровнем 100 кВ (питающее напряжение клистронов с выходной мощностью до 10 МВт составляло 60 кВ). Сила тока возрастает до 600 А, ток будет распределён в 40 пучках, то есть с каждого катода необходимый ток составляет 15 А. Это потребует дополнительной разработки для увеличения долговечности такого устройства. Уровень мощности входного сигнала не изменяется и остаётся равным 40 Вт.

Таблица 5.6. Параметры клистрона с уровнем выходной мощностью 30÷40 МВт.

Параметр	Ед. измерения	Значение
F	ГГц	2,9985
$N_{\text{резонаторов}}$		9
I_0	А	600
U_0	кВ	100
$N_{\text{пучков}}$		40
P_{in}	Вт	40

Качество группировки остаётся на высоком уровне, пересечение фазовых траекторий электронов не наблюдается (электроны не обгоняют друг друга во время группировки). Фазовые траектории в программах Klys 4.5. и DEV 5.1. представлены на рисунках 5.37 и 5.38 соответственно.

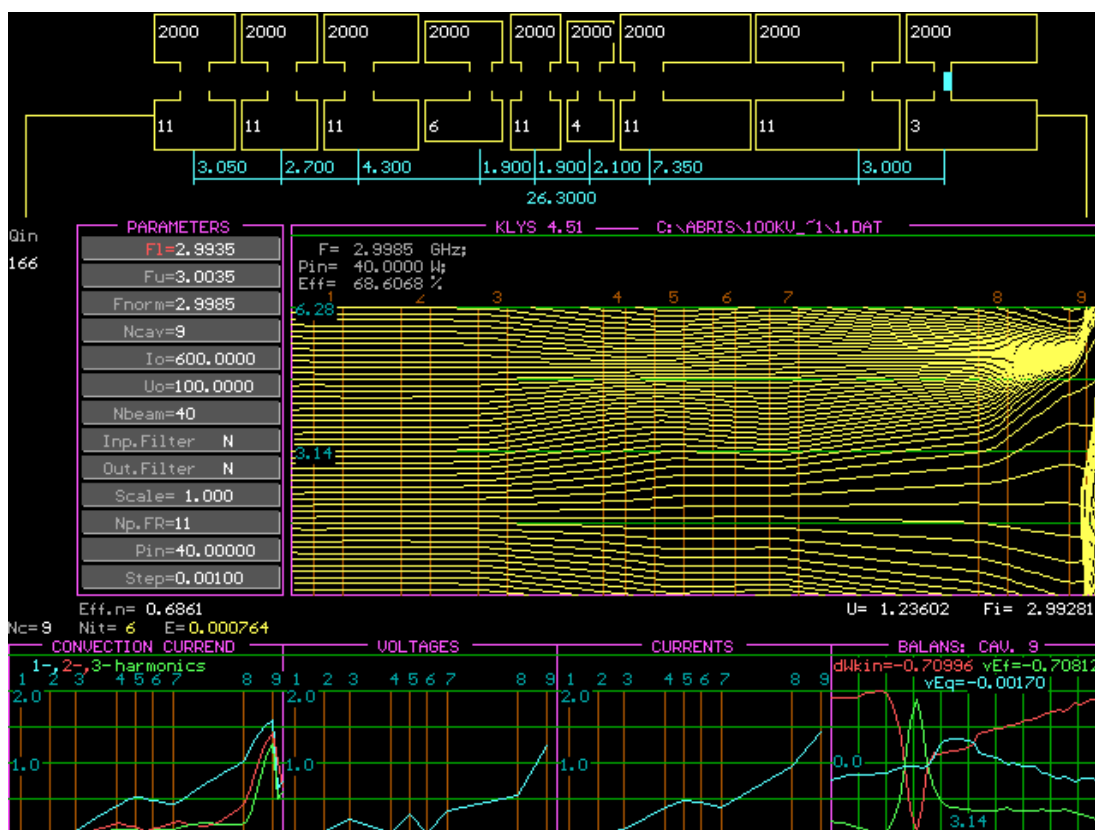


Рис. 5.37. Фазовые траектории клистрона с уровнем выходной мощностью 30÷40 МВт в программном комплексе Klys 4.5. (КПД 68,6%).

Эффективность БАК – клистрона с выходной мощностью 30÷40 МВт в оптимизированных расчётах остаётся на столь же высоком уровне 68,6% (Klys 4.5) и 66,44% (DEV 5.1.), что и в расчётах клистрона ВТ258, который был экспериментально разработан. Обоснованность расчётов подтверждена результатами испытаний первых БАК – клистронов.

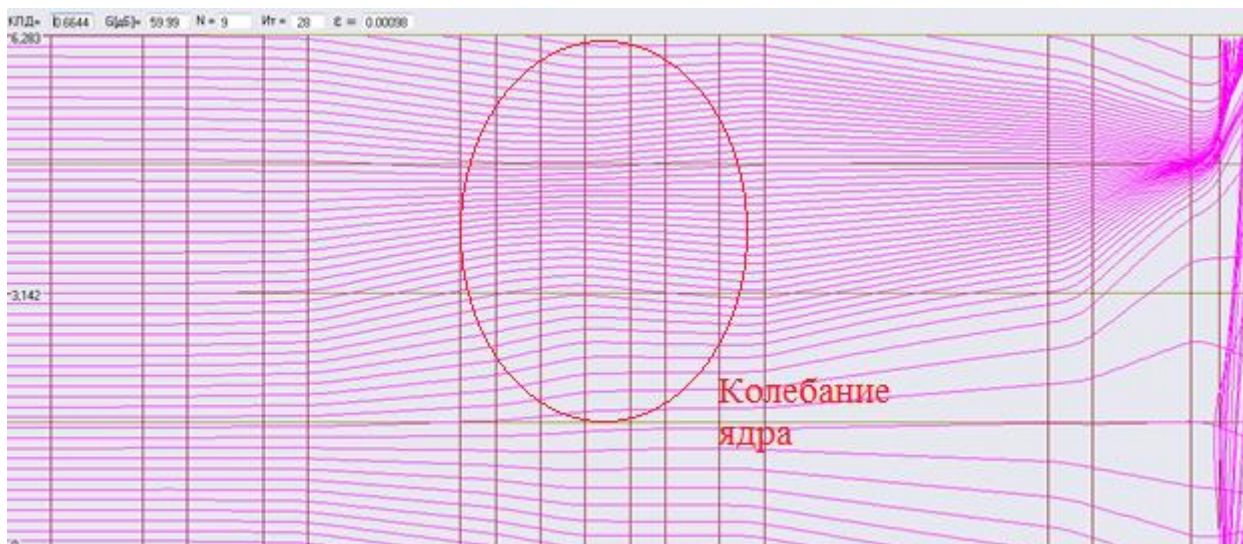


Рис. 5.38. Фазовые траектории клистрона с уровнем выходной мощности 30÷40 МВт в программном комплексе DEV 5.1. (КПД 66,55%, усиление $G = 59,99$ дБ).

§ 5.9. Выводы

1) Динамические испытания первого образца БАК – клистрона ВТ – 258 первоначально были проведены в ОИЯИ г. Дубна. При перестройке катодного напряжения от 48 до 55 кВ токопрохождение электронов от катода до коллектора изменялось в пределах от 94 до 96 %. На вход клистрона подавался высоковольтный импульс длительностью 5 мкс и частотой повторения 10 Гц. Максимальная выходная мощность 7 МВт была измерена на частоте 3,004 ГГц при напряжении пучка 51,7 кВ и силе тока 205 А, мощность СВЧ сигнала, поступающего с предусилителя составляла 105 Вт. КПД на этой частоте составляет 66%.

2) В ЦЕРН’е первый БАК – клистрон был испытан с частотой повторения импульсов 110 Гц и длительностью импульса, доходящей до 7,5 мкс. Самая большая эффективность в насыщении 59,7% была измерена на частоте 3,003 ГГц при напряжении пучка 50,25 кВ и силе тока 195 А.

3) КПД клистрона ВТ-258 было повышено по сравнению с прототипом – клистроном КИУ-147 с 42 до 66%. Повышение КПД по сравнению с прототипом позволило в 1,5 раза снизить рабочий ток прибора (с 300 А до 200 А) и сократить в 1,5 раза потребляемую энергию при сохранении рабочего напряжения 50 кВ. В этой разработке катод, длина, магнитная фокусирующая система, коллектор и выходное окно были идентичны элементам КИУ-147А. Изменения коснулись только резонаторного блока, в котором были представлены БАК резонаторы.

4) Эффективность новых БАК – клистронов выше на 15-20%, энергопотребление меньше в 1,5 раза, рабочее напряжение ниже в 2,5 раза, в 2 раза меньше масса и габариты, ниже уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора по сравнению с зарубежными аналогами.

5) Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции. Выходная мощность 20 МВт вполне достижима. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью 10 – 20 МВт составляет порядка 70%. КПД клистронов с уровнем выходной мощности 30-40 МВт, конструкция которых будет существенно отличаться, составляет 66-68%. Обоснованность расчётов подтверждена результатами испытаний клистронов. Их внедрение позволит создать новое поколение мощных многолучевых клистронов, превосходящих зарубежные аналоги.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОНЕ

§ 6.1. Введение

Для понимания происходящих физических процессов в многолучевом приборе О-типа важно исследовать задачу динамики электронных пучков в электромагнитных полях, используя современные трёхмерные программные пакеты. Среди основных причин необходимости такого рассмотрения можно выделить следующие:

1) КПД расчётных клистронов больше КПД реальных приборов на 10-20%. Одномерный анализ электронных процессов не выявляет объективных причин такого расхождения результатов. Оптимизированный процесс усиления в пролетном канале клистроны, полученный в одномерной теории, механически «умножается» на число лучей и даёт завышенный результат. На практике процессы усиления в различных каналах отличаются друг от друга, и в результате экспериментальный КПД будет отличаться от предсказанного значения в одномерной теории.

2) В экспериментах выявлены «расстройки» параметров резонаторов, в частности, во входном и выходном резонаторе несимметричным расположением петли и щели связи относительно каналов резонаторов. Для увеличения КПД экспериментальных образцов потребовалась «ручная» доводка резонаторов для выравнивания частот и характеристического сопротивления ρ резонаторов.

3) Увеличение числа лучей в мощных клистроны и применение кольцевых резонаторов неизбежно приводит к значительному увеличению диаметра резонаторов и, соответственно, к изменению модового состава СВЧ колебаний в резонаторах. В исследованных образцах мощных клистронов с числом лучей равным 40 поперечные размеры кольцевых резонаторов становятся сравнимыми с длиной волны резонансных колебаний. Поэтому можно ожидать заметного искажения результирующего высокочастотного поля в пролётных каналах из-за возбуждения высших мод колебаний в резонаторах.

Все вышеприведенные обстоятельства вызывают необходимость детального 3D – анализа процессов в мощных многолучевых клистронах с целью нахождения объективных физических причин ограничения КПД.

Также было важным научиться ставить задачи, определить время расчёта, сетку разбиения, количество заряженных частиц в трёхмерных программных пакетах, поскольку до этого исследователи и разработчики использовали только одномерные и двумерные программные комплексы. Необходимо рассмотреть пути улучшения характеристик (выходная мощность, КПД, качество группирования электронов и т.д.) разработанного БАК – клистрона с выходной мощностью 6 МВт. Такая задача трёхмерного моделирования электронных процессов в мощных многолучевых приборах О – типа ставится впервые.

Для решения поставленной задачи был выбран метод «Частица в ячейке». «Частица в ячейке» – трёхмерный пакет для расчёта динамики электронов и других заряженных частиц в трёхмерных электромагнитных полях во временной области. Этот метод позволяет выполнить моделирование траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях с учетом влияния сил пространственного заряда, релятивистских поправок и т.д. Электромагнитные поля вычисляются в узлах сетки по схеме с перешагиванием, при этом электроны движутся в непрерывном фазовом пространстве. Величина максимального временного шага зависит от минимального шага сеточного разбиения при дискретизации модели (чем плотнее сетка разбиения, тем меньше временной шаг).

Алгоритм «Частица в ячейке» является самосогласованным, поэтому необходимо, во-первых, регулярно осуществлять интерполяцию электромагнитных полей для описания движения электронов, во-вторых, проводить интерполяцию токов для получения распределения электромагнитного поля. Эти схемы являются линейными.

За один временной шаг Δt проходит целый цикл расчётов, состоящий из четырех этапов, взаимодействия электронов с электромагнитными полями:

- 1) Обновление электрического и магнитного полей;
- 2) Интерполяция полей в координатах частиц;
- 3) Пошаговое обновление координат и импульса частиц в соответствии с вычисленными на предыдущем шаге статическими и динамическими электрическими и магнитными полями;

Аналитическое выражение изменения импульса:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \quad (6.1)$$

Дискретизированное выражение изменения импульса (обновление скоростей заряженных частиц):

$$m^{n+1}\vec{v}^{n+1} = m^n v^n + q\Delta t \left(\vec{E}^{n+\frac{1}{2}} + \vec{v}^{n+\frac{1}{2}} \times \vec{B}^{n+\frac{1}{2}} \right); \quad (6.2)$$

Аналитическое выражение изменения координаты:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}; \quad (6.3)$$

Дискретизированное выражение изменения координаты (обновление пространственных координат заряженных частиц в дискретной форме):

$$\vec{r}^{n+\frac{1}{2}} = \vec{r}^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t \vec{v}^n; \quad (6.4)$$

4) Вычисление распределения тока из характера движения электронов.

Программа поддерживает различные типы эмиссии электронов: постоянный ток, гауссовы сгустки, полевая эмиссия и пользовательская. Существует возможность создавать практически любой источник заряженных частиц. Моделирование динамики электронов может быть реализовано в статических электрических и магнитных полях, в собственных модах резонансных систем, бегущих волнах, а также в пользовательских электромагнитных полях.

Среда проектирования позволяет использовать инструменты моделирования электроники. Например, доступно использование волноводных портов для получения входных и выходных сигналов, мониторов электромагнитных полей, 2D и 3D мониторов частиц, а также материалов с потерями и материалов с дисперсными свойствами и т.д. Возможно получение распределения всех частиц в фазовом (6D) пространстве в любой момент времени с последующим выводом их координат и скоростей в файл формата txt.

Необходимо отметить ограничения применяемого метода к решению трёхмерной задачи. Во-первых, внешнее фокусирующее магнитное поле приходилось задавать вдоль оси многолучевого клистрона, а не вдоль осей каналов. Поэтому применяемый метод

«аксиального приближения» для расчёта неоднородного магнитного поля в однолучевых конструкциях здесь уже не применим, и приходится рассматривать процессы в постоянном вдоль длины клистрона магнитном поле. Во-вторых, необходимо разработать алгоритмы выравнивания характеристических параметров разных пролётных каналов.

Поэтому основной целью проведенного моделирования являлось выявление основных физических факторов, ограничивающих эффективность процесса усиления СВЧ сигнала в многолучевых конструкциях, а не оптимизация параметров клистрона с целью достижения предельных КПД.

§ 6.2. Результаты численного моделирования динамики клистрона в 3D

Для численного 3D – моделирования электронных процессов усиления была выбрана конструкция экспериментально разработанного 6 МВт многолучевого БАК – клистрона, описанного в главе 5.

