

На правах рукописи

Грушина Ольга Андреевна

ДИСКРЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРУППИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор _____

МОСКВА - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Стриханов Михаил Николаевич, НИЯУ МИФИ

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент
Байков Андрей Юрьевич, МФЮА

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Елизаров Андрей Альбертович, МИЭМ НИУ ВШЭ.

доктор физико-математических наук, профессор
Прус Юрий Витальевич, Академия ГПС МЧС России.

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Московский физико-технический институт
(государственный университет)».

Защита диссертации состоится 12 ноября 2013 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.130.09 в НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31., тел.324-84-98, 323-92-56,
в конференц-зале Главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан 12.10.2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор Леонов А.С.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Область исследований.

Области исследования, к которым относится диссертация, - разработка математических моделей мощных и сверхмощных клистронов, разработка компьютерных программ, моделирующих работу клистронов, а также исследование условий достижения максимально возможного КПД в клистронах.

Мощные многорезонаторные клистроны применяются в радиолокации, дальней и космической радиосвязи, в ускорительной технике (как источники питания ускорителей элементарных частиц).

Перспективные области применения таких приборов - современные промышленные технологии, в том числе, изготовление новых экологически чистых материалов (пеностекло, искусственный песчаник и т. д.), глубокая переработка нефти и др., а также СВЧ-энергетика – передача и трансформация больших уровней мощности, включая космическую передачу энергии.

Актуальность темы.

Широкое применение мощных клистронов в указанных областях сдерживается сравнительно низким их КПД: выпускающиеся узкополосные клистроны имеют КПД не более 60-70%, а широкополосные – не более 30-40%.

Повышение КПД клистронов до предельно возможных значений позволило бы получить большой экономический эффект как в перспективных, так и в традиционных областях их применения.

Трудности увеличения КПД клистронов связаны с тем, что первая часть проектирования клистрона – его математическое моделирование на основе компьютерных программ - приводит к многопараметрической оптимизации и поэтому является очень сложной и затратной задачей.

Для успешного проведения такой оптимизации необходимо, чтобы модель клистрона сочетала высокую адекватность с высокой эффективностью.

На момент начала диссертационной работы была известна достаточно эффективная математическая модель клистрона, названная дискретно-аналитической и основанная на использовании приближенных аналитических решений для описания трансформации электронного пучка на одном пространственном шаге.

В исходной дискретно-аналитической модели влияние пространственного

заряда учитывалось в линейном приближении, что могло приводить к ошибке в расчете КПД в несколько процентов (а в некоторых случаях более 10%). Такая погрешность не позволяла моделировать клистроны с КПД, близким к 100%. Поэтому уточнение влияние пространственного заряда на процесс группирования в рамках дискретно-аналитической модели являлось актуальной задачей.

Корректное описание процесса группирования с учетом пространственного заряда сводится к исследованию продольных конвекционных волн в электронном пучке в узкой трубе как в линейном (малая модуляция плотности), так и в нелинейном (большая модуляция плотности) режимах.

Существующие к моменту начала диссертационной работы математические модели клистрона не позволяли достаточно полно исследовать вопрос о максимальном КПД наиболее простого двухрезонаторного клистрона, в частности, не позволяли исследовать зависимость максимального КПД такого клистрона от его коэффициента усиления.

Для повышения КПД клистрона до значений, близким к 100%, необходимо реализовать определенный режим группирования. Исследование особенностей этого режима приводит к конкретным рекомендациям для проектирования мощных клистронов с высоким КПД.

В целом, решение задачи моделирования процесса группирования электронного пучка в клистроне позволяет проектировать мощные и сверхмощные клистроны с высоким КПД для использования их в перспективных областях науки, техники, промышленности и энергетики.

Решение всех этих задач весьма актуально как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Цель работы заключается

- в создании новой дискретно-аналитической модели трансформации электронного пучка в узкой и длинной трубе;
- в исследовании процесса группирования электронного пучка на основе вычислительных экспериментов с помощью программных комплексов, разработанных на основе этой новой модели;
- в выяснении с помощью вычислительных экспериментов условий достижения максимального КПД в мощных клистромах.

Работа включает в себя решение следующих задач.

