

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи

КИЕУ ХАК ФЫОНГ

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМА ПИТАНИЯ
МОЩНОГО МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО
ПРОЛЁТНОГО КЛИСТРОНА ТРЁХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
С ВЫСОКИМ КПД**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2006

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (государственном университете).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Петров Дмитрий Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Гладун Анатолий Деомидович

доктор технических наук,
профессор Мухин Сергей Владимирович.

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН (ИРЭ РАН).

Защита диссертации состоится « 06 » декабря 2006 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.212.156.01 при Московском физико-техническом институте (государственном университете) по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9, аудитория « 204НК ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (государственного университета) по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9.

Автореферат разослан « 2 » ноября 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета
кандидат физико-математических наук,
доцент

Батурин А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы.

В настоящее время для ускорителей заряженных частиц требуются СВЧ источники накачки с мощностью десятки-сотни МВт. До сих пор, в качестве СВЧ источников для питания ускорителей заряженных частиц используются только мощные многорезонаторные пролётные клистроны. Усилительные клистроны легко управляются внешним сигналом по уровню мощности, частоте и фазе сигнала. Благодаря этому в цепочке питания ускорителя можно поставить много клистронов и обеспечить необходимое согласование их режимов, так чтобы во всех ускоряющих резонаторах ускорителя были реализованы нужные амплитуды и фазы СВЧ напряжений для оптимального ускорения заряженных частиц.

Основным недостатком используемых мощных клистронов является не очень высокий КПД (40 – 50%). Известно, что если КПД прибора увеличивается, то выходная мощность увеличивается без увеличения мощности питания. Благодаря этому повышается эффективность использования источников питания и эффективность работы всей ускорительной системы. Заметим, что повышение КПД клистрона не только увеличивает выходную мощность при той же мощности питания, но и уменьшает тепловую нагрузку на коллекторе, что открывает дополнительные возможности увеличения выходной мощности за счёт увеличения мощности питания при сохранении прежней нагрузки коллектора.

Для ускорителей заряженных частиц целесообразно использовать мощные клистроны трёхсантиметрового диапазон, чтобы уменьшить габариты как самих клистронов, так и всего ускорителя. В SLAC (Stanford linear accelerator center) был создан клистрон трёхсантиметрового диапазона с импульсной мощностью 75 МВт с КПД 55% [1,2] (КПД не очень высокий). Поэтому исследование возможности повышения КПД таких клистронов и возможности создания клистрона трёхсантиметрового диапазона с высоким уровнем мощности порядка 100 МВт и выше и с более высоким КПД (например, близким к 80%) является весьма интересной и актуальной задачей для использования таких клистронов в качестве СВЧ источника накачки ускорителей заряженных частиц.

Цели и задачи исследования.

Целями диссертационной работы являются выбор подходящих методики и математической модели и исследование на их основе и с их помощью возможности повышения КПД мощного многорезонаторного релятивистского пролётного клистрона трёхсантиметрового диапазона до 80% и более. Для достижения поставленной цели необходимо было провести работу в следующих направлениях:

1) анализ различных методик для определения КПД клистрона и выбор методики синтеза условий, обеспечивающих заданный КПД;

2) исследование математических моделей клистрона и выбор подходящей математической модели, гарантирующей реализацию нужного режима клистрона на основе полученных результатов;

3) выбор нужных параметров клистрона, которые могли бы быть определены на основе выбранной математической модели и гарантировали бы соответствие этих параметров реальным физическим процессам в клистроне;

4) выработка рекомендаций для формулирования требований к условиям, которые должны быть экспериментально реализованы в соответствии с требованиями теории на основе полученных результатов исследований.

Научная новизна.

- На основе анализа известных результатов установлено, что максимальная амплитуда первой гармоники конвекционного тока в зазоре выходного резонатора и минимальный разброс скоростей электронов в сгустке не дают достаточной информации для определения КПД клистрона в режиме высокого КПД.

- Сделан вывод о том, что наилучшей методикой для определения условий реализации максимально возможного электронного КПД является методика изоскоростных линий, на основе которой для заданного электронного КПД могут быть определены требования к сгустку электронов на входе в зазор выходного резонатора клистрона. Высокий КПД может быть достигнут, если реализованы оптимальное группирование электронов и оптимальный отбор энергии от них СВЧ полем, соответствующие условиям, определённым на основе методики изоскоростных линий с помощью Программы KlyP, основанной на дискретно-аналитической модели электронного потока, а условия формирования

электронного потока и движения электронов в среднем соответствуют исходным положениям дискретно-аналитической модели.

- Впервые проведен синтез мощного (с уровнем мощности порядка 100 МВт) многорезонаторного релятивистского пролётного клистрона трёхсантиметрового диапазона с высоким КПД и установлено, что мощный многорезонаторный релятивистский пролётный клистрон трёхсантиметрового диапазона может быть синтезирован на основе методики изоскоростных линий с помощью Программы KlyP.

- С помощью Программы KlyP проведено исследование физических процессов в релятивистском клистроне при изменении его различных параметров (длин труб дрейфа, резонансных частот резонаторов, их добротностей, соотношения радиуса электронного потока и радиуса пролётной трубы, тока питания и напряжения питания) и определены условия реализации оптимального слетающего сгустка, соответствующего заданному электронному КПД 90%.

Практическая значимость работы определяется тем, что впервые исследована возможность синтеза мощного многорезонаторного релятивистского пролётного клистрона трёхсантиметрового диапазона с уровнем выходной мощности порядка 100 МВт и КПД 80% и более. На основе результатов исследований определены параметры мощного семирезонаторного клистрона трёхсантиметрового диапазона с импульсной выходной мощностью более 100 МВт и КПД около 80%. Сделан вывод о возможности повышения выходной мощности до уровня более 200 МВт за счёт повышения мощности питания при прежней системе охлаждения коллектора. Эти результаты имеют важное значение для техники ускорения заряженных частиц.

Положения, выносимые на защиту.

- Сгусток электронов, оптимальный с точки зрения отбора энергии, соответствующий максимально возможному электронному КПД, и в релятивистском клистроне должен быть протяжённым «слетающимся» сгустком (входная скорость последующих электронов должна быть больше входной скорости предыдущих).

- Методика, на основе которой наиболее целесообразно проводить синтез

слетающегося сгустка электронов, оптимального с точки зрения отбора энергии - методика изоскоростных линий.

- Методика изоскоростных линий и комплекс Программ KlyP, которые используют дискретно-аналитическую модель, с помощью которых были синтезированы нерелятивистские телевизионный клистрон дециметрового диапазона и клистрон десятисантиметрового диапазона с высоким КПД, могут быть применены и для синтеза мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона.

- Оптимизация конструкции и режима питания клистрона для выходной мощности 100 МВт позволяет определить значения параметров клистрона и условия, обеспечивающие оптимальное группирование электронов и оптимальный отбор энергии СВЧ полем от них, соответствующие высокому КПД 80% (электронному КПД около 90%).

Публикации и апробация работы.

Материалы диссертации были доложены на XLVIII Научной конференции МФТИ (Москва - Долгопрудный, 25-26 ноябрь, 2005 г); на LXI Международной конференции, посвященной дню радио (Москва 17-18 мая, 2006 г); на международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов 20-21 сентября 2006 г).

По результатам диссертации опубликовано 4 печатных работы, список которых приведен в конце автореферата.

Структура работы.

Диссертационная работа изложена на 110 страницах машинописного текста, иллюстрирована 48 рисунками. Список цитируемой литературы содержит 65 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, дан обзор теоретических и экспериментальных исследований возможности повышения КПД клистрона, сформулированы цель и основные задачи диссертации, показаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены научные положения, вносимые на защиту, описаны состав и структура работы.