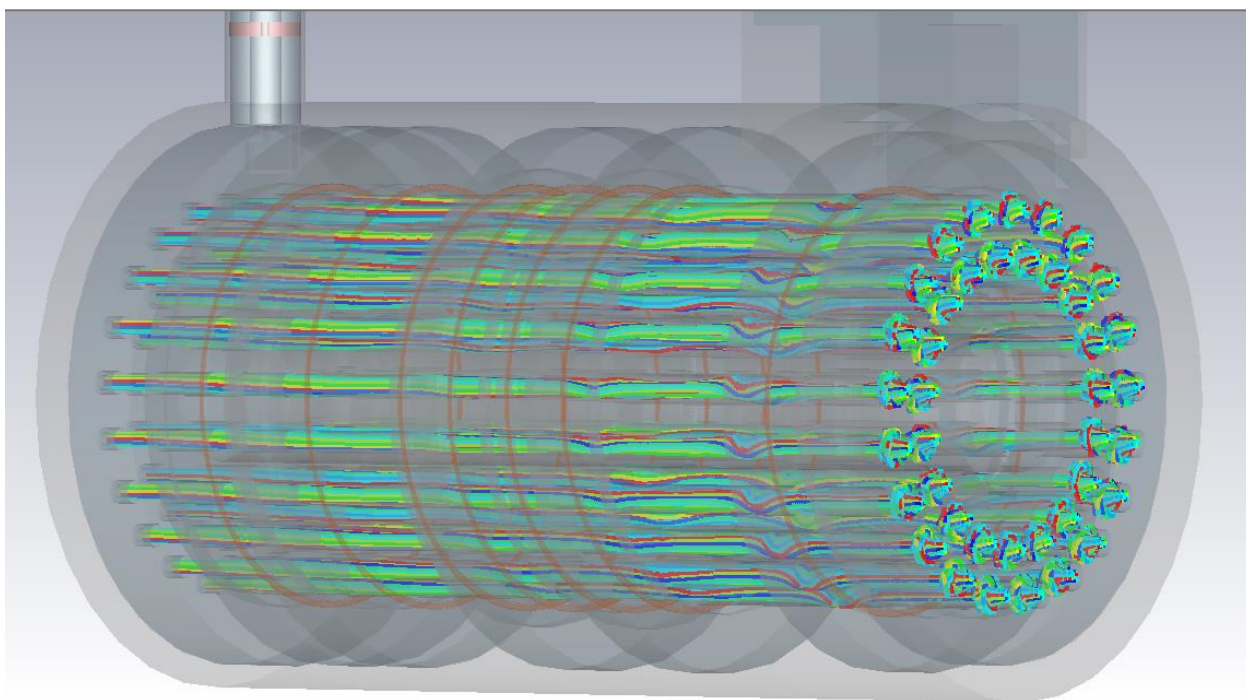


Рис. 6.1. Модель многолучевого клистрона в трёхмерном программном комплексе с траекториями электронов.

На рисунке 6.1 представлен 40-лучевой девяти резонаторный БАК – клистрон с постоянной мощностью электронного пучка 10,4 МВт, работающий на частоте 2,9985 ГГц, через 200 нс после начала эмиссии электронов. С левой стороны рисунка изображена коаксиальная линия, с помощью которой осуществляется передача входного сигнала в

первый резонатор клистрона. Микроволновая мощность выводится через волновод с помощью щели связи с выходным резонатором.

Для настройки добротности всех промежуточных резонаторов и исключения перегруппировки электронов в первых резонаторах необходимо вводить диэлектрические поглотители. Добротности Q резонаторов с идеальными проводящими стенками без введения поглощающего материала имеют значения свыше 7000. Тангенс угла потерь в диэлектрическом поглотителе во всех ненагруженных, промежуточных резонаторах подбирается таким образом, чтобы добротности этих резонаторов Q соответствовали экспериментальным значениям ($\sim 3500 \div 4000$).

В таблице 1 представлены параметры многолучевого клистрона, которые использовались при моделировании и расчёте в трёхмерном программном пакете.

Таблица 1. Параметры многолучевого клистрона.

Параметр	Единица измерения	Значение
Частота сигнала, f_0	ГГц	2,9985
Ток пучка, I_0	А	200
Количество пучков, N_b		40
Напряжение пучка, U_0	кВ	52
Внешнее магнитное поле, B_z	Гс	850
Мощность входного сигнала, P_{in}	Вт	30
Время расчёта, t_{calc}	Нс	200
Число эмиттированных «Частиц в ячейке»		800
Общее число частиц		> 2 500 000
Количество ячеек сетки		8 000 000

По результатам оптимизации внешнего фокусирующего магнитного поля в статическом режиме, частот всех резонаторов в отсутствии электронного потока, собственных добротностей промежуточных резонаторов, нагруженных добротностей входного и выходного резонаторов, конфигурации петли связи во входном резонаторе,

проводимости входного резонатора с пучками электронов, уровня входного сигнала была получена зависимость выходного сигнала (рис. 6.2) в выходном волноводе.

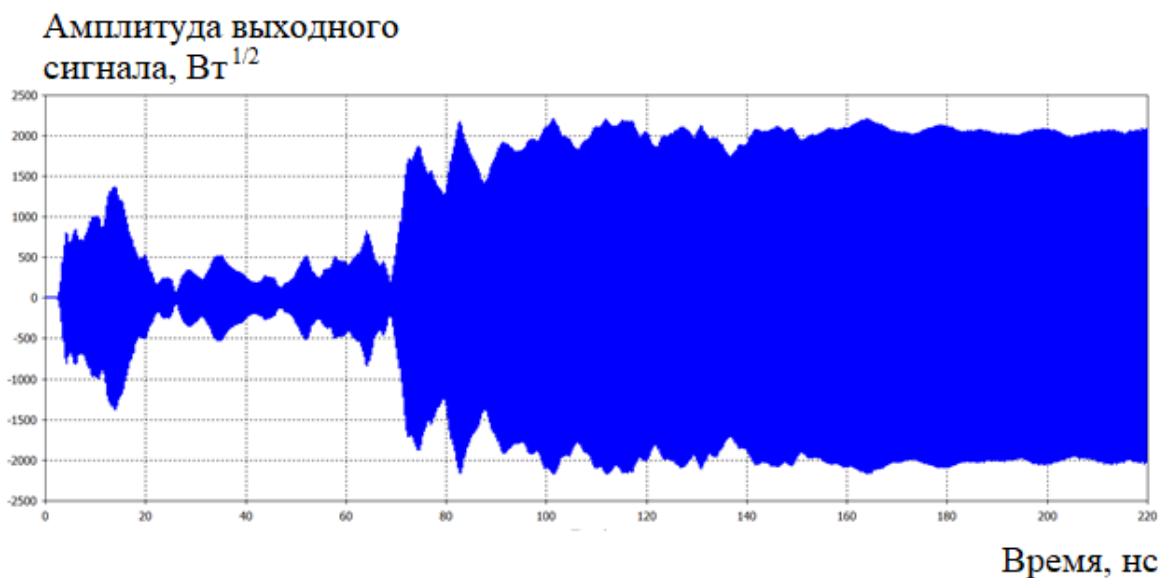


Рис. 6.2. Зависимость амплитуды выходного сигнала в волноводе от времени.

Время расчёта 200 нс с количеством «частиц в ячейке» 800 (по 20 «Частиц в ячейке» в каждом канале 40-лучевого клистрона) и количеством ячеек 8 000 000 составляет ориентировочно 180 часов.

Промежуточные, высокодобротные ($Q \sim 3500 \div 4000$) резонаторы достаточно долгое время запасены энергией после возмущения первыми пролетевшими электронами, поэтому в многолучевой конструкции клистрона с кольцевыми резонаторами требуется достаточно долгое время для установления стационарного режима (рис. 6.2), около $150 \div 160$ нс, что составляет примерно 500 периодов высокочастотного поля. До времён порядка 100 нс, пока не установился стационарный режим в предвыходных резонаторах, наиболее заметно влияние отраженных волн электронов. В стационарном режиме возникают небольшие биения амплитуды выходного сигнала из-за разности частот седьмого и восьмого резонатора ($f_8 - f_7 = 1/14$ нс = 70 МГц), в которых сосредоточены ВЧ электромагнитные поля со значительными амплитудами по сравнению с другими промежуточными резонаторами. Эти резонаторы отвечают за формирование конечного сгустка, приходящего к зазору выходного резонатора.

В БАК – области клистрона (после 110 координаты) происходит разгруппировка сформированного сгустка («alignment»), уменьшается разброс скоростей (рис. 6.3). Та же картина наблюдается и при рассмотрении группировки в двумерной программе.

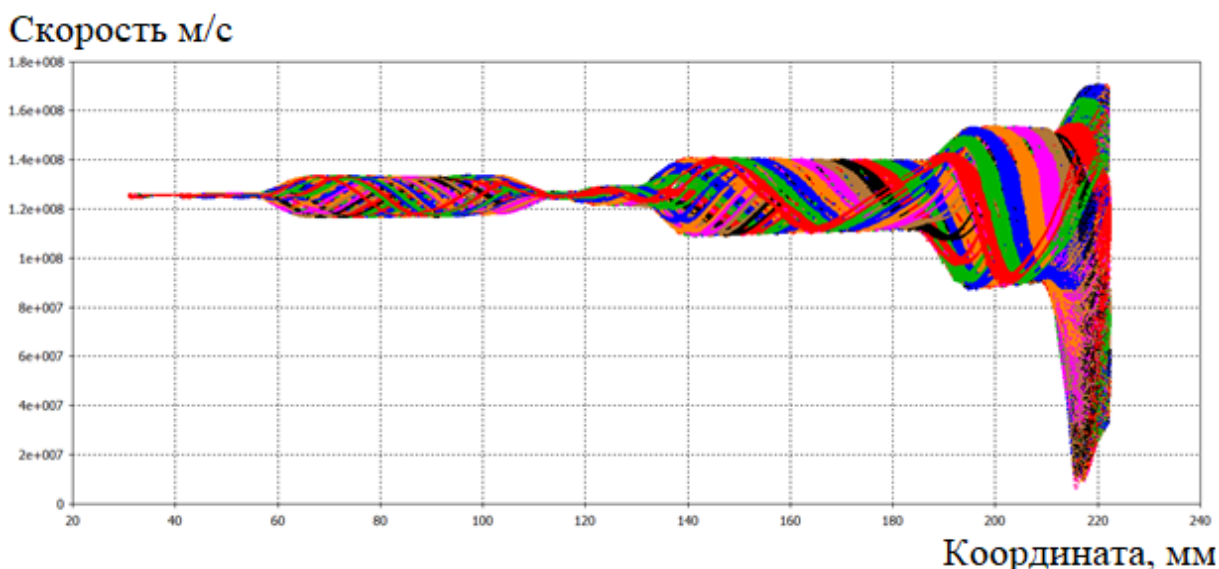


Рис. 6.3. Скорости «Частиц в ячейке» в зависимости от координаты в диапазоне времён от 200 нс до 201 нс (3 периода СВЧ поля).

Пиковая выходная мощность в такой постановке задачи (таблица 1) находится на уровне $P_{\text{out}} = (2250)^2/2 = 2,53$ МВт. 2250 – нормированная амплитуда выходного сигнала (рис. 6.2). КПД клистрона при этом составляет 24,3% [134]. Столь низкое значение эффективности по сравнению с экспериментальными значениями связано с тем, что:

1) В расчётах приходилось использовать постоянный уровень внешнего фокусирующего магнитного поля 850 Гс. Экспериментальное значение индукции магнитного поля увеличивалось к выходному зазору от 850 до 1350 Гс. Поэтому при расчётах электронные ступки были менее компактными перед торможением, что сказалось на конечной эффективности.

2) Петля ввода энергии уменьшает характеристическое (волновое) сопротивление каналов, амплитуду высокочастотных полей входного резонатора со своей стороны резонатора, вызывая различие амплитуды напряженности электрического поля основной моды в разных пролётных каналах. Электроны каналов, расположенных со стороны коаксиального ввода мощности, хуже группируются и испытывают более слабое торможение в выходном резонаторе. В экспериментальном образце эти недостатки были устранены «вручную» путём подстройки конструкции резонатора.

3) Также на процесс торможения электронов оказывает влияние неравномерность основной моды колебаний в выходном резонаторе из-за щели связи с волноводом. На рисунке 6.4 показано, что в верхних каналах, по которым двигались электроны, конечная

скорость имеет значения около $9 \cdot 10^7$ м/с. В нижних каналах электроны, отдавшие больше энергии во время торможения, имеют уже скорости порядка $5 \cdot 10^7$ м/с.



Рис. 6.4. Электронные пучки после прохождения выходного резонатора.

Первая проблема – это вопрос дальнейших исследований, на данном этапе такая задача не ставилась. Вторая и третья проблемы могут быть решены, в последующих параграфах этой главы приведены их возможные решения.

Если не решать эти проблемы, то в соответствии с расчётами, проведенными в 3D программном комплексе, падение выходной мощности и эффективности клистрона может быть существенным.

§ 6.3. Сравнение результатов трёхмерной программы с одномерной теорией

Амплитуда наведенного высокочастотного напряжения в стационарном режиме в первом приближении рассчитывается в соответствии с уравнением $U_0 = E_0 \cdot d$, где E – некоторая средняя амплитуда напряженности ВЧ сигнала в зазоре, получаемая из результатов расчёта в стационарном режиме установлением зонда E – field в необходимой пространственной точке электронного устройства, d – ширина зазора резонатора. В данном случае зонд устанавливается в точке пересечения оси трубы дрейфа и плоскости середины зазора резонатора.

На рисунке 6.5 видно, что первые пролетевшие электроны возбудили очень сильные поля в промежуточных резонаторах. Часть следующих за ними электронов получили больше требуемой энергии для ускорения, а другая часть частиц при этом отдала больше

энергии в резонатор. Оценим численное значение амплитуды наведенного напряжения в первом приближении после 180 нс:

$$U = 9 \cdot 10^5 \text{ В/м} \cdot 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 7380 \text{ В} = 0,14 \cdot U_0 \text{ В, где } U_0 \text{ – напряжение пучка.}$$

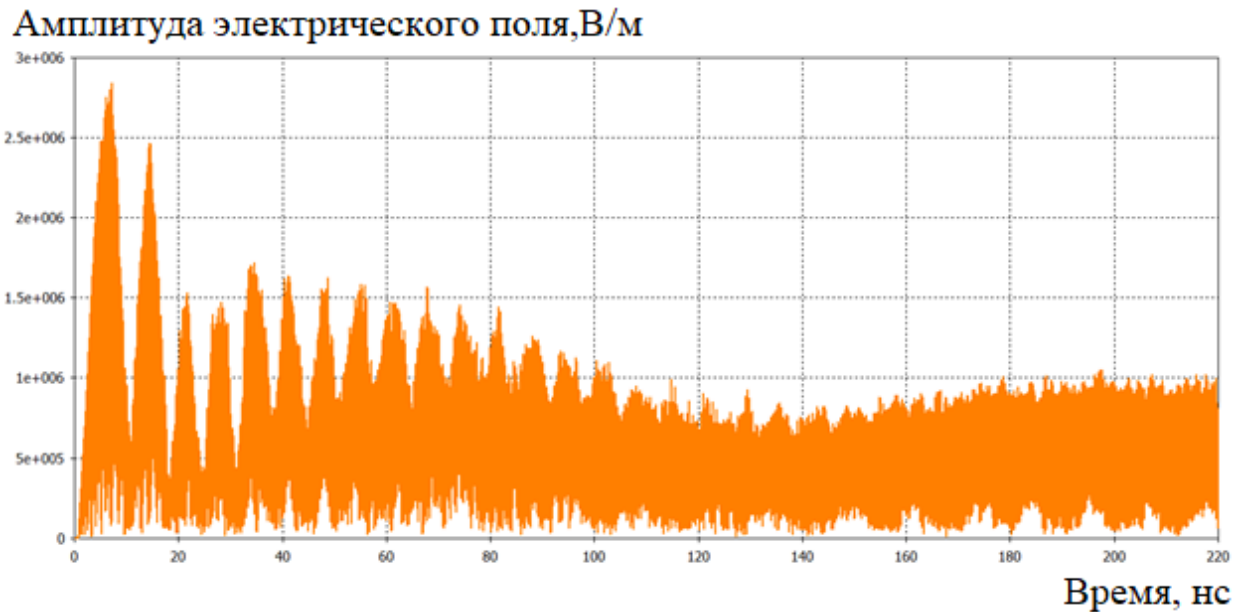


Рис. 6.5. Амплитуда напряженности высокочастотного электрического поля в зазоре разгруппирующего резонатора БАК – секции.

Аналогичную оценку проведем для амплитуды ВЧ напряжения в зазоре предвыходных резонаторов (нелинейном группирователе) (рис. 6.6-6.7).