1. Вывод нового одномерного уравнения трансформации электронного пучка в узкой трубе в лагранжевых координатах на основе усреднения трехмерных уравнений по радиусу и азимуту, а также исследование полученного уравнения, включая исследование усредненной одномерной функции Грина.
2. Нахождение и исследование общих решений полученного уравнения в линейном приближении (исследование линейных конвекционных волн электронного пучка).
3. Нахождение аналитического решения полученного уравнения в нелинейном приближении для одного шага дискретно-аналитической модели.
4. Реализация полученных решений в виде комплекса компьютерных программ.
5. Исследование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двух- и в трехрезонаторных клистродах.
6. Исследование условий достижения максимального КПД в многорезонаторных клистродах.

Решения поставленных задач можно сформулировать в виде следующих основных научных результатов и научных положений, выносимых на защиту.

Основные научные результаты.

- 1) Получено новое одномерное нестационарное интегро-дифференциальное уравнение трансформации электронного пучка в узкой трубе.
- 2) Исследованы конвекционные волны, распространяющиеся в электронном пучке при произвольном виде возмущения.
- 3) Получены аналитические решения уравнения группирования в приближении замороженного пучка (ПЗП) для одного пространственного шага.
- 4) ПЗП модель реализована в виде новых программных модулей для известного комплекса программ KlypWin.
- 5) С помощью модернизированного комплекса программ проведено исследование
 - а) общей зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двух- и трехрезонаторных клистродах на основе комплекса программ KlypWin в рамках ПЗП модели.

- б) условий достижения максимального КПД многорезонаторных клистронов на основе комплекса программ KlyrWin в рамках ПЗП модели.

Научные положения, выносимые на защиту.

Положение 1.

Процессы продольной трансформации электронного пучка в узкой трубе адекватно описываются одномерным нелинейным волновым интегро-дифференциальным уравнением (основным уравнением группирования), полученным в диссертации.

Положение 2.

Линеаризация основного уравнения группирования позволяет описать формулой Даламбера все продольные конвекционные волны в однородном электронном пучке, движущемся вдоль оси узкой длинной трубы; в частности, результатом короткого импульсного возмущения скорости является распространение по пучку двух коротких импульсных возмущений плотности (разрежения и сжатия).

Положение 3.

Процесс группирования электронного пучка в клистроне может быть адекватно описан в рамках "Приближения замороженного пучка", основанного на предположении о постоянстве плотности в пределах одного пространственного шага дискретно-аналитической модели; комплекс программ на основе такой модели позволяет адекватно и эффективно моделировать мощные многорезонаторные клистроны.

Положение 4.

Зависимость максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистромах при эффективном угле пролета выходного зазора не более 2 rad представляет собой куполообразную кривую с максимумом при коэффициенте усиления 16-18dB, соответствующий максимальный КПД составляет 42-46% (электронный КПД - 44-54%).

Положение 5.

Максимальный КПД в многорезонаторных клистромах достигается при волнообразном характере группирования: центральные частицы сгустка многократно приближаются к центру группирования, а затем удаляются от него, периферийные частицы при этом монотонно приближаются к центру сгустка; такой режим

достигается при увеличенной длине группирования, в частности, для семирезонаторного клистрона дециметрового диапазона повышение КПД от 70% до 90% достигается при увеличении длины группирования более чем в 2 раза.

Научная новизна работы

- Впервые получено одномерное нелинейное волновое интегро-дифференциальное уравнение, описывающее трансформацию электронного пучка в узкой длинной трубе.
- Впервые исследованы все типы продольных конвекционных волн для электронного пучка в узкой трубе, включая не изученные ранее непериодические волны.
- Впервые найдены общие зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистронах.
- Найдено новое приближенное аналитическое решение для трансформации электронного пучка в узкой трубе на одном пространственном шаге в приближении постоянства плотности (приближение замороженного пучка).
- Установлены новые особенности процесса группирования, обеспечивающего КПД 90%; показано, что этот процесс должен носить волнообразный пульсирующий характер.

Достоверность научных положений, результатов и выводов основана на применении корректных математических моделей, сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными.