В первой главе дано краткое описание принципа работы двухрезонаторного пролётного клистрона, основные недостатки которого – малый КПД и малый коэффициент усиления [3]. Рассмотрены предпосылки к использованию каскадного группирования электронного потока в многорезонаторном пролётном клистроне (рис.1). На рис.2 для иллюстрации изображены фазовые траектории электронов, характеризующие для рассматриваемых координат вдоль клистрона последовательные фазы прибытия электронов одного периода (эти данные соответствуют семирезонаторному клистрону, четвёртый резонатор которого – резонатор второй гармоники, а остальные резонаторы возбуждаются на основной частоте). Из рисунка видно, что при движении от первого резонатора к последнему резонатору электроны постепенно группируются, и в результате образуется сгусток электронов (рис.3). В многорезонаторном пролётном клистроне все резонаторы (кроме выходного резонатора) вносят свой вклад в группирование электронов, так что увеличивается степень группирования электронного потока. Это приводит к повышению КПД, т.к. увеличивается количество электронов, собирающихся в сгусток и отдающих энергию СВЧ полю. Кроме того, коэффициент усиления клистрона пропорционален числу каскадов, т.е. числу резонаторов. Следовательно, многорезонаторный пролётный клистрон может удовлетворить требованию высокого уровня выходной мощности и большого коэффициента усиления.

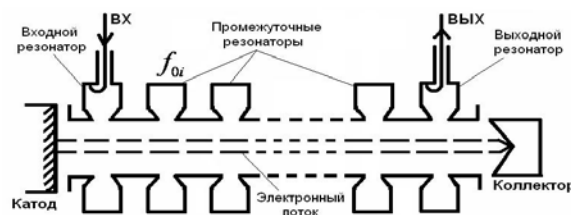


Рис.1. Схематическое изображение многорезонаторного пролётного клистрона.

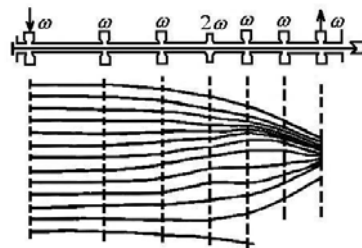


Рис.2 Фазовые траектории электронов в семирезонаторном клистроне, четвёртый резонатор которого – резонатор второй гармоники.

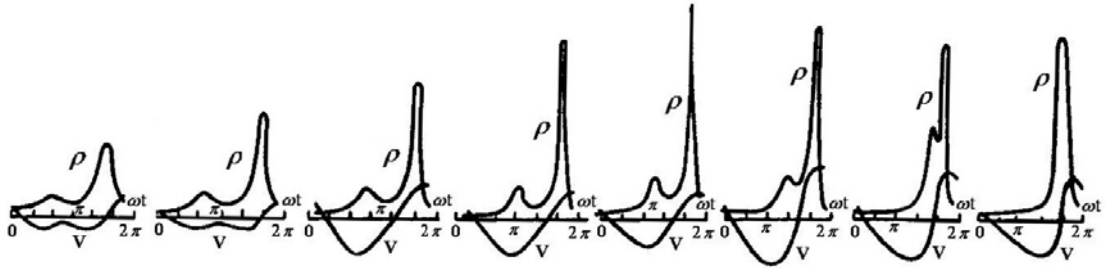


Рис.3. Распределения плотности пространственного заряда и скоростей электронов при группировании электронного потока в трёх последних пространствах дрейфа семирезонаторного клистрона.

Основные параметры многорезонаторного пролётного клистрона.

- Электронный КПД.

Электронный КПД равен отношению активной составляющей электронной мощности P_{ea} к мощности источника питания P_0 . Электронная мощность тратится на потери в выходном резонаторе, а полезная ее часть уходит в нагрузку. Поэтому электронный КПД равен отношению суммарной активной составляющей общей мощности $P_{\Sigma N}$ к мощности источника питания:

$$\eta_e = \frac{P_{ea}}{P_0} = \frac{P_{\Sigma N}}{P_0} = \frac{G_N U_N^2}{2U_0 I_0} = \frac{\xi_N^2}{2\rho_N Q_{HN}} \frac{U_0}{I_0}. \quad (1.1)$$

Здесь $G_N = (\rho_N Q_{HN})^{-1}$ - проводимость нагруженного выходного резонатора (полная активная проводимость выходного резонатора),

ρ_N - волновое (характеристическое) сопротивление выходного резонатора

Q_{HN} - добротность нагруженного выходного резонатора,

U_N - амплитуда СВЧ напряжения в выходном резонаторе,

U_0 - ускоряющее напряжение (напряжение питания),

I_0 - постоянный конвекционный ток (ток эмиссии катода),

$\xi_N = \frac{U_N}{U_0}$ - относительная амплитуда СВЧ напряжения в выходном резонаторе.

- КПД по мощности в нагрузку $\eta_H = \frac{P_{Вых}}{U_0 I_0}, \quad (1.2)$

где $P_{Вых}$ - мощность в нагрузку.

- Коэффициент усиления многорезонаторного пролётного клистрона

$$K_N = K_{Bx} K_{1N} K_{Bвых} , \quad (1.3)$$

где K_{1N} - коэффициент усиления по мощности от первого резонатора до последнего,

$$K_{Bx} = \frac{P_1}{P_{Bx}}, \quad K_{Bвых} = \frac{P_{Bвых}}{P_{\Sigma N}},$$

P_{Bx} - входная мощность СВЧ сигнала, подводимая к клистрону,

P_1 - часть входной мощности, проходящей в первый резонатор.

Во второй главе изложены общие вопросы повышения КПД многорезонаторного пролётного клистрона. Проведен анализ методик синтеза условий, обеспечивающих максимально возможный электронный КПД. Показано, что методики, определения условий реализации максимально возможного электронного КПД, основывающиеся на максимальной амплитуде первой гармоники конвекционного тока или на максимальном значении коэффициента качества, не могут быть использованы для синтеза клистрона с высоким КПД, потому что они не дают достаточной информации о структуре электронного сгустка, оптимального с точки зрения отбора энергии от электронов при их взаимодействии с СВЧ полем в выходном резонаторе (из-за сильной нелинейности процессов при высоком КПД). Кроме того, при использовании этих методик нельзя точно определить положение зазора выходного резонатора, в котором сгусток электронов должен предельно эффективно взаимодействовать с СВЧ полем выходного резонатора [4].

Известно, что КПД клистрона зависит от эффективности отбора энергии от электронов СВЧ полем в зазоре выходного резонатора и от эффективности формирования электронов в сгусток (от количества электронов одного периода, собирающихся в сгусток, от распределения скоростей электронов и от распределения плотности пространственного заряда в сгустке на входе в зазор выходного резонатора). Поэтому, для получения идеального электронного КПД, равного 100%, должны быть выполнены следующие условия:

- все электроны одного периода собираются в сгусток,
- при взаимодействии с СВЧ полем в зазоре выходного резонатора все электроны сгустка отдают СВЧ полю всю свою энергию (это значит, что скорости электронов

на выходе из зазора выходного резонатора равны нулю),

- затраты энергии на процесс группирования электронного потока пренебрежимо малы (в идеальном режиме равны нулю).