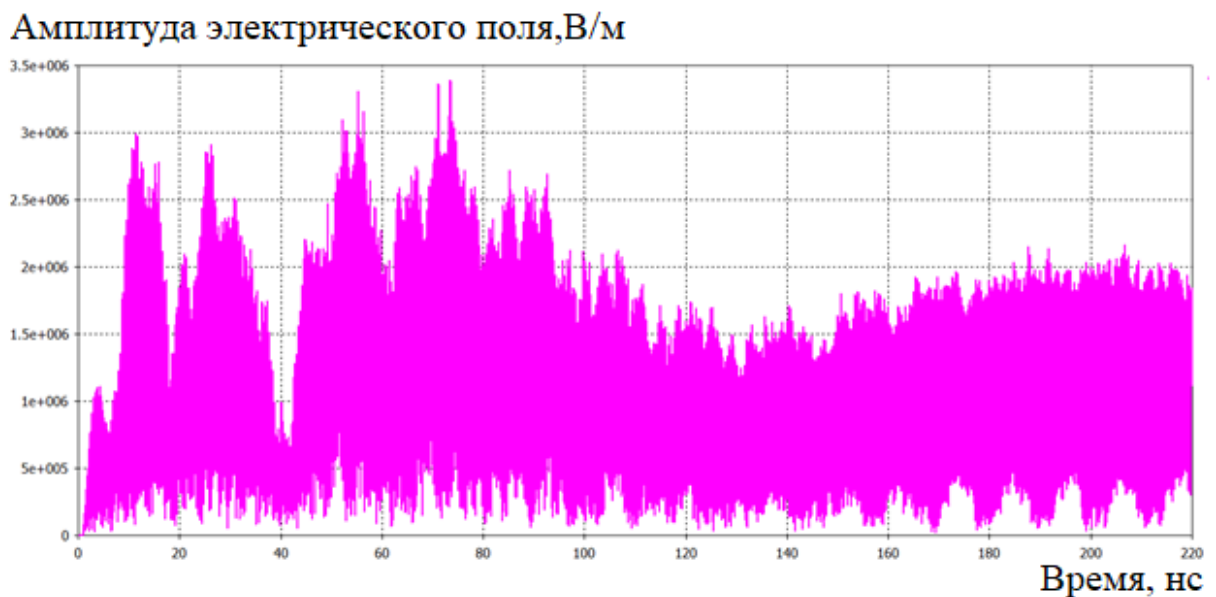


Рис. 6.6. Амплитуда напряженности высокочастотного электрического поля в зазоре 7 резонатора.

$$U = 1,8 \cdot 10^6 \text{ В/м} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 12600 \text{ В} = 0,24 \cdot U_0 \text{ В.}$$

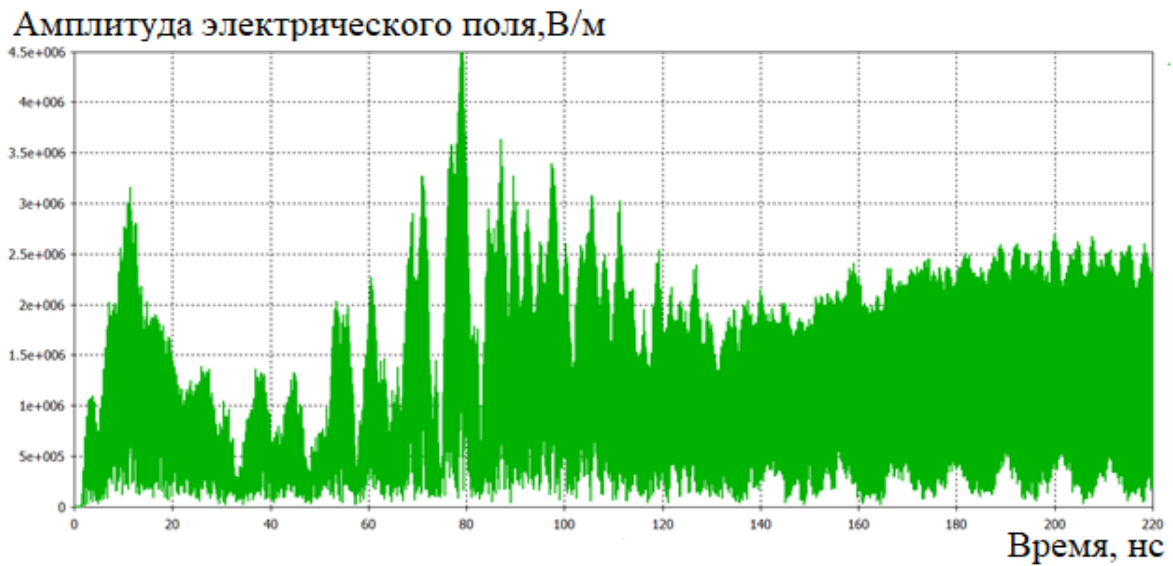


Рис. 6.7. Амплитуда напряженности электрического поля в зазоре 8 резонатора.

$$U = 1,9 \cdot 10^6 \text{ В/м} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 15200 \text{ В} = 0,29 \cdot U_0 \text{ В.}$$

Сравним результаты расчётов трёхмерной модели и одномерной теории (DEV 5.1) по известным амплитудам ВЧ наведенного напряжения в зазорах резонаторов первой гармоники (таблица 2).

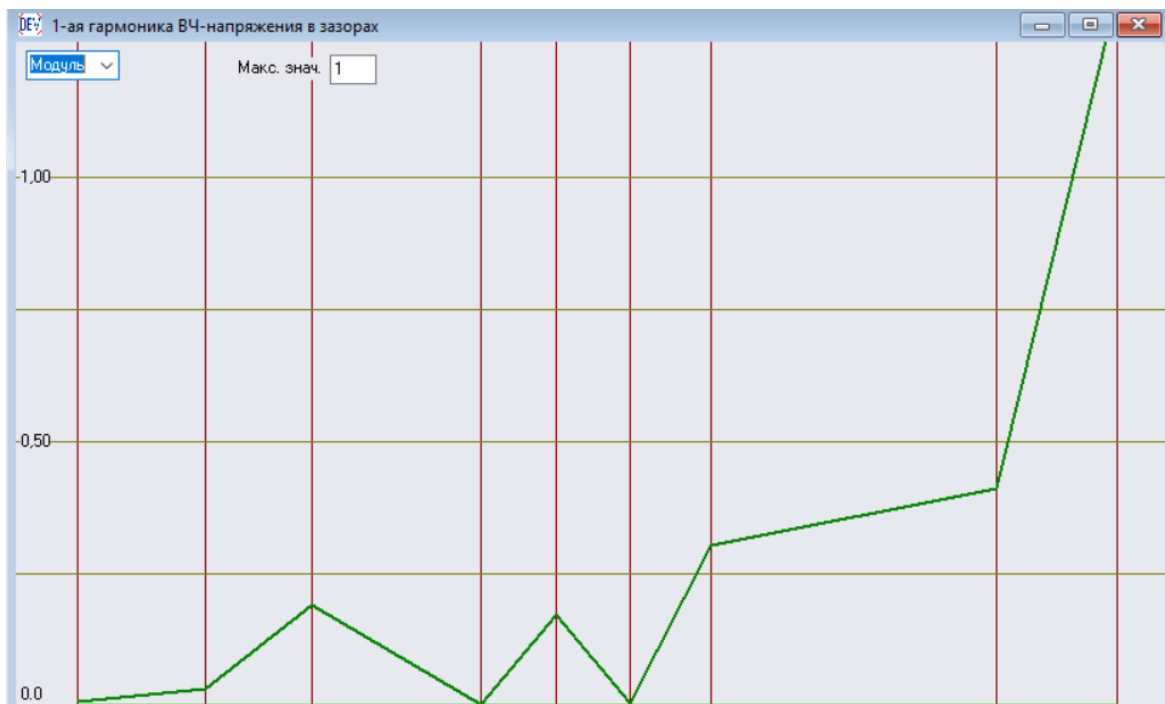


Рис. 6.8. Амплитуды ВЧ наведенных полей первой гармоники в одномерной модели.

Амплитуды высокочастотных наведенных полей первой гармоники, выраженные в напряжении пучка, в одномерной модели при входной мощности 40 Вт и КПД расчёта 72,9% представлены на рисунке 6.8. Графика программы не отображает амплитуды резонаторов второй гармоники.

Таблица 2. Сравнение результатов расчётов в трёхмерной и одномерной программах

Амплитуда ВЧ поля в зазоре резонаторов (U/U_0)	Трёхмерная модель (входная мощность 30 Вт)	Одномерная теория (входная мощность 40 Вт)
5 резонатор	0,14	~0,2
7 резонатор	0,24	~0,3
8 резонатор	0,29	~0,4

Амплитуды напряженности высокочастотных электрических полей измерялись в каналах, расположенных со стороны входной петли, поэтому значения амплитуд меньше, чем было получено при оптимизации в одномерной программе DEV 5.1.

Практически при совпадающих амплитудах наведенных напряжений ключевых резонаторов клистрона наблюдается существенное отличие в выходных характеристиках (КПД 24,3% и 72,9%). Связано это прежде всего с особенностями программных комплексов и теми физическими факторами, которые не учитывают одномерные теории.

Одномерная теория не учитывает волновые процессы в сверхразмерных структурах, в частности, в кольцевых резонаторах (длина кольца может превышать длину волны), а также асимметрию в резонаторах, волноводах индуктивной или ёмкостной связью, никак не учитывает внешнее магнитное поле (Klys 4.5, DEV 5.1, AJ Disk).

В одномерных программах торможение электронных сгустков происходит в одной фазе высокочастотного тормозящего поля выходного резонатора. В одномерной теории расчёт происходит для одного пучка, конечное значение выходной мощности сигнала определяется «домножением» оптимального результата на количество лучей, например, 40-лучевой прибор с силой тока 200 А рассчитывается для одного пучка с силой тока 5 А.

В трёхмерном случае сгусток имеет конечный размер в фазовом пространстве. Часть электронов встречает более сильное возбуждающее поле, часть – более слабое. Торможение электронных сгустков, различающихся качеством группирования и приходящих к выходному резонатору, происходит в различных фазах высокочастотного поля выходного

резонатора. Электроны сгустков не могут взаимодействовать с одной фазой высокочастотного поля. Сгустки всегда будут иметь какой-то пространственный размер, взаимодействовать с различными фазами высокочастотного электрического поля. Любая попытка уменьшения поперечного размера сгустка, например, увеличением внешнего магнитного поля, ведёт к увеличению его продольных размеров из-за пространственного заряда, тем самым увеличивая разброс по фазам взаимодействия с волной и уменьшая эффективность торможения. Таким образом, усиление в каждом канале многолучевого клистрона развивается по-разному, поэтому окончательный результат будет заметно отличаться от результата «домножения» в однолучевой 1D теории.

§ 6.4. Распределение электрического поля во входном резонаторе

Рассмотрим проблему однородности электрического поля во входном резонаторе. Петля ввода входного сигнала, расположенная в индуктивной части резонатора, вносит неоднородность в распределение высокочастотного электрического и магнитного поля. Напряженность электрического поля в тех каналах резонатора, со стороны которых находится входная связь, меньше чем с противоположной стороны, тем самым образуется неравенство амплитуды напряженности электрического поля основной моды (рис. 6.9). Если напряженность поля меньше, то, следовательно, и интеграл от квадрата напряженности, то есть характеристическое (волновое) сопротивление каналов уменьшается, и электроны взаимодействуют с различными амплитудами СВЧ поля резонатора.

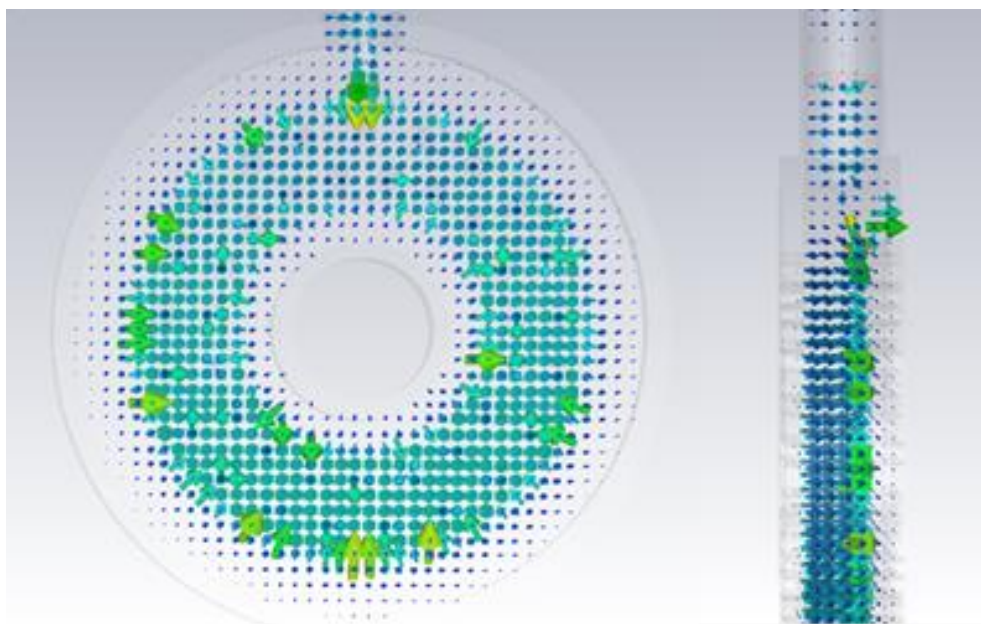


Рис. 6.9. Основной вид колебаний TM_{100} входного резонатора.

Электроны в каналах, расположенных со стороны коаксиального ввода мощности, хуже группируются и испытывают более слабое торможение в выходном резонаторе. В динамическом режиме видно, что электроны, которые пролетают со стороны петли связи, получают меньшую модуляцию по скорости, тем самым снижая качество группирования. Вопросом первостепенной важности стоит выравнивание распределения полей тех видов колебаний резонатора, на которых работает устройство.

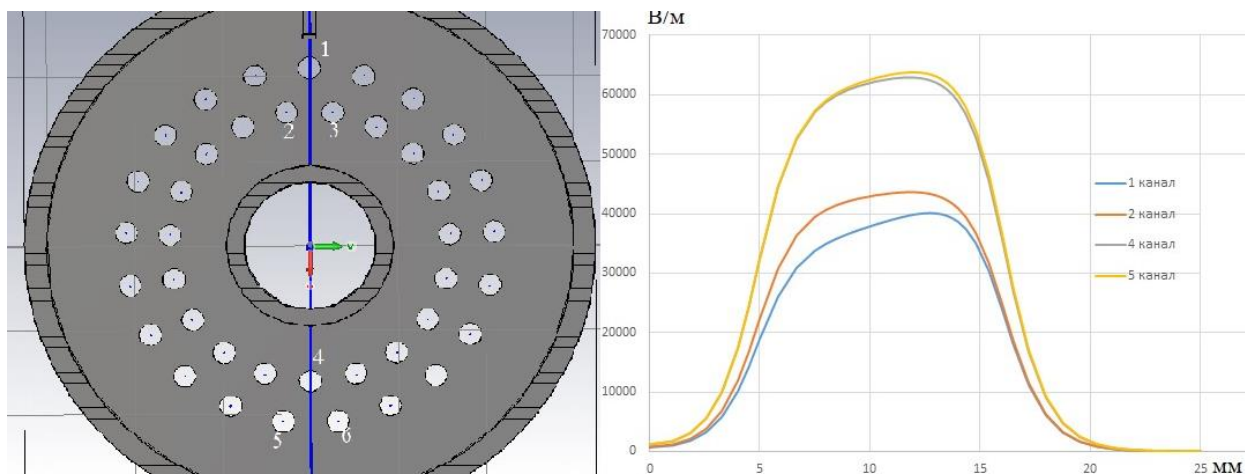


Рис. 6.10. Распределение амплитуды напряженности СВЧ электрического поля (В/м) в каналах входного резонатора.

На графике рисунка 6.10 представлено распределение амплитуды высокочастотного электрического поля основной рабочей моды вдоль оси каналов, изображенных слева на этом же рисунке, резонатора с внесением неоднородности в виде петли связи. Распределение амплитуды во 2 и 3 каналах, а также в 5 и 6 каналах совпадают из-за симметрии кольцевого резонатора, поэтому они не приведены на графике рисунка 6.10.

Заметим, что амплитуда СВЧ поля со стороны петли связи более чем в 1,5 раза ниже амплитуды с противоположной стороны. Характеристическое сопротивление ρ в канале со стороны петли связи равняется 10,5 Ом, а с противоположной стороны 27,3 Ом. Отличие характеристического сопротивления более, чем в 2,5 раза, является одной из причин столь низкого КПД в расчёте. В эксперименте характеристическое сопротивление ρ в каналах выравнивалось «вручную».