Необходимо отметить, что режим, очень близкий к электронному КПД 100%, является неустойчивым, потому что при небольшом изменении каких-нибудь параметров или режима питания электроны, имеющие очень малые скорости (близкие к нулю), могут быть заторможены СВЧ полем и начнут двигаться в обратном направлении с ускорением, отбирая энергию у СВЧ поля. Таким образом, режим очень малых выходных скоростей («слишком высокого» КПД) для практики не очень хорош из-за его критичности. Но повышение электронного КПД до 90% и немного более (до относительной выходной скорости электронов v_c , равной примерно 0,3 - 0,2, т.е. до электронного КПД 90-95%) вполне возможно, если после отбора энергии все электроны имеют не очень малые почти одинаковые скорости. Всё сказанное позволяет поставить задачу о синтезе клистрона с максимально возможным электронным КПД. Эта задача сводится к поиску формы распределения скоростей электронов и распределения плотности пространственного заряда в сгустке, оптимальных с точки зрения отбора энергии, и выяснения условий реализации этих распределений в процессе формирования сгустка (в процессе группирования электронов). Для решения этой задачи была выбрана разработанная ранее методика изоскоростных линий. Суть этой методики сводится к тому, что задачу нужно решать с конца, т.е. с выхода зазора выходного резонатора, считая, что электроны начинают двигаться с конца зазора выходного резонатора в обратном направлении с нулевой или с некоторой одинаковой скоростью v_c [4, 5].

При таком подходе можно получить ответ на вопрос, какими должны быть скорости электронов на входе в зазор выходного резонатора $v_{вх}$ и каким фазам СВЧ напряжения они должны соответствовать, чтобы на выходе из зазора выходного резонатора все электроны, собранные в сгусток, обладали бы достаточно малой одинаковой скоростью. Поэтому необходимо найти зависимости скоростей электронов одного периода на входе в зазор выходного резонатора от

фаз влёта в этот зазор при условии, что скорости электронов сгустка на выходе из зазора выходного резонатора одинаковы. Поэтому, соответствующие кривые линии этих зависимостей называют изоскоростными линиями (рис.4). Они рассчитываются на основе уравнений, характеризующих движение электронного потока в выходном (в простейшем случае плоском) зазоре [4]. Анализируя эти зависимости, можно получить необходимую информацию о распределении скоростей электронов сгустка на входе в зазор выходного резонатора по фазам СВЧ напряжения (в моменты их влёта в зазор выходного резонатора со стороны катода).

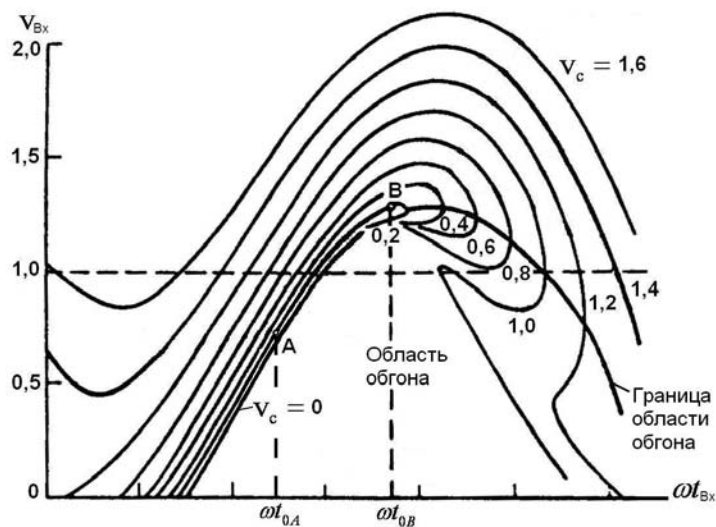


Рис.4. Изоскоростные зависимости для значения плазменной частоты $\bar{\Omega}_q = 0,2$, рассчитанные при относительной амплитуде СВЧ напряжения $\xi = 2,0$ и статическом угле пролёта $\theta_0 = \pi / 2$.

Так как электронный КПД сгустка равен $\eta_e = 1 - v_c^2$, то каждая изоскоростная линия, соответствующая одному значению скорости v_c , определяет одно соответственное значение электронного КПД.

Из анализа изоскоростных линий (рис.4) следует, что для оптимального сгустка, соответствующего, например, интервалу между пунктирными линиями (соответственно между точками А и В), распределение входных скоростей электронов по фазам влёта в зазор выходного резонатора должно быть таким, чтобы входная скорость последующих электронов была больше входной скорости предыдущих, т.е. сгусток должен быть «слетающимся» [4,5] (рис.4), а

дополнительная энергия, которую получили ускоренные электроны ($v_{Bx} > 1$), должна быть равна энергии, которую потеряли замедленные электроны ($v_{Bx} < 1$), что соответствует пренебрежимо малым затратам энергии на процесс группирования электронов. Если синтезированный слетающийся сгусток имеет распределение скоростей для большей части электронов сгустка, совпадающее с соответствующей изоскоростной линией $v_c = 0,3$ (рис.4), то соответствующий основной части сгустка электронный КПД $\eta_e = 1 - (0,3)^2 \approx 0,9$. Примерно такой сгусток представлен на рис.5, из которого видно, что в центре сгустка плотность пространственного заряда $\frac{\rho_{Bx}}{\rho_0}$ высокая. Протяжённость сгустка электронов не очень мала, а составляет примерно одну пятую периода СВЧ поля.

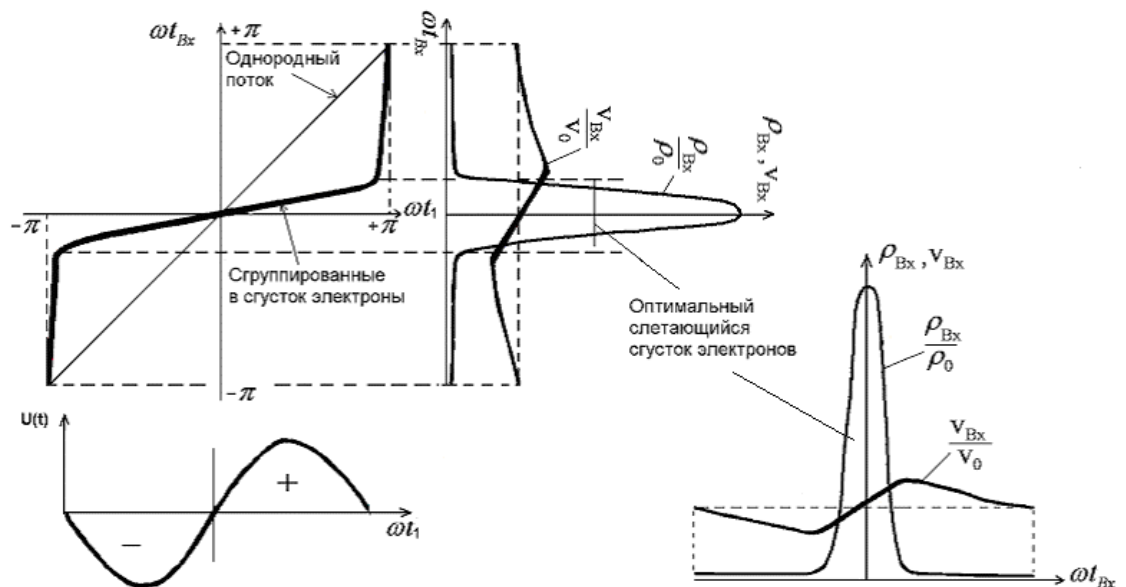


Рис.5. Фазы прибытия электронов ωt_{Bx} в зазор выходного резонатора в зависимости от начальной фазы ωt_1 для оптимального слетающегося сгустка электронов.

Фазы прибытия электронов и распределение скоростей электронов одного периода на входе в зазор выходного резонатора и на выходе из зазора выходного резонатора для такого слетающегося сгустка электронов в клистроне изображены на рис.6.

Для формирования «слетающегося» электронного сгустка весьма важным условием является отсутствие обгона одних электронов другими в процессе группирования электронного потока (группирование электронов в клистроне

должен быть упорядоченным, т.е. движение электронов, близкое к одномерному).

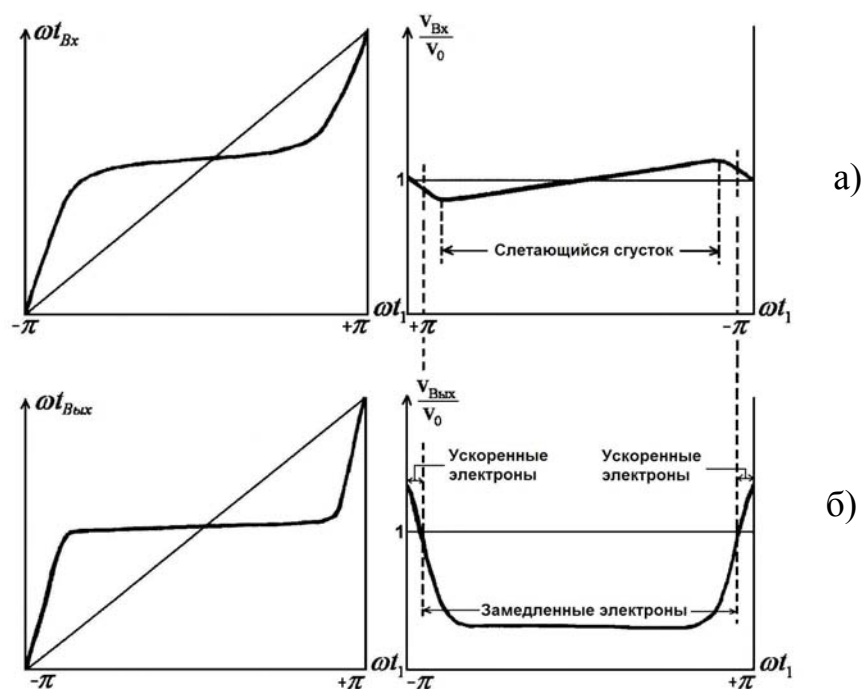


Рис.6. Фазы прибытия и распределение скоростей электронов одного периода на входе (а) в зазор выходного резонатора и на выходе (б) из зазора выходного резонатора для слетающего сгустка электронов в клистроне.

Очевидно, что силы пространственного заряда (силы расталкивания), противодействующие силам действия СВЧ полей, препятствуют обгону [5]. Следовательно, для того, чтобы обгона не было силы пространственного заряда должны быть соизмеримы с силами воздействия СВЧ полей. Заметим, что условие отсутствия обгона хорошо удовлетворяет требованию к малым затратам энергии на процесс группирования электронов.

В реальном приборе движение электронов является не одномерным, а двумерным (точнее - трёхмерным). Поэтому необходимо учесть влияние этих эффектов на формирование слетающего сгустка электронов. На основе анализа влияния таких эффектов на процесс формирования слетающего сгустка [6] показано, что при определённых условиях в радиальных слоях электронов, одновременно влетающих в зазор первого резонатора, все электроны практически одинаково движутся в продольном направлении, несмотря на изменение их положения в поперечном направлении внутри радиальных слоев (электроны не выходят за границу электронного потока). Поэтому, если обеспечены условия, при

которых влияние двумерных и трёхмерных эффектов на продольное движение электронов во всем приборе достаточно мало, то можно считать движение радиальных слоев электронов квазиодномерным и пользоваться одномерным приближением.

Из сопоставления зависимостей КПД реальных клистронов различных конструкций от подводимой мощности [6] можно прийти к важному выводу: клистрон, в котором использованы только однозачорные резонаторы, а оптимизация группирования электронов и отбора энергии от них проводилась на основе методики изоскоростных линий (т.е. реализован слетающийся сгусток), имеет не только наибольший электронный КПД ($\eta_e \approx 90\%$), но и наименьшую критичность КПД к изменению режима питания. Это подтверждает мысль о том, что режим слетающегося сгустка является наименее чувствительным к случайному изменению любых параметров клистрона [6], что очень важно при изготовлении клистрона.

В третьей главе проведен анализ математических моделей, которые целесообразно использовать при исследовании клистрона. Традиционные математические модели можно разделить на две группы: численные и аналитические [9, 10].

- Численные модели, основанные на различных модификациях метода крупных частиц в сочетании с численно-разностными методами расчёта электрических полей. Численные модели обладают достаточно большой областью адекватности, однако получить для них достаточно высокую точность можно только при малой скорости расчёта.

- Аналитические модели основаны на приближенных аналитических решениях исходных уравнений в рамках тех или иных приближений. Область адекватности аналитических моделей, как правило, невелика, но если реализуются условия, при которых модель справедлива (отсутствие обгона и движение электронов, близко к одномерному), то точность внутри области адекватности может быть достаточно высокой. Главное преимущество аналитических моделей - очень высокая скорость расчёта (на 3-4 порядка выше, чем у численных моделей), что и открывает большие возможности применения различных методов

оптимизации при синтезе клистрона. Нельзя не отметить, что перечисленные «требования» аналитической теории соответствуют наилучшим условиям реализации высокого КПД и наименьшей критичности режима клистрона к возможным случайным отклонениям реальных величин от расчётных, поэтому создатели клистронов должны быть заинтересованы в том, чтобы условия формирования электронного потока электронно-оптической (фокусирующей) системой и движение электронов в процессе взаимодействия с СВЧ полями удовлетворяли требованию квазиодномерности.

Для повышения точности и расширения области адекватности аналитической модели была предложена дискретно-аналитическая модель [9, 10]. Известно, что модель бесконечно тонкого (малого) зазора адекватна только для малых амплитуд СВЧ напряжения и для малых величин зазора [3]. Суть дискретно-аналитической модели заключается в том, что СВЧ зазоры и трубы дрейфа клистрона разбиваются на заданное число парциальных элементов - достаточно малых парциальных зазоров и достаточно коротких парциальных труб дрейфа. Поэтому, для каждого парциального зазора модель бесконечно тонкого зазора оказывается адекватной.

Для каждого парциального элемента используются аналитические решения исходных уравнений. Точность этих решений зависит от размеров элементов: варьируя размеры элементов, можно добиться оптимального компромисса между скоростью и точностью расчёта. Для разных каскадов можно задавать разную величину разбиения на элементы, что делает модель очень гибкой и легко настраиваемой: в каких-то пределах дискретно-аналитическая модель может регулироваться от "почти аналитической" до "почти численной". Дискретно-аналитическая модель реализована в виде комплекса компьютерных Программ KlyP для пролётных клистронов [9,10]. Расчёты по Программе KlyP разработанных и изготовленных пролётных клистронов, и сравнение их выходных характеристик с результатами расчётов, показали, что дискретно-аналитическая модель обеспечивает очень высокую степень адекватности при скорости расчёта, по крайней мере, на 2-3 порядка выше, чем у численных моделей. Поэтому Программа KlyP была использована для синтеза перспективных конструкций клистрона с рекордными значениями выходных параметров [9]. При этом Программа KlyP в

силу возможности настройки модели, а также многофункционального графического интерфейса является очень хорошим инструментом для детального исследования физических процессов в клистронах. Например, с помощью программы KlyP можно провести следующие исследования:

- распределение амплитуд СВЧ напряжений в зазорах клистрона,
- распределение гармоник конвекционного тока вдоль клистрона,
- группирование электронов при изменениях длин труб дрейфа для каждого каскада,
- группирование электронов при изменениях резонансных частот (расстроек) резонаторов,
- группирование электронов при изменении влияния пространственного заряда,
- влияние амплитуды и фазы СВЧ напряжения выходного зазора на процесс отбора энергии от сгруппированных электронов СВЧ полем и т.д.