Следующим по порядку за рабочей модой TM_{100} во входном резонаторе является высший вид колебаний TM_{110} (рис. 6.11). Он имеет частоту 3,251 ГГц (на 8% больше, чем основной вид), симметричные поля и одинаковое характеристическое сопротивление ρ в точках максимума напряженности поля резонатора приблизительно равное 35 Ом, даже

несмотря на то, что петля связи внесла неоднородность в распределение высокочастотного поля основной моды колебаний резонатора.

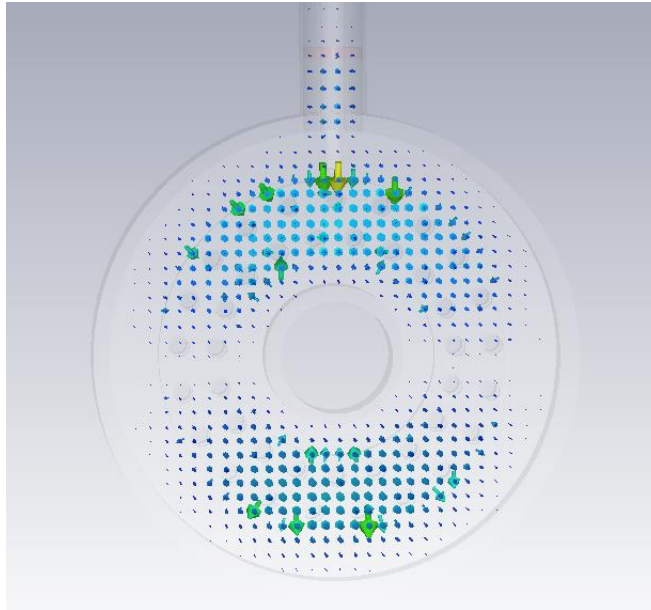


Рис. 6.11. Высший вид колебаний TM_{110} во входном резонаторе.

В кольцевых (сверхразмерных) резонаторах высшие виды колебаний расположены в непосредственной близости к основному типу колебаний, в данном случае частота высшего вида на 8% выше основной моды. В тороидальных резонаторах однолучевых клистронов ближайший высший вид может иметь частоту существенно превышающую частоту основной моды колебаний.

Для получения высокой эффективности необходимо предложить способы по устранению неоднородности полей основной моды. Одним из вариантов этой конструкции может быть уменьшение индуктивной области резонатора с противоположной стороны, что и было сделано в эксперименте, поскольку необходимо уменьшать характеристическое сопротивление $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ для создания одинаковых условий группировки электронов. Также может быть предложен симметричный ввод мощности во входной резонатор [134].

Аналогичные проблемы высших мод колебаний возникают и в промежуточных резонаторах группирователя, и могут сказываться на уровне результирующего КПД клистронов.

§ 6.5. Выходной резонатор и максимально возможный теоретический КПД клистрона

Предположим, что проблема однородности полей во всех каналах группирователя решена, и к выходному резонатору прилетают идентичные сгустки. Рассмотрим идеализированную модель выходного резонатора (рис. 6.12), в которой к выходному зазору прилетают одинаковые дельта – сгустки в одно и то же время с равными скоростями. Заметим, что в эксперименте всегда присутствует асимметрия внешнего магнитного поля, распределения волнового сопротивления в каналах резонаторов, что приводит к получению различных скоростей частиц перед отбором энергии.

Выясним, какой может быть максимально возможный теоретический КПД электродинамической структуры с силой тока 200 А и количеством пучков 40, напряжением пучка 52 кВ, периодом следования сгустков $1/3$ нс (частотой сигнала 3 ГГц) и разработанной несимметричной конфигурацией вывода энергии, которая использовалась в первых экспериментальных БАК – клистронах.

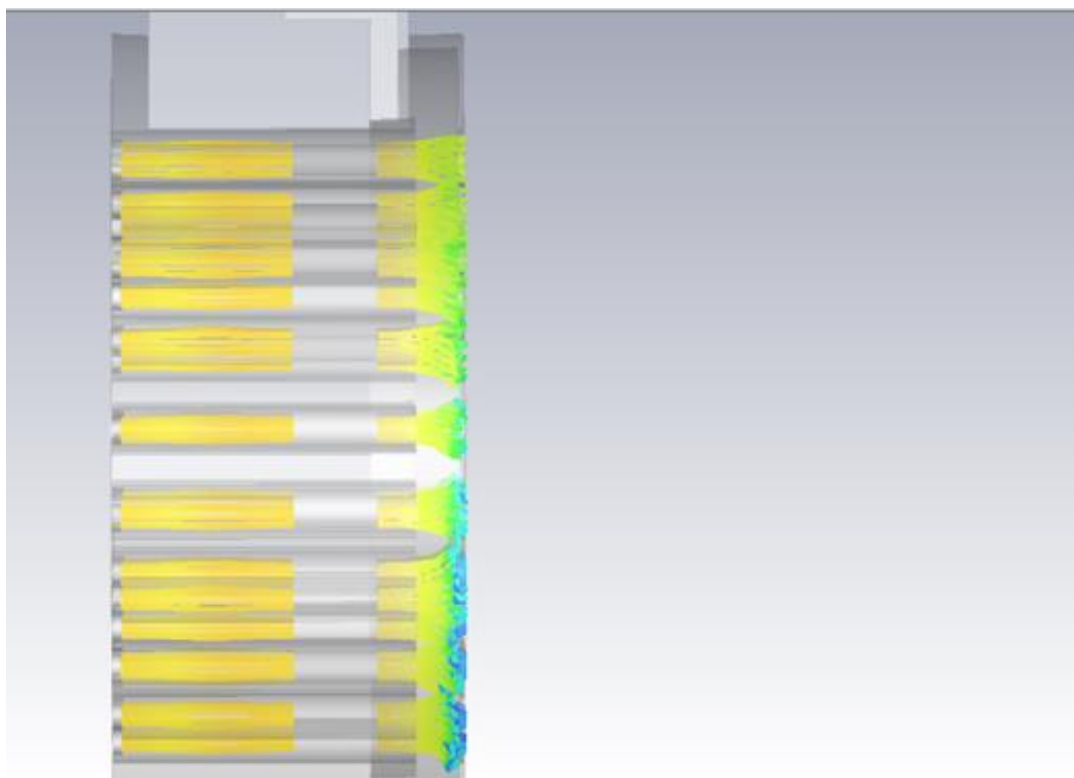


Рис. 6.12. Выходной резонатор клистрона с идеальными сгустками при влёте.

К зазору выходного резонатора прилетали идеальные сгустки с гауссовым профилем тока, эмиттированные в трубе дрейфа перед выходным зазором, в одно и тоже время с одинаковыми скоростями (рис. 6.12). Пролетая зазор, электроны начинают возбуждать

резонатор и когерентно отдавать свою энергию. Если рассматривать только задачу с выходным резонатором и волноводным выводом микроволновой мощности, то время выхода на стационарный режим составляет около 15-20 нс ($\sim 1/f_0 \cdot Q_L$ произведение периода следования сгустков на нагруженную добротность выходного резонатора).

Оптимизация выходной мощности в зависимости от длительности σ гауссова сгустка (нс) при внешнем фокусирующем магнитном поле $B_z = 850$ Гс (это поле использовалось при оптимизации клистрона в параграфе 2 настоящей главы) представлена на графике рисунка 6.13. Максимальная выходная мощность в результате оптимизации находится на уровне 4,8 МВт (КПД 46%). Стационарный режим в выходном волноводе наступает примерно через 15 нс (45 периодов высокочастотного поля) после начала движения электронных пучков.

Если электроны получили симметричное приращение к скоростям по азимуту во входном зазоре, одинаково сгруппировались во всех промежуточных резонаторах и одновременно подлетают к выходному зазору, то КПД клистрона из параграфа 2 этой главы увеличивается с 24,3% до 46%.

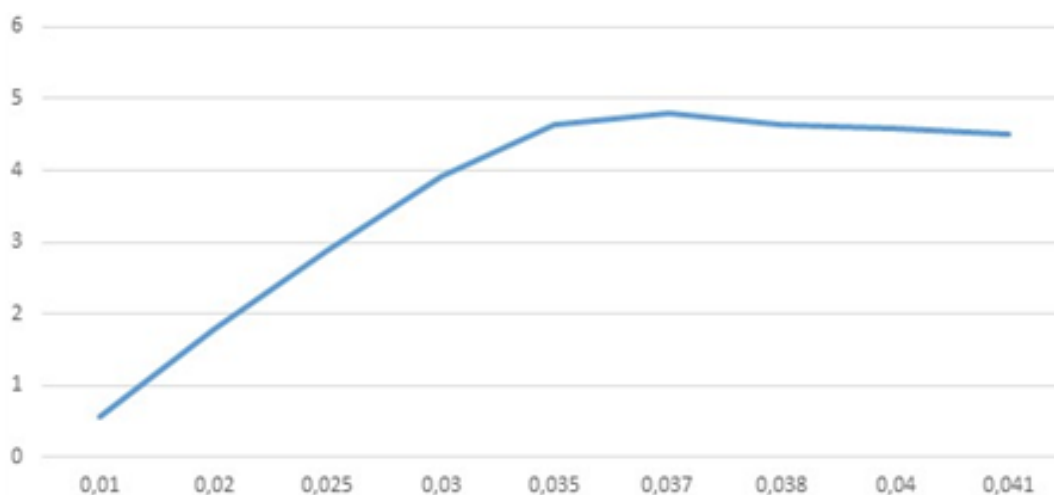


Рис. 6.13. График зависимости выходной мощности (МВт) от σ гауссова пучка (нс).

Поэтому особую важность для получения высокой эффективности представляет выравнивание амплитуды напряженности высокочастотного электрического поля во всех каналах всех резонаторов, как это было сделано на практике. Форма гауссова пучка, при котором наблюдается максимальная эффективность 46% в такой постановке задачи, изображена на рисунке 6.14. Внешнее постоянное магнитное поле составляло 850 Гс, как и в задаче параграфа 2.

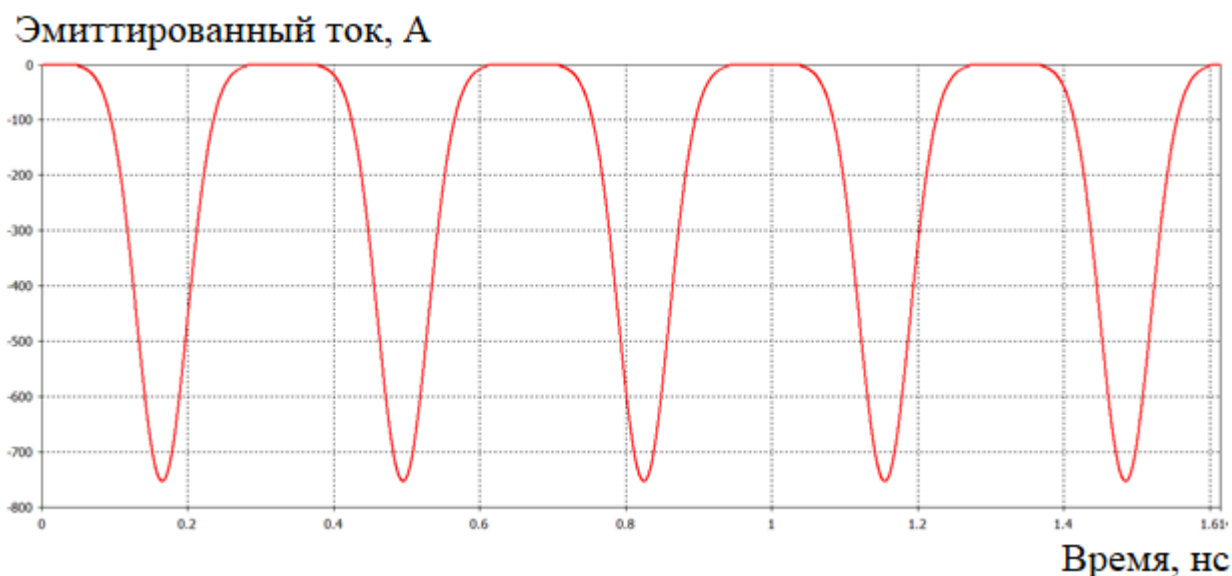


Рис. 6.14. Форма оптимизированных гауссовых пучков (КПД 46%).

На рисунке 6.15 представлена зависимость амплитуды выходного сигнала в волноводе от времени при КПД 46%.

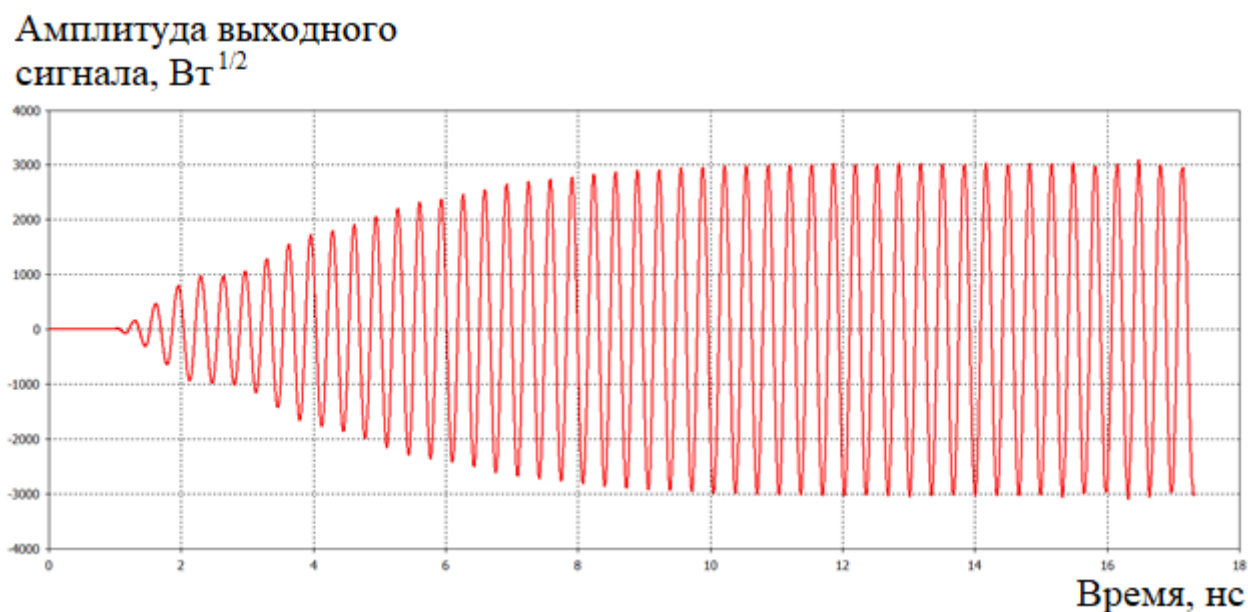


Рис. 6.15. График зависимости выходного сигнала от времени (КПД 46%).

Низкое значение КПД по сравнению с экспериментом связано с неоднородностью амплитуды тормозящего ВЧ поля выходного резонатора. Щель связи выходного резонатора с волноводной системой вносит неравномерность в распределении амплитуд ВЧ полей резонатора. Это заметно по разбросу скоростей электронов, которые прошли тормозящую фазу выходного резонатора (рис. 6.16). Скорости электронов верхних каналов имеют значения порядка $1 \cdot 10^8$ м/с, а нижних пролётных каналов находятся в диапазоне $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$

м/с. Электроны со стороны противоположной волноводному тракту подвергаются воздействию более сильных полей, чем электроны со стороны связи резонатора с волноводом. Следовательно, электроны в нижней части клистрона лучше отдают энергию. Такой неравномерный отбор энергии не позволяет лучшим образом преобразовать энергию электронных пучков в мощность микроволн.