Возможность создания нерелятивистских клистронов дециметрового и десятисантиметрового диапазонов с высоким КПД на основе методики изоскоростных линий с помощью Программы KlyP была подтверждена экспериментально. Например, семирезонаторные телевизионные клистроны (частота 470-850 МГц) с КПД около 80% (электронный КПД около 85%) разработчиками были созданы [7]. В этих клистронах в качестве четвёртого резонатора используется резонатор второй гармоники.

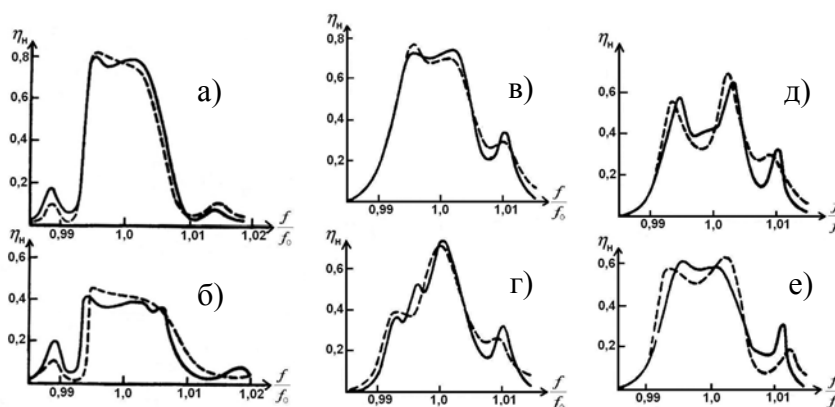


Рис.7. Сопоставление теоретических (штриховая линия) и экспериментальных (сплошная линия) АЧХ семирезонаторного телевизионного клистрона для оптимального (а) и половинного (б) значений входной мощности при оптимальном значении частоты четвёртого резонатора (резонатора второй гармоники) и для разных значений частоты резонатора второй гармоники (в, г, д и е).

Из сопоставления расчётных и экспериментальных АЧХ (рис.7) при изменении параметров, наиболее сильно влияющих на процессы в клистроне: для различных значений входной мощности и разных значений относительной резонансной частоты четвёртого резонатора (резонатора второй гармоники) следует, что они с удовлетворительной погрешностью соответствуют друг другу.

Итак, можно сделать вывод, что высокий КПД может быть получен, если реализовать оптимизацию процесса группирования электронов и процесса отбора энергии от сгруппированных электронов в клистроне. Очевидно, что КПД клистрона не зависит от уровня его выходной мощности: группирование электронов и отбор энергии от них определяются безразмерными параметрами: группирование электронов зависит от соотношения сил СВЧ полей, воздействующих на электроны, и сил пространственного заряда, противодействующих действию СВЧ полей, а отбор энергии от сгруппированных электронов зависит от соотношения амплитуды СВЧ напряжения в выходном резонаторе и величины напряжения питания. Поэтому высокий КПД может быть достигнут в клистролах любого уровня мощности. Таким образом, можно прийти к выводу о том, что мощный релятивистский клистрон трёхсантиметрового диапазона с КПД около 80% (электронным КПД около 90%) может быть синтезирован на основе метода изоскоростных линий с помощью Программы КлуР.

Проведен выбор подходящей конструкции для мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона. Рассмотрены трудности и ограничения, связанные с высоким напряжением и большим током питания и со сверхвысокими частотами, фокусированием электронного потока, выводом большой мощности в полезную нагрузку и т.д.), обусловленные высоким уровнем мощности релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона и методы решения этих проблем. Из анализа этих проблем можно выбрать конструкцию мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона, соответствующую высокому уровню мощности и особенностям этого диапазона:

- конструкция клистрона в простейшем случае должна быть однолучевой с использованием только однозачерных резонаторов основной частоты;

- для фокусирования электронного потока целесообразно использовать

магнитную периодическую фокусирующую систему (МПФС) или магнитную реверсную фокусирующую систему (МРФС) или комбинированную фокусирующую систему;

- для вывода большой мощности в полезную нагрузку целесообразно применять окна с бегущей волной.

В четвёртой главе на основе Программы KlyP проведен синтез мощного многорезонаторного релятивистского пролётного клистрона трёхсантиметрового диапазона с КПД около 80% и мощностью более 100 МВт, обсуждены полученные результаты. При основных данных (выходной мощности, заданном КПД, коэффициенте усиления, напряжении питания) клистрона обсуждены условия выбора конструкции клистрона, которая может удовлетворить поставленным требованиям к выходным параметрам. Для мощного клистрона с высоким КПД число резонаторов не меньше шести [8]. Для получения минимальной критичности электронного КПД к изменению режима питания в клистроне целесообразно использовать только однозачерные резонаторы [6]. Для мощного клистрона трёхсантиметрового диапазона необходимо использовать резонаторы, возбуждающиеся на частоте сигнала.

Для исследований выбран режим питания, близкий к режиму питания мощного релятивистского клистрона, разработанного в SLAC (напряжение питания 490 кВ, тока питания 240 А).

Процесс синтеза мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона включал следующие этапы.

При изменениях амплитуд СВЧ напряжений резонаторов проведены исследования режима волн пространственного заряда (рис.8), при этом определялась четверть длины волны пространственного заряда для каждого каскада $\frac{\lambda_{q,i,i+1}}{4}$ (рис.9). На основе исследования режима волн пространственного заряда предварительно определялись исходные значения длин труб дрейфа каждого каскада $l_{i,i+1}$ по отношению к $\frac{\lambda_{q,i,i+1}}{4}$ (например, $l_{i,i+1} \approx 0,6 \frac{\lambda_{q,i,i+1}}{4}$).

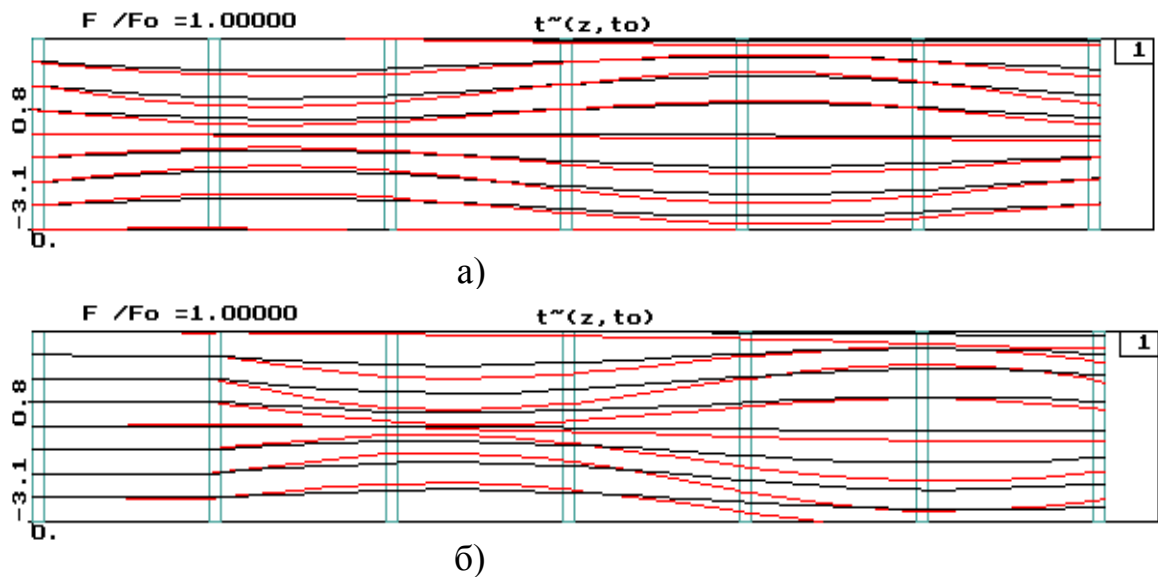


Рис.8. Изменение волны пространственного заряда при изменениях амплитудах СВЧ напряжений в первом (а) и во втором (б) резонаторах.

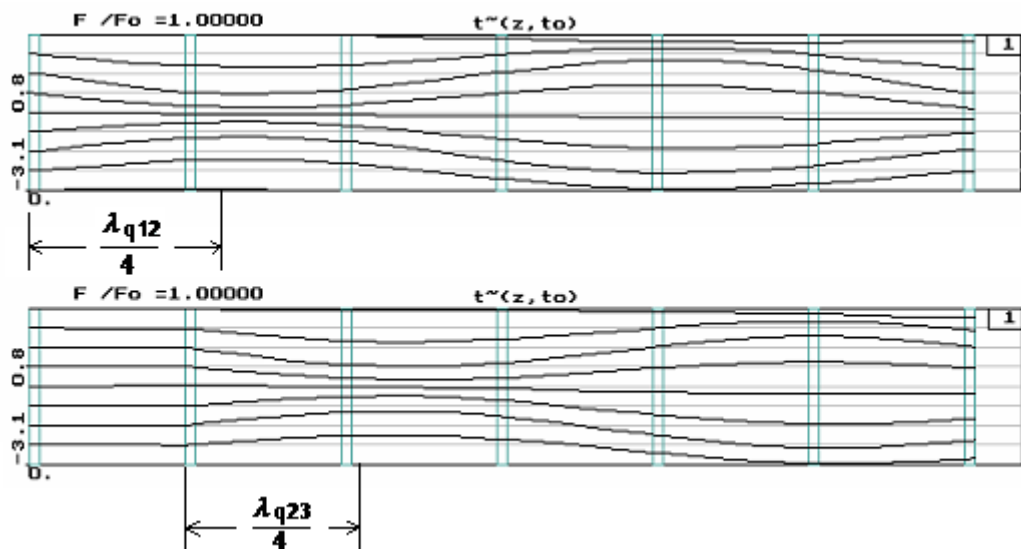


Рис.9. Волна пространственного заряда при лилейном режиме.

Изменяя постепенно длину первой трубы дрейфа l_{12} около $0,6 \frac{\lambda_{q12}}{4}$, можно исследовать влияние длины первой трубы дрейфа этого каскада на формирование электронного сгустка и выбрать некоторое значение l_{12} , которое считается лучшим. На втором этапе, изменяя длину второй трубы дрейфа l_{23} , можно выбрать лучшее значение для второй трубы. На следующих этапах аналогично повторяется этот процесс для других труб дрейфа. После выбора лучших значений всех длин труб дрейфа проводились исследования влияния резонансной частоты (расстройки) второго резонатора на формирование электронного сгустка и выбиралось лучшее

значение расстройки второго резонатора. Затем аналогично проводились исследования влияния расстроек следующих резонаторов. При изменении длин труб дрейфа и расстроек резонаторов клистрона нужно найти режим оптимального группирования электронов, т.е. группирования не только без обгона (распределение скоростей электронов на входе в зазор выходного резонатора должно быть гладким и однозначным и удовлетворять условию слетающего сгустка - входная скорость последующих электронов была больше входной скорости предыдущих), но и желательно с достаточно малой крутизной зависимости фаз прибытия электронов на входе в зазор выходного резонатора (необходимо, чтобы достаточно большое количество электронов одного периода было собрано в сгусток).

Отметим, что в начале всех этих исследований нужно расстройки всех резонаторов немного увеличить, так чтобы группирование электронов было не очень сильным, т.е. чтобы обгона одних электронов другими не было – движение электронов должно быть вполне упорядоченным. Целью всех этих исследований – постараться понять, как разные факторы влияют на процесс группирования электронов и сформировать слетающийся сгусток электронов, но с обязательным сохранением хорошей упорядоченности группирования. При «появлении» обгона исследовался режим группирования электронов не только при изменении резонансных частот резонаторов и длин труб дрейфа, но и с немного уменьшенным радиусом электронного потока (луча) r_d или с увеличенным током питания I_0 , чтобы увеличить силы пространственного заряда для предотвращения обгона – реализация упорядоченного слетающегося сгустка электронов. Но если силы пространственного заряда большие, то они препятствуют группированию электронов. Поэтому нужно найти режим, при котором силы СВЧ полей, воздействующие на электронный поток и силы пространственного заряда, противодействующие силам СВЧ полей, соизмеримы.

Если сгусток электронов на входе в зазор выходного резонатора сделать слетающимся с распределением скоростей электронов, совпадающим с изоскоростной линией, соответствующей заданному электронному КПД, с зависимостью фаз прибытия электронов на входе в зазор выходного резонатора,

имеющей малую крутизну, и красивыми непересекающимися фазовыми траекториями электронов, то можно, изменяя нагруженную добротность выходного резонатора и его резонансную частоту (расстройку), определить оптимальную амплитуду и оптимальную фазу СВЧ напряжения выходного резонатора, соответствующие оптимальному отбору энергии, т.е. оптимальному электронному КПД.

На рис.10, 11, 12 и 13 представлены результаты исследования процесса группирования электронов (без обгона) и процесса отбора энергии от них в семирезонаторном релятивистском клистроне, полученные с помощью Программы KlyP. Из рис.10, на котором представлены последовательно для каждого каскада результаты процесса формирования сгустка и распределения плотности пространственного заряда в сгустках и для сравнения функция Грина, видно, что плотность пространственного заряда в сгустке электронов постепенно увеличивается при движении электронов вдоль клистрона. Сгусток электронов на входе в зазор выходного резонатора имеет вид слетающегося сгустка. Зависимости фаз прибытия электронов и скоростей электронов на входе (рис.11) и на выходе (рис.12) зазора выходного резонатора являются взаимоднозначными функциями. Это отражает упорядоченное (без обгона) группирование электронов. Кроме того, зависимости фаз прибытия электронов на входе (рис.11) и на выходе (рис.12) имеют достаточно малую крутизну (это соответствует весьма сильному группированию) и вполне хорошо совпадают с зависимостями фаз прибытия электронов, соответствующими слетающемуся сгустку (рис.5 и 6). Распределение скоростей электронов на входе в зазор выходного резонатора (рис.11) показывает, что в сгустке скорости последующих электронов больше скоростей предыдущих – слетающийся сгусток. Скорости электронов сгустка на выходе из выходного резонатора имеют малое почти одинаковое значение (как видно из рис.12) – хороший отбор энергии от электронов сгустка СВЧ полем. Фазовые траектории электронов (рис.13) сближаются, но не пересекаются – упорядоченное движение электронов (без обгона). Поэтому полученные результаты полностью удовлетворяют требованиям к условиям оптимального группирования электронов и оптимального отбора энергии от них (обгона нет, упорядоченное движение

электронов, малые почти одинаковые скорости электронов сгустка на выходе из зазора выходного резонатора).