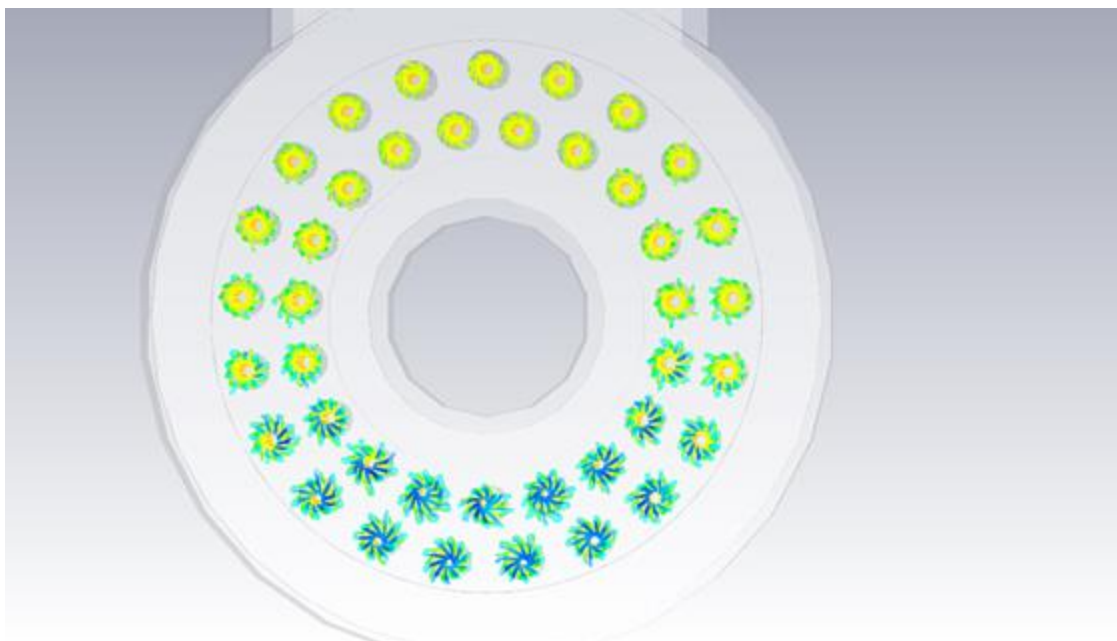


Рис. 6.16. Неравномерность торможения сгустков в задаче с эффективностью 46%.

Если не выравнять поля выходного резонатора, то максимальная эффективность такого идеального (минимальный разброс по скоростям идентичных компактных сгустков перед торможением из-за пространственного заряда) клистрона находится на уровне 48-50% при внешнем магнитном поле 850 Гс.

Существует множество различных вариантов выравнивания электрических полей в выходном резонаторе. Например, равномерность распределения ВЧ поля может быть получена симметричным выводом энергии, выводом мощности с помощью нескольких волноводов, воздействием штырей на поле в волноводе, уменьшением индуктивной области со стороны максимального характеристического сопротивления резонатора и т.д.

Следующим шагом является оптимизация распределения электрических полей основной моды в выходном «холодном» резонаторе, характеристического сопротивления в каналах резонатора, подбора необходимой равновесной частоты и фазы торможения. Количество ячеек тетраэдральной сетки в этих расчётах составляло 450 000. Ориентировочное расчётное время задачи составляет 6 часов. Результаты оптимизации

представлены на рисунках 6.17 и 6.18. Характеристическое сопротивление ρ рабочей моды в каналах резонатора имеет значение $6,6 \div 6,7$ Ом. На рисунке 6.18 представлено распределение амплитуды напряженности высокочастотного электрического поля вдоль оси каналов. Труба дрейфа 1 расположена со стороны щели связи с волноводом (рис. 6.16), а труба дрейфа 2 – с противоположной волноводу стороны.

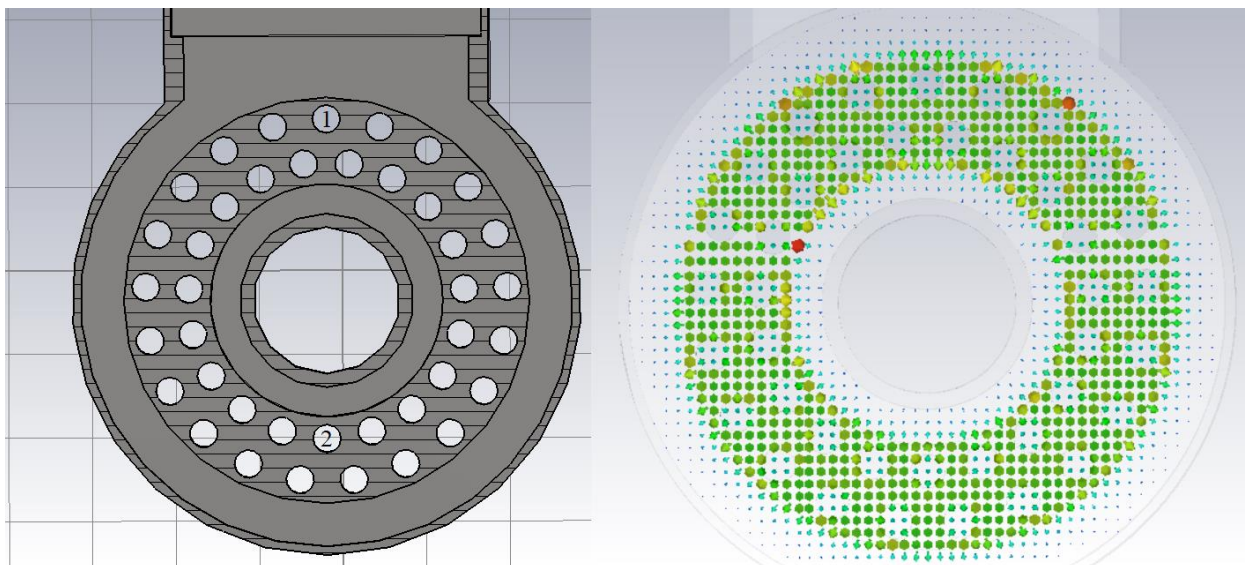


Рис. 6.17. Равномерное высокочастотное электрическое поле основной моды.

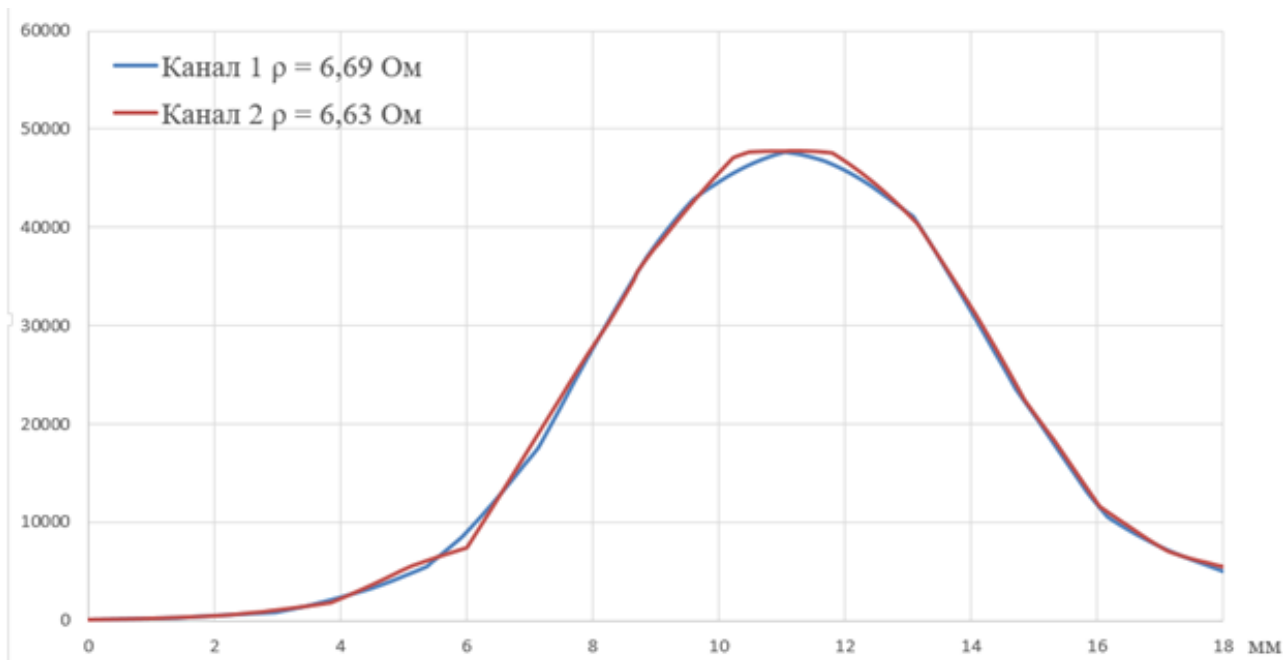


Рис 6.18. Оптимизированное распределение амплитуды напряженности электрического поля вдоль оси каналов.

После устранения неоднородности полей основной моды в «холодных расчётах» к зазору выходного резонатора были запущены электронные сгустки. Количество ячеек сетки разбиения составляло 3,7 млн. штук. Расчётное время 20 наносекунд (60 высокочастотных периодов) такой электродинамической системы составляет примерно 7 часов. Выравнивание полей не привело к существенному увеличению эффективности клистрона. Выходная мощность составила 5,12 МВт, эффективность при этом была КПД 49,23%, повышение эффективности составило только около 3%.

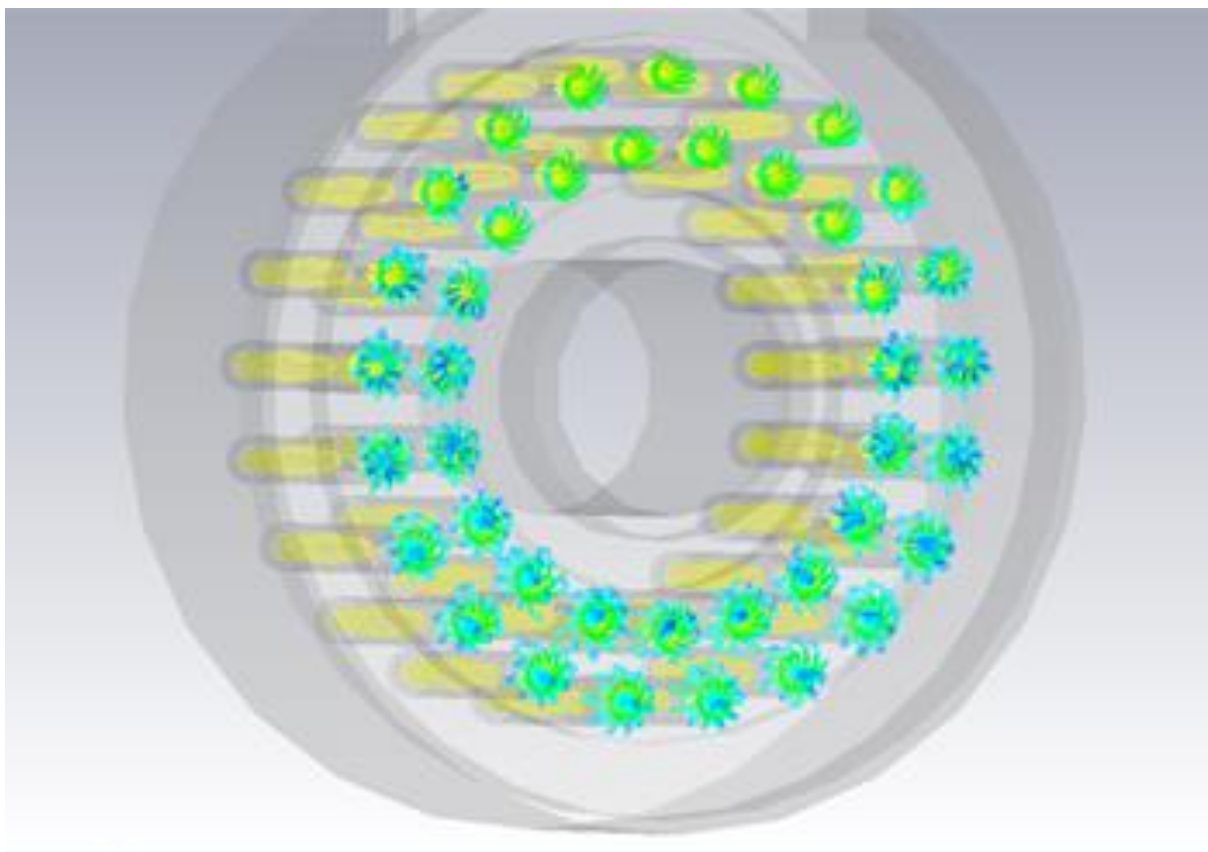


Рис. 6.19. Траектории электронов после прохождения тормозящей фазы (КПД 49,2%).

Выравнивание распределения полей основной моды не устранило неоднородность амплитуд высокочастотных полей в каналах резонатора в динамическом режиме. Электроны в нижней части выходной системы клистрона (рис. 6.19) больше отдают кинетической энергии.

На следующем шаге попробуем воздействовать на волну в волноводе для поиска максимального преобразования энергии сгустков в энергию микроволновых волн нахождением оптимума между распределением амплитуд видов колебаний резонатора, частотами и фазами колебаний.

Амплитуда выходного сигнала, Вт^{1/2}

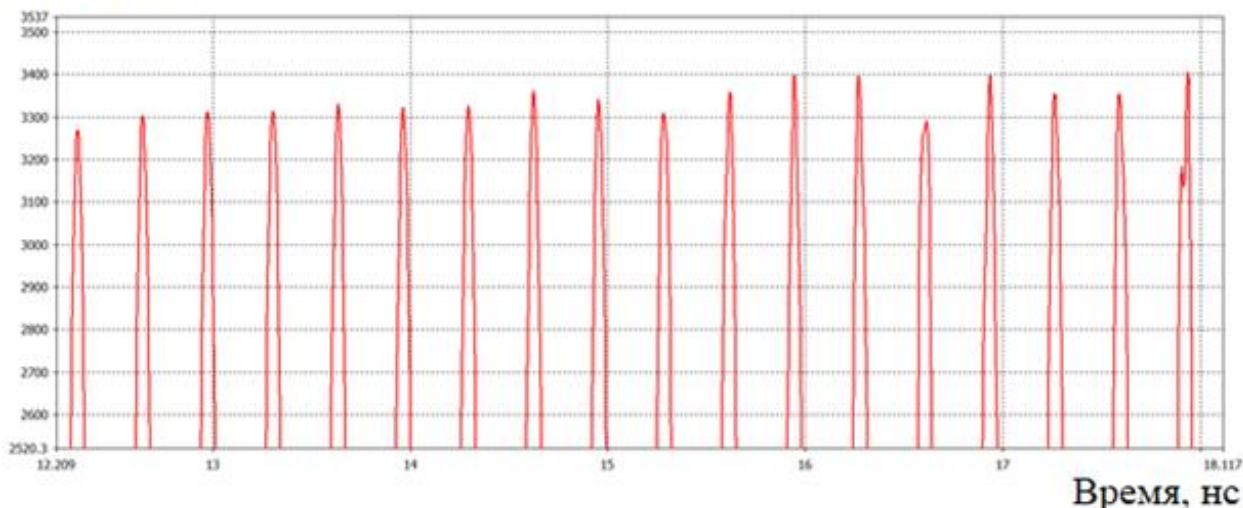


Рис. 6.20. Выходной сигнал в волноводе после оптимизации электродинамики (КПД 53,95%).

В результате такой оптимизации электродинамики (оптимальная равномерность амплитуды полей в резонаторе, частоты и фазы волны) выходного резонатора удалось КПД повысить ещё почти на 5% (неравномерность динамическом режиме не удалось устранить). Выходная мощность составила при этом 5,61 МВт (КПД 53,95%).

На следующем этапе увеличение эффективности будет происходить за счёт электронной оптики. Попробуем увеличить внешнее постоянное магнитное поле с 850 Гс до 1400 Гс, как это было сделано на практике при разработке БАК – клистронов. Увеличение магнитного поля позволяет сжать сгустки (уменьшить временной и пространственный параметры σ гауссова сгустка), получить более компактные сгустки для уменьшения разброса заряда по фазам тормозящего поля.

В результате поиска оптимальной длительности σ сгустка (рис. 6.21) был получен некоторый локальный максимум выходной мощности. Временной параметр σ гауссова пучка составил $1,8 \cdot 10^{-2}$ нс, амплитуда тока пучков превышала 1400 А. Выходная мощность на пике увеличилась с 5,61 МВт до $0,5 \cdot (3641)^2 = 6,63$ МВт (КПД увеличилось до 63,75%, что почти на 10% выше значения на предыдущем шаге поставленной задачи) (рис. 6.22).