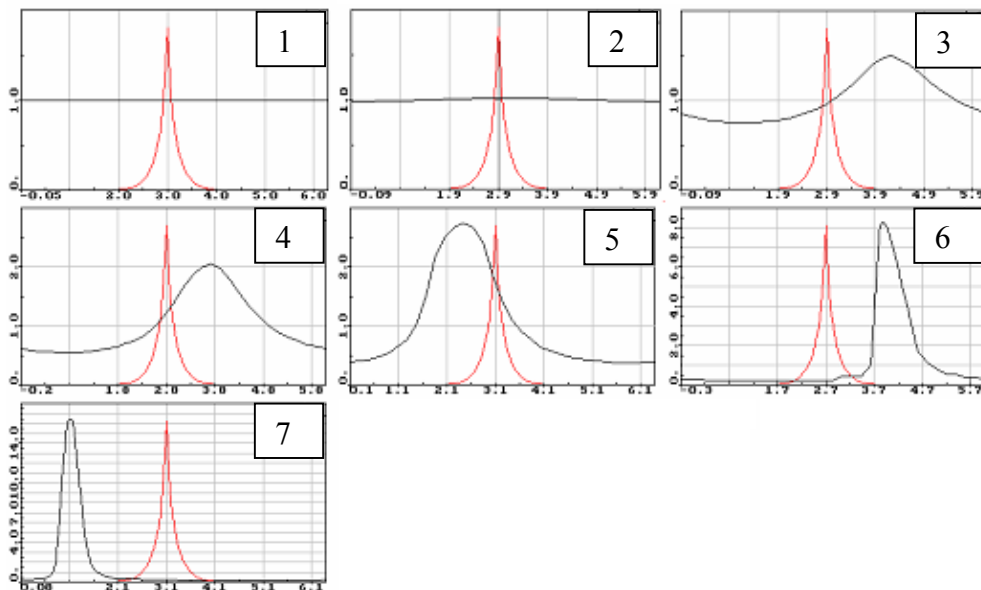


Рис.10. Распределения плотности пространственного заряда сгустка на входах в зазоры резонаторов клистрона (1 - на входе в зазор первого резонатора, 2 – на входе в зазор второго резонатора,....., 7- на входе в зазор выходного резонатора).

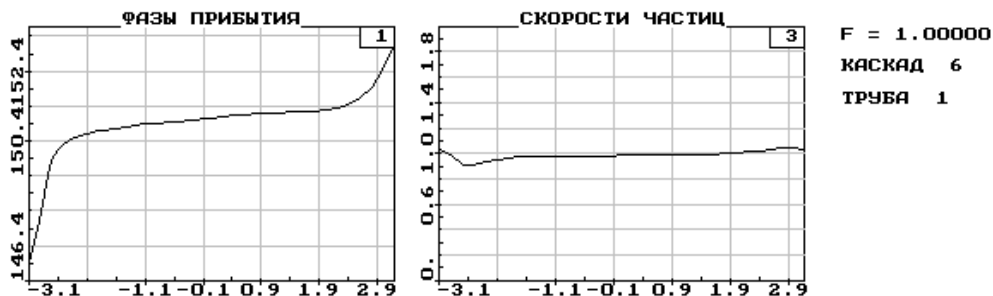


Рис.11. Фазы прибытия электронов и распределение скоростей электронов одного периода на входе в зазор выходного резонатора.



Рис.12. Фазы прибытия электронов и распределение скоростей электронов одного периода на выходе из зазора выходного резонатора.

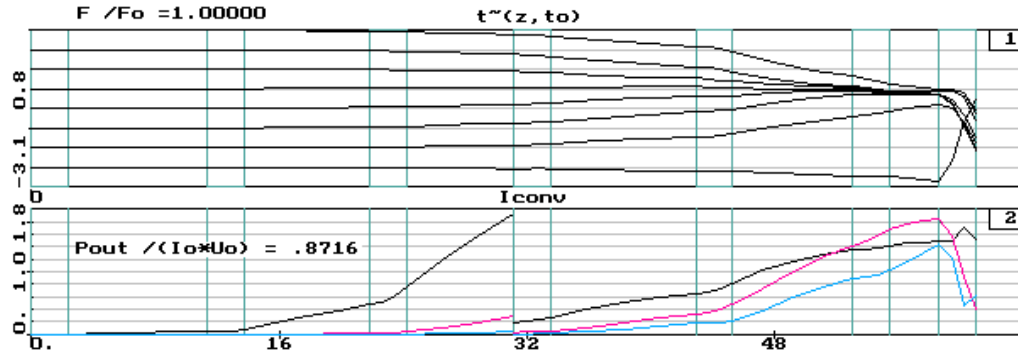


Рис.13. Фазовые траектории электронов и распределение гармоник конвекционного тока.

На основе методики изоскоростных линий с помощью Программы КлуР проведен синтез мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с высоким КПД. Результаты расчёта показали, что при ускоряющем напряжении 490 кВ и токе питания 270 А, выходная мощность составляет 105 МВт при КПД около 80%.

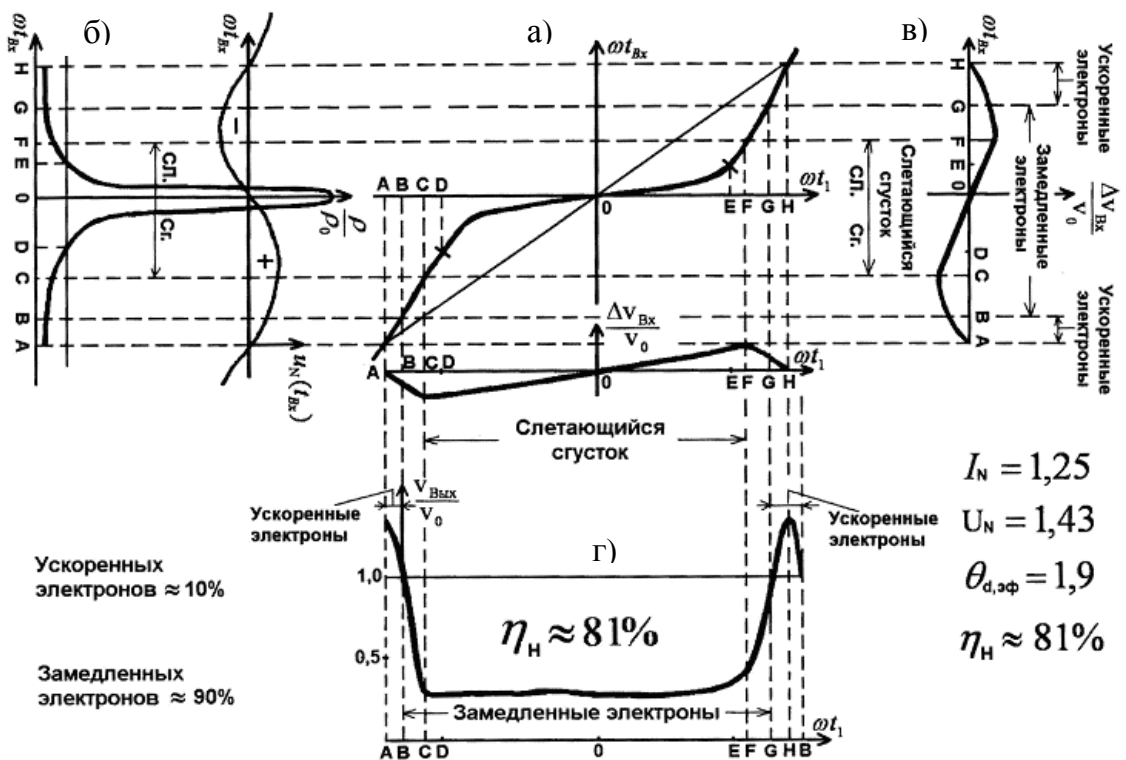


Рис.14. Зависимость фаз прибытия электронов на входе в зазор выходного резонатора (а) и соответствующее ей распределение плотности пространственного заряда (б), распределение скоростей электронов на входе (в) и на выходе (з) зазора выходного резонатора для мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с КПД по мощности в нагрузку $\eta_H \approx 80\%$.

На рис.14 изображены зависимость фаз прибытия электронов на входе в зазор выходного резонатора (14.а) и соответствующие ей распределение плотности пространственного заряда (14.б), распределение скоростей электронов на входе (14.в) и на выходе (14.г) зазора выходного резонатора мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с КПД по мощности в нагрузку $\eta_H \approx 80\%$. Из рис.14.г видно, что количество ускоренных электронов мало, а количество замедленных электронов велико. Большая часть замедленных электронов, т.е. электронов сгустка, как видно из рис.14.г, имеет относительную скорость на выходе из зазора выходного резонатора около 0,3. Это соответствует электронному КПД сгустка около 90%. Так как энергия, отданная СВЧ полем ускоренным электронам, скомпенсирована частью энергии находящихся вне сгустка замедленных электронов, то в нагрузку поступает около 80% энергии электронов, полученной от источника питания.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. В процессе изучения и анализа методик определения условий реализации максимально возможного электронного КПД были оценены различные методики и была выбрана методика изоскоростных линий потому что при анализе изоскоростных линий, соответствующих определенным значениям электронного КПД, можно получить необходимую информацию о распределении скоростей электронов на входе в зазор выходного резонатора по фазам СВЧ напряжения, т.е. о свойствах слетающегося сгустка электронов, оптимального с точки зрения отбора энергии для заданного электронного КПД.
2. На основе анализа различных математических моделей клистрона с учётом методики изоскоростных линий (обгона нет, упорядоченное движение электронов, учёт требования к сгустку электронов и формированию электронного потока) выбраны дискретно-аналитическая модель и программа KlyP для синтеза мощного релятивистского пролётного клистрона с КПД 80% (электронным КПД 90%).
3. Установлено, что на основе методики изоскоростных линий были ранее синтезированы и созданы нерелятивистские клистроны дециметрового и десятисантиметрового диапазонов с высоким КПД и полученные результаты компьютерного моделирования хорошо соответствуют экспериментальным

результатам. Поэтому методика изоскоростных линий и дискретно-аналитическая модель, реализованные в виде комплекса компьютерных Программ KlyP, выбраны для исследования возможности получения высокого КПД мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона.

4. Для оптимизации процесса группирования электронов проведены исследования электронных процессов в релятивистском клистроне при изменении длин труб дрейфа каскадов и резонансных частот (расстроек) резонаторов (кроме резонансной частоты выходного резонатора) клистрона, чтобы определить четверть плазменной длины волны и первоначальные значения длин труб дрейфа для каждого каскада, а затем определены условия, при которых образуется протяжённый слетающийся сгусток электронов и непересекающиеся фазовые траектории электронов (соответствующие движению электронов без обгона). В процессе синтеза слетающегося сгустка электронов при изменении параметров клистрона соблюдались условия сохранения хорошего упорядоченного группирования электронов без обгона. При появлении обгона исследовался режим группирования электронов не только при изменении резонансных частот резонаторов и длин труб дрейфа, но и с немного уменьшенным радиусом электронного потока или с увеличенным током питания, чтобы увеличить силы пространственного заряда для предотвращения обгона и для реализации упорядоченного слетающегося сгустка электронов.

5. Для оптимизации процесса отбора энергии от сгруппированных электронов СВЧ полем в выходном резонаторе проведены исследования при изменении нагруженной добротности и резонансной частоты выходного резонатора (соответственно при изменении амплитуды и фазы СВЧ напряжения в выходном резонаторе) и получены зависимости фаз прибытия электронов на выходе из зазора выходного резонатора с достаточно малой крутизной, соответствующей достаточно сильному группированию электронов (но без обгона электронами друг друга), и распределение выходной скорости электронов, соответствующее малой почти одинаковой относительной скорости (близкой к 0,3),

6. С помощью Программы KlyP при компьютерном моделировании процесса синтеза слетающегося сгустка электронов и процесса отбора энергии определены

значения параметров конструкции и режима питания клистрона, реализация которых должна обеспечить создание мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с заданным высоким КПД.

7. Выполненные исследования показывают, что синтез мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с высоким КПД может быть проведен на основе методики изоскоростных линий с помощью Программы KlyP, основанной на дискретно-аналитической модели. Из полученных результатов следует, что при ускоряющем напряжении 490 кВ и токе питания 270 А, выходная мощность составляет 105 МВт при КПД около 80% (электронном КПД около 90%). Полученные результаты подтвердили правильность и целесообразность выбранного направления исследований.

8. Кроме того, необходимо отметить, что повышение электронного КПД от 60-65% до 90% открывает дополнительные возможности увеличения выходной мощности за счёт увеличения мощности питания при той же системе охлаждения коллектора более, чем в два раза, т.е. более, чем до 250 МВт.

Подводя итог, можно констатировать, что в результате выполненных исследований, решена важная и интересная для практики ускорительной техники задача – проведены исследования, свидетельствующие о возможности создания мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с уровнем мощности 100-250 МВт и КПД 80% (с электронным КПД 90%).

Материалы диссертационной работы отражены в следующих публикациях.

1. Киеу Хак Фыонг, Петров Д.М., Об оптимизации конструкции и режима питания мощного высокоэффективного многорезонаторного пролётного клистрона. Труды XLVIII научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», Москва – Долгопрудный, 25-26 ноября 2005, часть V, с. 13-15.
2. Киеу Хак Фыонг, Петров Д.М., Возможность повышения КПД мощных и сверхмощных многорезонаторных пролётных клистронов. Научные технологии – Москва: 2006, том.7, № 1, с. 41- 49.
3. Байков А. Ю., Киеу. Ф.Х., Петров Д.М., Компьютерное моделирование мощного релятивистского клистрона трёхсантиметрового диапазона с высоким КПД. Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи

имени А. С. Попова; Серия: научная сессия, посвященная дню радио, Москва, май 2006, с. 301-305.

4. Байков А.Ю., Киеу Хак Фыонг, Петров Д.М., О возможности создания клистрона 3-сантиметрового диапазона с мощностью сотни МВт и электронным КПД 90%. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Саратов, СГТУ, 20-21 сентября 2006 г, с. 106 -115.

Цитируемая литература.

1. Jongewaard E., Caryotakis G., Pearson C., Phillips R. M., Sprehn D. and Vlieks A. Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 2063 - 2065.

2. Sprehn D., Caryotakis G., Jongewaard E., Phillips R. M. and Vlieks A. SLAC-PUB-8346 March 2000.

3. Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М. Физические основы электроники СВЧ – Москва: Советское радио, 1971.

4. Малыхин А. В., Петров Д. М. Лекции по электронике СВЧ и радиоэлектронике – Саратов:1981, кн.6.

5. Малыхин А. В., Петров Д. М. Радиотехника и электроника – Москва: 1979, том.24, № 7, с.1389-1395.

6. Доколин О. А., Кучугурный В. И., Лебединский С. В., Малыхин А. В., Петров Д. М. Известия Вузов МВ и ССО СССР радиоэлектроника – Киев: 1984, том.27, №12, с.47 – 55.

7. Кочетова В. А., Кучугурный В. И., Лебединский С. В., Малыхин А. В., Петров Д. М. Радиотехника и электроника – Москва: 1981, том.26, № 1, с.132-145).

8. Bajkov A.Y., Petrov D.M. Proceedings international university conference “electronics and radiophysics of ultra-high frequencies”. May 1999, St. Petersburg, Russia, p. 5-8.

9. Байков А.Ю., Петров Д.М. Труды докладов LX научной сессии, посвященной Дню радио, Москва, 17-19 мая 2005, с. 165-169.

10. Байков А.Ю. Труды докладов международной научно-практической конференции, Московская финансово-юридическая академия Русский университет инноваций, Москва 2005, с. 76 - 83.