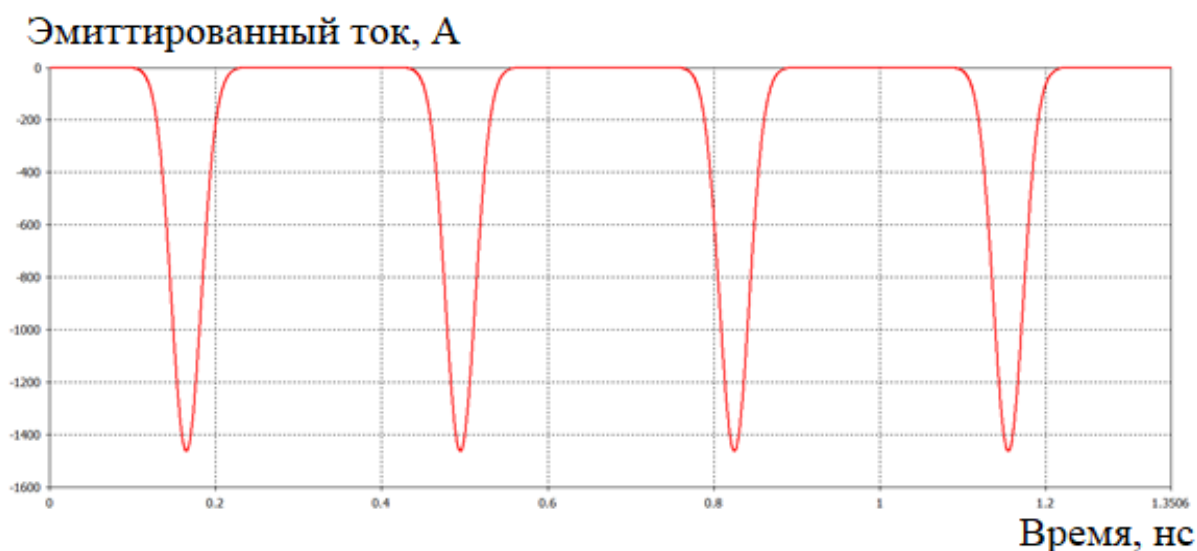


Рис. 6.21. Эмиттируемые сгустки при эффективности 63,75%.

КПД выходной системы разработанного БАК – клистрона в трёхмерном программном комплексе сравнился с эффективностью, полученной во втором экспериментальном образце. Неравномерность электрических полей в зазорах резонатора в динамическом режиме расчёта не была устранена (рис. 6.23).

Попробуем ответить на следующие вопросы по результатам трёхмерного моделирования. Почему существует ограничение эффективности многолучевой конструкции с кольцевыми резонаторами? Почему осталась неравномерность электрических полей в зазорах выходного резонатора, когда в трубах дрейфа находятся одинаковые сгустки?

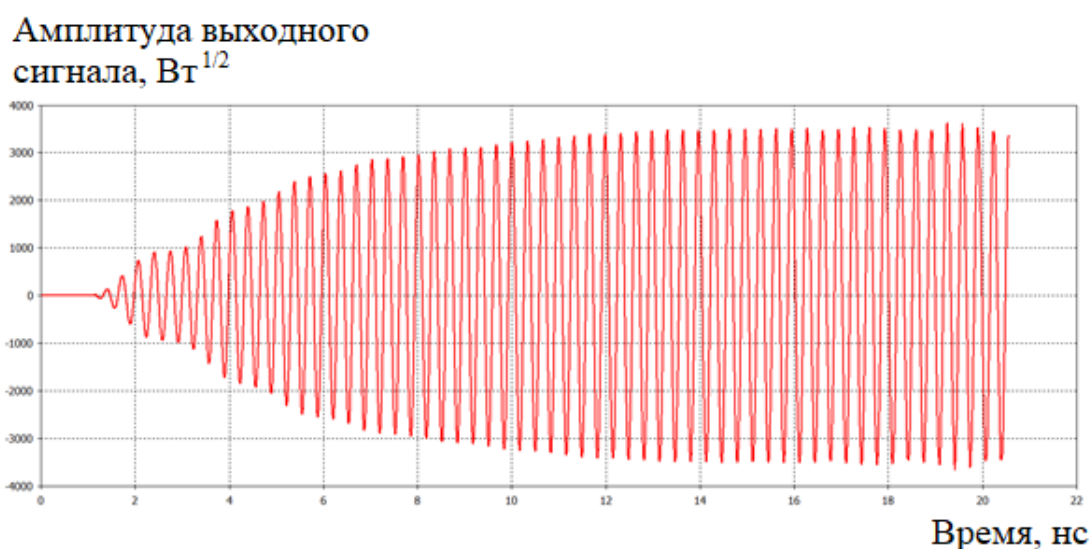


Рис. 6.22. Зависимость выходного сигнала при эффективности 63,75% после оптимизации электронной оптики.

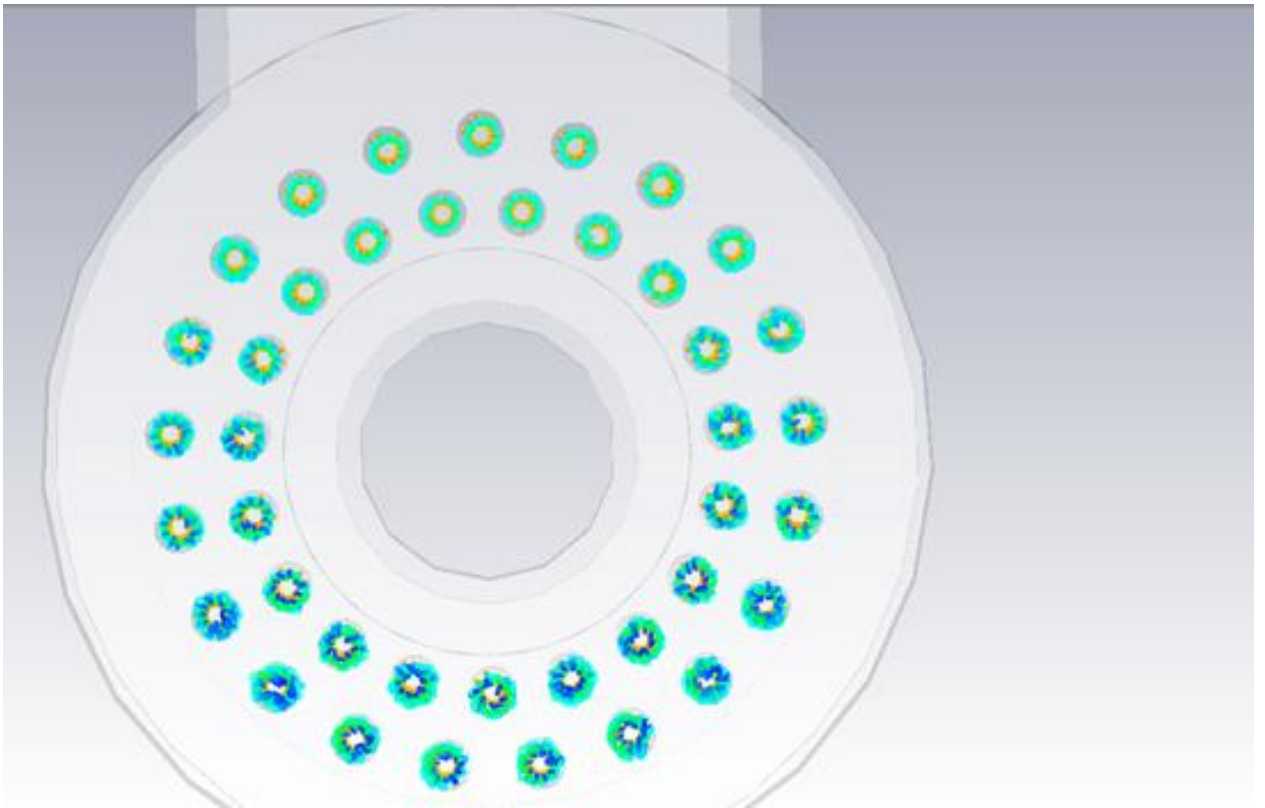


Рис. 6.23. Неравномерное торможение электронов после прохождения зазора при эффективности 63,75%.

Первой из причин неравномерного отбора энергии в разработанной конфигурации является фазовый набег волн, уходящих от электронов, отдавших энергию в нижних пролётных каналах. Учитывая увеличение длины волны в волноведущей структуре, набег фаз составляет величину примерно $1,2\pi$. Волны, образующиеся при торможении электронов верхних каналов, складываются с волнами, сформированными при торможении электронов в нижних пролётных каналах, в результате образуется некоторая стационарная картина с частичным гашением амплитуды поля со стороны щели связи, поскольку разность фаз этих волн больше π .

Второй из причин является наличие высшего вида колебаний TM_{110} , который в динамическом режиме может быть связан с рабочим видом колебаний пучками электронов и, соответственно, может принимать участие в торможении сгустков (рис. 6.24). Это может произойти из-за того, что, во-первых, частота этого вида колебаний расположена на 130 МГц выше (4% по частоте) частоты рабочей моды колебаний. Во-вторых, основная и «паразитная» моды колебаний имеют низкие нагруженные добротности (на практике значения составляют около 80-100). В-третьих, амплитуда напряженности электрического

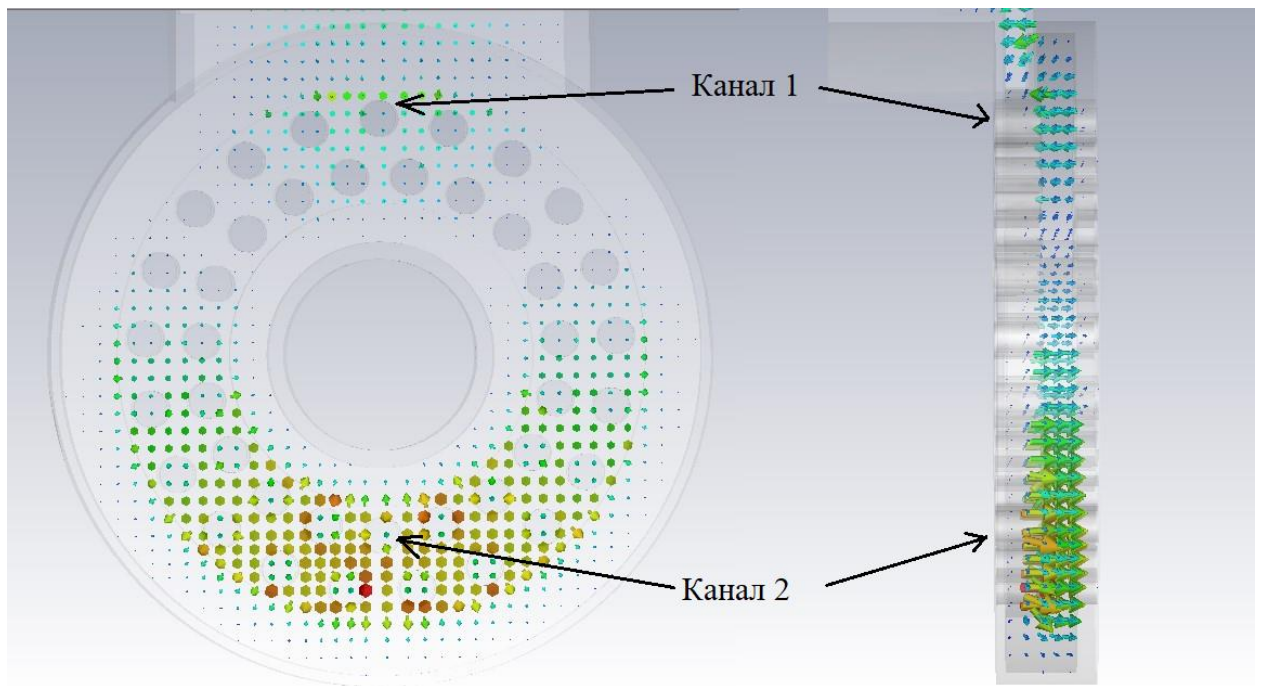


Рис. 6.24. Высшая мода TM_{110} выходного резонатора при оптимизированной основной моде ($f = 3,127$ ГГц).

поля моды TM_{110} примерно в 2 раза выше с той стороны резонатора, с которой наблюдается более эффективное торможение электронов, по сравнению с амплитудами каналов со стороны волновода (рис 6.25). Следовательно, характеристическое сопротивление ρ отличается примерно в 4 раза при равномерном поле основного вида колебаний (2,997 ГГц). Расчёты показывают значения 5,23 Ом и 21,34 Ом. Для сравнения характеристическое сопротивление ρ основного вида TM_{100} равняется 6 Ом равномерно по кольцу резонатора. В-четвертых, частота полученного сигнала (6.22) при эффективности 63,75% имеет близкое к 3,035 ГГц значение. При этом частота следования сгустков равняется 3 ГГц, а частоты рабочей моды и «паразитного» вида колебаний в отсутствии электронного потока составляют 2,997 ГГц и 3,127 ГГц соответственно.

Существует возможность немного сместить по частоте высший вид колебаний в выходной системе многолучевого клистрона относительно частоты рабочей моды уменьшением напряженности высокочастотного электрического поля со стороны максимальных значений поля (уменьшение индуктивной области или изменение конфигурации выходного резонатора с увеличением вакуумной части в зазорах резонатора с противоположной волноводному тракту стороны).

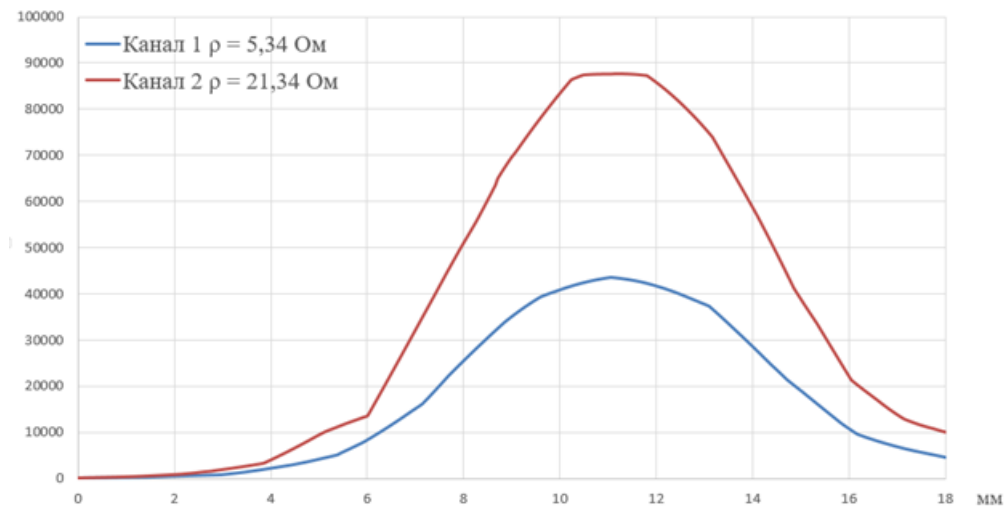


Рис. 6.25. Распределение амплитуды напряженности электрического поля (В/м) высшего типа в выходном резонаторе на оси каналов при оптимизированном электрическом поле основного типа.

Обращаем внимание на важность рассмотрения проблемы волновых процессов, высших типов колебаний в кольцевых резонаторах многолучевых приборов и других сверхразмерных электродинамических структурах, особенно когда есть какая-либо связь с внешними устройствами.

Одним из путей решения проблемы неравномерности полей в выходной системе является формирование симметричного вывода энергии, в случае вывода очень больших мощностей могут применяться несколько волноводов.

Таким образом, выявленные физические факторы (сверхразмерность резонаторов, неравномерность амплитуд поля в различных каналах резонатора, возбуждение высших мод колебаний с высоким волновым сопротивлением), а также наличие пространственного заряда и недостатка внешнего магнитного поля приводят к значительным затруднениям при стремлении повысить КПД мощных многолучевых клистронов до значений 70÷80%. Эти вопросы останутся задачей дальнейших исследований.

§ 6.6. Выводы

1) Впервые проведено трёхмерное моделирование электронных процессов в мощных многолучевых приборах О – типа, вызванное необходимостью детального анализа процессов в мощных многолучевых клистронах с целью нахождения объективных физических причин ограничения КПД.

2) Получен первый опыт постановки задачи, определения времени расчёта, сетки разбиения, количества заряженных частиц в трёхмерных программных пакетах, поскольку до этого исследователи и разработчики использовали только одномерные и двумерные программные комплексы.

3) Результаты проведенного 3D моделирования процессов усиления показали, что в различных каналах они проходят по-разному, распределение СВЧ поля является неравномерным, заметное влияние оказывает несимметричность устройств связи для ввода и вывода энергии, а также высшие моды колебаний в применяемых сверхразмерных резонаторах.

4) Результирующее значение КПД при трёхмерном анализе оказывается существенно ниже экспериментального из-за недостаточной величины внешнего фокусирующего магнитного поля вдоль длины клистрона и неравномерности характеристического сопротивления в различных пролётных каналах входного и выходного резонаторов в использованной методике расчёта.

5) Трёхмерный анализ показал, что основным физическими ограничениями эффективности многолучевого клистрона при стремлении повысить КПД до значений 70÷80% являются сверхразмерная конфигурация резонаторов, приводящая к неравномерным торможениям электронных сгустков в разных пролётных каналах, влияние пространственного заряда и недостаточный уровень внешнего фокусирующего магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проверена в расчётах и впервые в мире подтверждена в экспериментах возможность повышения эффективности многолучевого клистрона за счет применения нового метода группирования (БАК – метода), заключающегося в разгруппировке сгустка электронов с дальнейшим сбором периферийных электронов резонаторами как первой, так и второй гармоники.

2. Проведенное сравнение БАК – метода группировки электронов с двумя колебаниями ядра и СОМ – метода группировки в клистронах с одинаковой эффективностью (80%), работающих на одной и той же частоте при одном и том же питающем напряжении, показывает возможность значительного уменьшения длины группирователя, что позволяет использовать предлагаемый способ на практике без увеличения массы и габаритов клистрона.

3. Проведенные в процессе выполнения диссертационной работы численные расчеты группирователя клистрона, высокочастотных полей в резонаторах электродинамической системы, электронной оптики многолучевого потока, профиля магнитного поля в каналах резонаторов, высокочастотного поля в выходном резонаторе, токопрохождения до коллектора и распределения тепловой нагрузки в коллекторе с применением современных пакетов программ позволили определить параметры конструкции первых многолучевых БАК – клистронов.

4. Результаты проведенных «холодных испытаний» первых вариантов многолучевых БАК-клистронов соответствуют проведенным расчетам. Завершающая (после сборки клистрона) настройка частот резонаторов и выравнивание характеристического сопротивления в каналах резонаторов дали возможность осуществить компенсацию технологических «уходов» конструкции и реализацию заданных выходных параметров клистрона.

5. Динамические испытания первых спроектированных БАК-клистронов, проведенные в ОИЯИ (Дубна) и в ЦЕРН (Женева), показали впервые усиление СВЧ с выходной мощностью 7 МВт и эффективностью 64%. Результаты испытаний доказывают, что новая БАК-технология группировки может значительно повысить КПД клистронных усилителей на относительно небольшой длине пространства взаимодействия.

6. Результаты практических испытаний доказывают, что КПД новых клистронов, в которых представлены БАК – резонаторы, может быть выше на 20% по сравнению с

прототипами, в которых используется традиционная группировка электронного потока, при сохранении катодного узла, магнитной фокусирующей системы, коллектора и выходного окна.

7. Показано, что эффективность новых клистронов выше на 15-20%, энергопотребление меньше в 1,5 раза, рабочее напряжение ниже в 2,5 раза, в 2 раза меньше масса и габариты, ниже уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора по сравнению с зарубежными аналогами. Внедрение результатов работы позволит создать новое поколение клистронов, превосходящих мировые аналоги.

8. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью от 10 до 40 МВт находится на уровне 67 ÷ 70%. Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции. Конструкция клистронов с уровнем выходной мощности 30-40 МВт будет существенно отличаться. Обоснованность расчётов подтверждена результатами испытаний клистронов.

9. Проведенные теоретические исследования с применением нескольких БАК – колебаний показывают, что КПД существующих однолучевых клистронов в ускорительной технике может быть выше 80% за счёт БАК – технологии группировки электронов при сохранении габаритов клистронных усилителей.

10. Трёхмерный анализ показал, что основными физическими ограничениями эффективности многолучевого клистрона являются интерференция волн в сверхразмерных кольцевых выходных резонаторах, воздействие высших мод колебаний, влияние пространственного заряда и недостаточный уровень внешнего фокусирующего магнитного поля.

В заключение хочу выразить искреннюю благодарность научному руководителю Саввину Владимиру Леонидовичу за помощь и содействие, мудрые наставления в подготовке кандидатской диссертации, благодарность исполняющему обязанности заведующего кафедрой Королёву Анатолию Федоровичу за поддержку, ценные советы и организацию необходимых мероприятий, благодарность коллективу инженеров, конструкторов и технологов организации «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» за помощь в создании уникальных приборов, Масленникову Олегу Юрьевичу за организацию производства и умелое управление коллективом, а особую благодарность начальнику лаборатории Гузилову Игорю Анатольевичу за постановку задач, постоянное внимание, поддержку в работе, обсуждение результатов и сделанные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.Yu. Baikov, D.M. Petrov. «Problems of creation powerful and super-power klystrons with efficiency up to 90%» // *Proc. of International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-high Frequencies"*, May 24-28, 1999. - St. Petersburg, 1999. - P. 5-8.
- [2] Baikov, A. Yu., Grushina, O. A., and Strikhanov, M. N., “Simulations of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons”, *Technical Physics*, 59(3), pp. 421-427, 2014.
- [3] I.A.Guzilov, O.Y.Maslennikov, A.V.Konnov. A way to increase the efficiency of klystrons // *2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Paris, France, 21-23 May, 2013.
- [4] I.A.Guzilov. L and S-band high-efficiency multi beam klystron development. BAC – method of increasing efficiency. *CLIC workshop*, Geneva, CERN, 3-7 February, 2014.
- [5] Guzilov I.A. BAC method of increasing the efficiency in klystrons // *2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*, p. 1-2, St. Petersburg, Russia, 30 June – 4 July, 2014.
- [6] P. B. Wilson, «RF power sources for 5-15 TeV linear colliders», in *Int. Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders*, Shonan Village, Japan, April 1996.
- [7] Zhao-chuan Zhang, et al., “Development of an S-band, 200 MHz Instantaneous Bandwidth, 22 kW Average Power Klystron,” *Proceedings of 2010 IEEE IVEC*, pp.437-438, May, 2010.
- [8] Zhou Suiming, et al. “A High-Power and Broadband Multi-Beam Klystron,” *Vacuum Electronics (Chinese)*, No.1, pp.38~39. 2008.
- [9] Фомичев К., Юдин Л. Электромагнитное оружие (перспективы применения в информационной борьбе). – *Электроника: НТБ*, 1999, вып.6, с.40-45.
- [10] Афонская М.И., Габышев В.Г., Дунаев А.С. и др. Клистронный усилитель 10-см диапазона мощностью 20 МВт в импульсе. Труды конференции по электронике СВЧ. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1959.
- [11] G. S. Nusinovich, B. Levush, and D. K. Abe, “A review of the development of multiple-beam klystrons and TWTs,” *Naval Res. Lab.*, Washington, DC, U.S. Naval Res. Lab. Tech. Memo NRL/TR/6840-03-8673, 2003.
- [12] Пат. 992853 Франция. Многолучевой прибор. Оpubл. 1944.
- [13] The multiple-beam klystron / M.R. Boyd, R.A. Dehn, J.S. Hickey, T.G. Mihran // *IRE Trans.*-1962. Vol.ED-9, No 3. P.247.

- [14] Патент СССР №1817609. Электронная пушка для приборов О – типа./ Борисов Л.М., Жарый Е.В., Тараканов А.П., 1990.
- [15] Борисов Л.М., Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д. и др. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ // Эл. Техника, сер. СВЧ-техника, 1993, N3, с. 12-20.
- [16] Гельвич Э.А., Лопин М.И. СВЧ-усилители средней и большой мощности нового поколения / Радиотехника, №4, 1999г, с. 18-31.
- [17] Э.А. Гальвич, Е.В. Жарый, А.Д. Закурдаев, В.И. Пугнин. «Многолучевые клистроны. Тенденции развития.» Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров, с. 160, 2014.
- [18] Korolyov A.N., Gelvich E.A., Zhary Y.V., et. al., «Multiple-Beam Klystron Amplifiers: Performance Parameters and Development Trends», *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 32, № 3, pp. 1109–1118, June 2004.
- [19] C.Bearzatto, A.Beunas, G.Faillon, “Long pulse and large bandwidth multi beam klystron”, High Energy Density Microwaves, R.M. Phillips, AIP, NY, Pajaro Dunes California U.S.A Oct, 1998.
- [20] Victor Poognin, “High-Power Broadband Pulse Multiple-Beam Klystron with Output Power from 100 kW up to 1000 kW with a Bandwidth up to 12%,” *Proceedings of UHF-99, International University Conference*, “Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies,” pp.75-78, May, 1999, St. Petersburg, Russia.
- [21] Ding Yaogen, A.N. Sandalov, et al. “Theoretical and experimental investigation of high power MBK, based on 2.5D Arsenal-MSU computer code,” *2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings*, Beijing China, pp. 299-302, Sep 2000.
- [22] A. Larionov, V. Teryaev, S. Matsumoto, Y.H.Chin. «Design of multi-beam klystron in X-band», *Proceeding of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan*, 2002 IEDM, 1986A.
- [23] L. Song, *et al.*, «Development of a 50 MW Multi-beam Klystron at 11.424 GHz», in PAC 2003, Portland. OR, May 12-16, 2003.
- [24] K. T. Nguyen, D. E. Pershing, D. K. Abe, B. Levush, F. N. Wood, J. P. Calame, J. A. Pasour, J. J. Petillo, M. Cusick, M. J. Cattelino, and E. L. Wright, “Electron gun design for fundamental mode S-band multiple-beam amplifiers,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 1212–1222, June. 2004.
- [25] K. T. Nguyen, D. K. Abe, D. E. Pershing, et. al., “High-power four-cavity S-band multiple-beam klystron design,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 1119–1135, Jun. 2004.

- [26] D. K. Abe, D. E. Pershing, K. T. Nguyen, et. al., «Demonstration of an S-band, 600-kW Fundamental-Mode Multiple-Beam Klystron», *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 26, №8, August 2005.
- [27] Wang Y. et al., “Research on High Peak Power Multi-Beam Klystron,” *High Power Laser and Particle Beams (Chinese)*, Vol. 17, No. 8, pp.1133-1136, 2005.
- [28] David K. Abe, Joe X. Qiu, Baruch Levush, et al., “Experimental Demonstration of MBK2, an Eight-Beam, Five-cavity Multiple-Beam Klystron,” 2008 International Vacuum Electronics Conference (IVEC2008), Monterey, California, USA, pp. 423-424, April 2008.
- [29] S. Matsumoto, et al., “Development of PPM-focused X-band Pulse Klystron” in Proc. Of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (SAST 01), Osaka, Japan, 2001.
- [30] И.А. Фрейдович, А.К. Балабанов, П.И. Акимов, и др., «Перспективы развития многолучевых клистронов», *Электроника и микроэлектроника СВЧ*, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, 2-5 июня 2014.
- [31] Yaogen Ding et al., “S-Band Multi-Beam Klystron with Bandwidth of 10%,” *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. 52, No. 5, pp. 889-894, 2005.
- [32] Yaogen Ding et al., “Research progress on C-band Broadband Multi-Beam Klystron,” *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. 54, No. 4, pp. 624-631, 2007. [] Zhou Suiming, “High-Order-Mode Multi-Beam Klystron,” *Vacuum Electronics (Chinese)*, No. 4, pp.7-9, 2008.
- [33] Yaogen Ding et al., “Research progress on X-band Multi-Beam Klystron”, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. 56, No. 5, 2009.
- [34] Yaogen Ding, et al., “Research Progress on S-band Broadband Multi-Beam Klystron,” *Proceedings of 2009 IEEE IVEC*, pp.537-538, April, 2009.
- [35] Y. Ding, P. Liu, Z. Zhan, et. al. Research and Development of Multi-Beam Klystrons in China. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Rome, Italy, 2009.
- [36] Yaogen Ding et al., “C-band broadband Multi-Beam Klystron with bandwidth of 8%”, *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2010)*, Monterey, CA, USA, May 18-20, 2010
- [37] Y. Ding, et. al., «The education, Research and Development of Microwave Electronics and Microwave Tubes in China», *Eighth International Vacuum Electronics Conference (IVEC2007)*, Kitakyushu, Japan, pp.21-24, May 2007.
- [38] D.K. Abe, B. Cantrell, K.T. Nguyen, et. al. Multiple-Beam Klystron Development at the Naval Research Laboratory. *IEEE Radar Conference*, Pasadena, CA, USA, 3-8 May, 2009.

- [39] G. Caryotakis, A. Krasnykh, M. Neubauer, R. Phillips, G. Scheitrum, D. Sprehn, R. Steele, A. Jensenf, D. Smithe. Design of a 11.4GHz, 150-MW sheet beam, PPM-focused klystron. // *AIP Conference*, High energy density and high power RF by Institute of Physics, vol. 691, 2003, pp. 22–33.
- [40] G. Scheitrum, G. Caryotakis, A. Burke, A. Jensen, E. Jongewaard, M. Neubauer, R. Phillips, R. Steele. W-band sheet beam klystron research at SLAC. // *Vacuum Electronics Conference*, 2006 held Jointly with 2006 *IEEE International Vacuum Electron Sources*, CA&USA, Apr. 2006, PP. 481–482.
- [41] K. Nguyen, J. Pasour, E. Wright, J. Petillo. High-perveance W-band sheet-beam electron gun design. // *Plasma Science, IEEE 35th International Conference*, Karlsruhe, PP. 1, 2008.
- [42] A. Srivastava, J. So, G. Park, R. Raju, Y. Wang, J. Wang. Development of High Current Density Sheet Beam Electron Gun for Terahertz Devices. // *Vacuum Electronics Conference, IEEE International*, Apr. 2008, CA, PP.183-184;
- [43] K. Nguyen, J. Pasour, T. Antonsen, et. al., «Intense Sheet Electron Beam Transport in a Uniform Solenoidal Magnetic Field». // *Electron Devices, IEEE Transactions*, Vol. 56, No. 5, May 2009, PP. 744-752.
- [44] J. Pasour, K. Nguyen, T. Antonsen, P. Larsen, B. Levush. Solenoidal transport of low-voltage sheet beams for millimeter wave amplifiers. // *Vacuum Electronics Conference, IVEC '09, IEEE International*, Rome, 2009, PP. 300-301;
- [45] Z. Duan, X. Guo, F. Guo, Y. Gong, Y. Wei, L. Yue, H. Gong, W. Wang. Simulation research on the sheet electron beam gun. // *Vacuum Electronics Conference, IEEE International*, Apr. 2009, Rome, PP. 403-404.
- [46] J. Pasour, E. Wright, K. Nguyen, A. Balkcum, F. Wood, J. Atkinson, M. Cusick, B. Levush. 3.4: Sheet beam stick for low-voltage W-band extended interaction klystron (EIK). // *Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2010 IEEE International, CA, May 2010, PP. 43-44;
- [47] J. Pasour, K. Nguyen, E. Wright, and B. Levush. 3.5: Sheet beam EIK sensitivity to multimoding and circuit imperfections. // *Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2010 IEEE International, CA, May 2010, PP. 45–46.
- [48] D. Gamzina, A. Spear, L. Barnett, N. Luhmann. THz sheet beam gun analyzer. // *Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, IEEE International, CA, 2010, PP. 99–100.

- [49] J. Pasour, K. Nguyen, E. Wright, A. Balkcum, J. Atkinson, M. Cusick, B. Levush. Demonstration of a 100-kW solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers. // *Electron Devices, IEEE Transactions*, Vol. 58, No. 6, June 2011, PP. 1792-1797.
- [50] Y. Han, C.-J. Ruan. Investigation of the diocotron instability of an infinitely wide sheet electron beam by using the macroscopic cold-fluid model theory. // *Chinese Physics B*, 2011, Vol. 20, No. 10, PP. 104101-1–104101-7;
- [51] J. Pasour, E. Wright, K. Nguyen, A. Balkcum, B. Levush. Sheet beam extended interaction klystron (EIK) in W band. // *IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Paris, France, May 2013, PP. 1–2;
- [52] P. Panda, V. Srivastava, A. Vohra, Analysis of Sheet Electron Beam Transport Under Uniform Magnetic Field. // *Plasma Science, IEEE Transactions*, Vol. 41, No. 3, March 2013, PP. 461 – 469;
- [53] J. Pasour, K. Nguyen, A. Balkcum, F. Wood, R. Myers, B. Levush. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz. // *Electron Devices, IEEE Transactions*, Vol. 61, No. 6, June 2014, PP. 1630-1636.
- [54] Cunjun Ruan, Shuzhong Wang, Ying Han, Qingsheng Li, and Xiudong Yang. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field. // *Electron Devices, IEEE Transactions*, Vol. 61, No. 6, June 2014, PP. 1643-1650.
- [55] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Ву К.Т.Ч., Егоров Р.В., Шуваев И.И. «Распространение высокоперевансных ленточных электронных потоков с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях», Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, том 2, с.242-246, 2016.
- [56] Михеев Д.А. Динамика поперечных волн электронного потока в неоднородных электрических и магнитных полях: диссертация кандидата физико-математических наук. Московский государственный университет, Москва, 2016.
- [57] Борисов Л.М. Щелкунов Г.П. Возможные микроперевансы электронных потоков кольцевого сечения в пролетной трубе. – *Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ*, 1992, вып.5.
- [58] Чашурина А.Н. Процессы группирования электронов в мощных клистронных усилителях. Дипломная работа, Физический факультет МГУ, 2003 г.

- [59] Сандалов А.Н. Нелинейные явления при усилении электромагнитных волн интенсивными электронными потоками в многолучевых микроволновых усилителях: автореферат диссертации доктора физико-математических наук. Московский государственный университет, Москва, 2006.
- [60] M. Aicheler *et al.*, “A multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC conceptual design report”, CERN, Geneva, Switzerland, Rep. CERN-2012-007, Oct. 2012.
- [61] M. J. Boland *et al.*, “Updated baseline for a staged Compact Linear Collider”, CERN, Geneva, Switzerland, Rep. CERN-2016-004, Aug. 2016.
- [62] I. Syratchev. L-band klystrons for CLIC. CLIC Workshop, 03-07 February, CERN, 2014.
- [63] V.Vogel, S. Choroba, T. Froelich, et. al., «Testing of 10 MW Multibeam Klystrons for The European X-Ray FEL at Desy», *Proceedings of PAC07*, pp 2077-2079, Albuquerque, New Mexico, USA, June 2007.
- [64] A.Beunas, G.Faillon, “10 MW/1.5ms, L band multi beam klystron”, Proc. Conf. Displays and Vacuum Electronics, Garmisch-Partenkirchen, Germany, April 29-30, 1998.
- [65] A. Yano, et al., «The TOSHIBA E3736 Multi-beam Klystron», *Proceedings of LINAC04*, Germany, 2004.
- [66] Yong Ho Chin, et al., “Development of 10MW L-band MBK for European X-FEL Project,” *2007 International Vacuum Electronics Conference (IVEC2007)*, Kitakyushu, Japan, pp. 185-186, May 2007.
- [67] A. Beunas, G. Faillon, THOMSON TTE, France, S. Choroba, A. Gamp, DESY, Germany A High Efficiency Long Pulse Multi Beam Klystron For The Tesla Linear Collider, Submitted to PAC 2001.
- [68] V.Vogel, L. Butkowski, A. Cherepenko, et. al., «Results of Testing of Multi-Beam Klystrons for The European XFEL», *Proceedings of LINAC2012*, Tel-Aviv, Israel, 2012.
- [69] E. Wright, *et. al.*, «Development of a 10 MW, L – band multiple-beam klystron for TESLA», in *PAC 2003*, Portland, OR, May 12-16, 2003.
- [70] A.Balkcum, et al., “Continued Operation of a 1.3GHz Multiple Beam Klystron for TESLA,” *Sixth International Vacuum Electronics Conference IVEC2007*, Noordwijk, the Netherlands, pp. 505-508, April 2005.
- [71] А.с. 72756 СССР, кл. 21. Электронная лампа клистронного типа / В.Ф. Коваленко. 1940.
- [72] Пат. 15556 СССР. Многорезонаторный клистрон / С.А.Зусмановский. 1955.

- [73] Лебедев И.В. // Техника и приборы СВЧ, т. 2, Москва, «Высшая школа», 1972, т.2, с. 129-172.
- [74] Хайков А.З. Клистронные усилители.-М.: Связь, 1974.-397 с.
- [75] Кучугурный В.И., Лебединский С.В., Малыхин А.В., Петров Д.М. // КПД и полоса усиления клистрона.- В кн.: Лекции по электронике СВЧ и радиофизике.Кн.1.- Саратов:СГУ, 1983,- С. 211.
- [76] Голубев С.Н., Лошакова И.И., Царев В.А.Многорезонаторный пролетный усилительный клистрон//Учеб. пособие для вузов.- Саратов, СПИ, 1984.
- [77] Кацман Ю.А. Приборы СВЧ. Теория, основы расчёта и проектирования электронных приборов, Москва, «Высшая школа», 1983.
- [78] Кацман Ю.А. Вопросы теории многорезонаторных клистронов // Связьиздат, 1958.
- [79] Канавец В.И. и др. Мощные многорезонаторные клистроны с высоким КПД / Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 1976 г., С. 34-44.
- [80] A.V. Malykhin, E. P. Yakushkin, A.V. Konnov "Validation of klystrons development code - KLYS 4.5". Proceedings of IV International Vacuum Electronics Conference IVEC2003, Seoul, Korea, 2003.
- [81] Байков А. Ю. Методы достижения предельных значений КПД в мощных вакуумных резонансных СВЧ приборах О – типа: автореферат диссертации доктора физико-математических наук. Московский физико-технический институт, Москва, 2017.
- [82] Baikov, A. Yu., Marrelli, C., and Syratcev, I., "Toward high-power klystrons with RF power conversion efficiencies on the order of 90%", IEEE. Trans. Elec. Dev., 62(10), pp. 3406-3412, 2015.
- [83] А.Ю. Байков, Х.Х. Ильясов, Д.М. Петров. «KLYP – новая быстродействующая программа расчёта клистрона». // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Саратов: СГТУ, 1994, С. 7-8.
- [84] G. Caryotakis. High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. Part I. Stanford Linear Accelerator Center, Menlo Park, CA, SLAC-PUB, August 2004.
- [85] V. Hill, C. Marrelli, D. Constable, C. Lingwood. Particle-in-Cell Simulation of the Third Harmonic Cavity F-Tube Klystron. 17th International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, USA, April 19-21, 2016.

- [86] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Егоров Р. В., Ву К.Т.Ч. Динамика ленточного электронного потока в циклотронном преобразователе энергии. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), № 4, 2018.
- [87] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Егоров Р. В., Ву К.Т.Ч. О возможности создания клистронов с 3D группировкой электронного потока. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), № 4, 2018.
- [88] A. Sandalov, V. Pikunov, V. Rodyakin «High efficiency conventional and relativistic klystrons», in *Int. Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders*, Shonan Village, Japan, April 1996.
- [89] A.N. Sandalov, et. al. “Animation of Nonlinear Electron-wave interaction in klystrons,” *RF’96*, 1996.
- [90] Родякин В.Е., Сандалов А.Н. Комплекс программ анализа динамики электронных потоков в клистроне // Вопросы электронной техники: Межвуз. научный сборник .Сарат.политехн.ин-т, 1988.-С. 26-33.
- [91] Борисов Л.М., Захарова А.Н. Программа расчёта и оптимизации многолучевых усилительных клистронов с многоззорными резонаторами. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1999, вып.2.
- [92] J. J. Petillo, K. Eppley, D. Panagos, P. Blanchard, E. Nelson, N. Dionne, J. DeFord, B. Held, L. Chernyakova, R. True, K. T. Nguyen, and B. Levush, “The MICHELLE three-dimensional electron gun and collector modeling tool: theory and design,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 1238–1264, Jun. 2002.
- [93] X. Xinghua, «2.5D computer simulation for high power klystron», master thesis, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Dec. 1999.
- [94] V.E. Rodyakin, A.N. Sandalov, «Arsenal-MSU computer code user manual», 1997.
- [95] D. A. Constable *et al.*, “High efficiency klystron development for particle accelerators”, in *Proc. EE-FACT’16*, Daresbury, UK, October 2016.
- [96] D. A. Constable *et al.*, “2-D Particle-in-Cell Simulations of High Efficiency Klystrons”, in *Proc. 2016 Int. Vacuum Electronics Conference. (IVEC ‘16)*, Monterey, USA, April 2016.
- [97] A. N. Vlasov, T. M. Antonsen Jr., B. Levush, D. P. Chernin, and E. L. Wright, “Simulation of microwave devices with external cavities using MAGY,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 1277–1291, Jun. 2003.
- [98] A. J. Jensen *et al.*, “Developing sheet beam klystron simulation capability in AJDISK”, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, vol. 61(6), pp. 1666-1671, Jan. 2014.
- [99] E. Jensen, “Developments towards higher efficiency of RF systems”, *FCC Week 2016*, Rome, Italy, April 2016.

- [100] Konnov A.V. and Malykhin A.V.// Frequency-domain code Dev. 5.0 for analysis of coupled cavity traveling wave tubes, klystrons and their hybrids, IVEC 2005, Noordwijk, Netherlands, pp. 195-198.
- [101] Konnov A.V., Malykhin A.V., Petenkova V.V., Ruvinskiy G.V., Chernobay T.I., Scherbakov D.S.//Analysis with Code Dev. 5.0 of Output Characteristics of Coupled Cavity TWT with Below-Cutoff Sections and with Direct and Inverse Bands Sequence, IVEC/IVESC 2006, Monterey CA, USA, pp. 291-292.
- [102] R.G. Carter Computer Modeling of Microwave Tubes – A Review, IEDM, 2001.
- [103] Малыхин А.В., Земсков Ю.Б., Соловьёв А.С., Сухолет В.Э. Синтез шестиполюсника с сосредоточенными элементами по характеристикам замедляющей системы типа цепочка связанных резонаторов. Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1989, вып. 7 (421). – С. 14–21.
- [104] K.S. Yee Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans. On Antennas and Propagation vol.AP-14, pp 302-307, May 96.
- [105] Malykhin A.V., Konnov A.V., Komarov D.A. “*Synthesis of six-pole network simulating of coupled cavity chain characteristics in two passbands*”, Proceedings of IV International Vacuum Electronics Conference, IVEC2003, Seoul, Korea, pp.159-160.
- [106] Самарский А. А. *Введение в численные методы*, М.: Наука, 1987.
- [107] Кириченко Т. К., Фаворский А.П. *Алгоритмы БПФ для комплексной периодической функции*, ИПМ им. Келдыша АН СССР, 1979, Препринт № 110.
- [108] Патент RU2654537. Гузилов И.А., Масленников О.Ю. Способ формирования сгустков высокой плотности энергии в электронном потоке и пролетный клистрон, 2017.
- [109] I.A.Guzilov. L and S-band high-efficiency multi beam klystron development. ВАС – method of increasing efficiency. CLIC workshop, Geneva, CERN, 3-7 February, 2014.
- [110] Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. О возможности применения двух БАК – колебаний в клистроне с высокой эффективностью. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), № 9, 2018. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/15/text.pdf>
- [111] D. A. Constable *et al.*, “MAGIC2-D Simulations of High Efficiency Klystrons using the Core Oscillation Method”, in *Proc. 2017 Int. Vacuum Electronics Conference. (IVEC 17)*, London, UK, April 2017.

- [112] D. A. Constable, G. Burt, A. Y. Baikov, *et. al.* High Efficiency Klystrons Using The COM Bunching Technique. *Proceedings of IPAC2017*. Copenhagen, Denmark, 2017.
- [113] Z. Liu, J. Shi, M. Peng, *et. al.* Design of a C-Band High-Efficiency Multi-Beam Klystron. *Proceedings of IPAC2017*. Copenhagen, Denmark, 2017.
- [114] Y. Okubo, S. Fujii, K. Suzuki, *et. al.* Status of High Efficiency Klystron Development in TETD. *Proceedings of IPAC2018*. Vancouver, BC, Canada, 2018.
- [115] Z. Wan, J. Wang. High Efficiency S-Band Klystron for Medical Accelerator System. *Proceedings of International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, London, UK, 24-26 April, 2017.
- [116] <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/17000/slac-pub-17102.pdf>
- [117] <https://www.osti.gov/servlets/purl/1380131>
- [118] Фрейдович И.А. Расчет амплитудно-частотных характеристик кольцевых резонаторов / И. А. Фрейдович, М.Ю. Воробьев, Н.А. Кокорев // – Радиотехника и электроника. – 1999. – Том 44. – №8. – с.1013-1021.
- [119] Егоров Р. В. Способ повышения эффективности многолучевых клистронов – теория и эксперимент: Магистерская диссертация. Московский государственный университет, Москва, 2017.
- [120] Егоров Р.В. // Сборник докладов «Ломоносов – 2016», МГУ им. М.В. Ломоносова, Секция «Физика», 2016, с. 94.
- [121] А.С. Гилмор – мл. ЛАМБЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ. Москва: Техносфера, 2013. – 616 с., ISBN 978-5-94836-359-2
- [122] I.A. Frejdovich, P.V. Nevsky, V.P. Sakharov, «Multi-Beam Klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System as The Universal RF Power Sources for The Compact Electron Accelerators», *Proceedings of RuPAC 2006*, Novosibirsk, Russia, 2006.
- [123] L. A. Frejdovich, et al., “Application of the Multi-Beam Klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System in RF System of the Compact Electron Accelerators,” *2006 International Vacuum Electronics Conference (IVEC2006)*, Monterey, California, USA, pp.307-308, April 2006.
- [124] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский // – Сов. Радио. – Москва. – 1966.

- [125] Прокофьев Б.В., Коннов А.В., Саввин В.Л. // Журнал радиоэлектроники, 2011, № 12, с. 1-6.
- [126] Хаби В.С. Измерение характеристического сопротивления резонатора с бессеточным зазором. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ., 1971, вып. 3, с. 138-140.
- [127] I.Guzilov, R.Egorov, O.Maslennikov, G.Mcmonagle, I.Syratchev, B.Woolley. Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed VAC MBK. Proceeding of 11th International Vacuum Electron Sources Conference, p. 44-45, Seoul, Korea, October 18-20, 2016.
- [128] Егоров Р.В. // Сборник докладов «Ломоносов – 2017», МГУ им. М.В. Ломоносова, Секция «Физика», 2017, с. 506.
- [129] Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Кобец В.В., Сумбаев А.П. Испытания высокоэффективного импульсного многолучевого БАК – клистрона 10 – см диапазона. Журнал «Сообщения ОИЯИ», категория «Ускорители», № Р9-2017-78, 2017.
- [130] Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю. Импульсный 6 МВт БАК многолучевой клистрон. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), № 7, 2017.
- [131] I.Guzilov, O.Maslennikov, R.Egorov, I.Syratchev, V.Kobets, A.Sumbaev. Comparison of 6 MW S-band Pulsed VAC MBK with the Existing SBKs. 18th International Vacuum Electronics Conference, p. 68, London, April 24-26, 2017.
- [132] Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. БАК–клистроны – новое поколение клистронов в вакуумной электронике. Вестник Московского Университета. Серия 3: Физика и Астрономия. Выпуск №1, 2019/Egorov R.V., Guzilov I.A., Maslennikov O.Yu., Savvin V.L. VAC-Klystrons: A New Generation of Klystrons in Vacuum Electronics. Moscow University Physics Bulletin, vol. 74, № 1, p. 38-42, 2019.
- [133] Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. О возможности повышения выходной мощности БАК – клистронов. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), № 10, 2017.
- [134] Егоров Р. В., Саввин В.Л. Трёхмерное моделирование процессов усиления в многолучевом клистроне. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], № 6, 2019.