Личный вклад автора: все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. В совместных публикациях личный вклад автора составляет не менее 70%. Вклад научного руководителя и научного консультанта в указанных работах заключается, в основном, в постановке задач, в указании возможных методов их решения, в обсуждении и анализе полученных результатов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на конференциях МИФИ (2010-2012), на LXV научной сессии НТО РЭС им.А.С. Попова, посвященной Дню радио (2010), на Всероссийской научно-практической конференции МИЕСЭКО (2009-2012), на 14 Международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и

студентов "Молодежь и наука" (2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций и семинаров, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Конкурсы и гранты.

- Победитель конкурса на получение Стипендии Президента РФ (СП-2012)
- Победитель в конкурсе ФЦП «Кадры», мероприятие 1.3.2 «целевые аспиранты» (протокол №1/47/3 от 31.08.2012)
- Диплом конкурса молодежных проектов в рамках XIV Международной телекоммуникационной конференции «Молодежь и наука», МИФИ, 2011 г.
- Победитель в конкурсе «Молодой преподаватель НИЯУ МИФИ» 2011-2012.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 151 стр., состоит из 82 рисунков, 3 таблиц, введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 81 наименования. Главы делятся на разделы, большие разделы - на параграфы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализировано состояние области исследований, дано обоснование актуальности работы, сформулирована цель и постановка задачи, приведены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание глав диссертации.

В главе 1 выведено основное уравнение трансформации электронного пучка в узкой трубе, представляющее собой одномерное нестационарное интегро-дифференциальное уравнение, записанное в лагранжевой системе координат.

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\beta_{rel} \frac{e}{m} \int_{-\infty}^{\infty} G(u) \cdot \frac{\partial}{\partial z} \rho(z+u, t) du, \quad (1)$$

где

$$G(u) = \frac{2r_T}{\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\sigma_k |u|}{r_T}\right) \cdot \left(\frac{J_1(\sigma_k \alpha)}{J_1(\sigma_k)}\right)^2 \frac{1}{\sigma_k^3}, \quad (2)$$

z - координата усредненной частицы, t - время, $\beta_{rel} = \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}$, v_0 -

невозмущенная (средняя) скорость пучка, c - скорость света, e - заряд электрона, m - масса электрона, ρ - самосогласованная плотность заряда, $\varepsilon_0 = 8.9 \cdot 10^{-12}$ [F/m] – диэлектрическая постоянная, r_T – радиус трубы, α – отношение радиуса пучка к радиусу трубы (коэффициент заполнения), J_k – k -ая функция Бесселя, σ_k – k -ый корень функции Бесселя J_0 .

Самосогласованная плотность заряда ρ выражается через координаты частиц либо на основе дифференциального закона сохранения заряда (при отсутствии обгона), либо с помощью разложения в ряд Фурье (в общем случае периодического возмущения).

Усредненная одномерная функция Грина (2), представляющая ядро интегрального оператора (правая часть уравнения (1)), записана в виде ряда. В параграфе 1.3 проведено подробное исследование этой функции и показано, что ряд может быть с большой точностью приближен суммой небольшого числа первых слагаемых. В главе рассмотрены также возможные варианты упрощения исходного уравнения на основе разложений плотности в ряды Тейлора и Фурье.

В главе 2 проведена линеаризация уравнения (1) в приближении малой модуляции по скорости однородного пучка. Показано, что в этом приближении уравнение преобразуется в волновое уравнение, решение которого можно записать по формуле Даламбера.

$$z_{per}(t, t_0) = \frac{1}{2\Omega_p} \int_{t_0 - \Omega_p t}^{t_0 + \Omega_p t} v_{per1}(s) ds, \quad (3)$$

где $z_{per}(t, t_0)$ - отклонение усредненной частицы от невозмущенного положения, t_0 - время прохождения частицы через начальную плоскость (лагранжева переменная, идентифицирующая частицу), v_{per1} - начальное возмущение скорости,

$$\Omega_p^2 = \beta_{rel} \frac{e}{m} \frac{j_0}{v_0^3} \frac{4r_T^2}{\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{J_1(\sigma_k \alpha)}{J_1(\sigma_k)} \right)^2 \frac{1}{\sigma_k^4}. \quad (4)$$

На основе полученного решения (3) исследуются конвекционные волны, получающиеся в результате различных возмущений однородного пучка. В частности, в результате синусоидального возмущения получается стоячая конвекционная волна, что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее другими авторами. Для других типов возмущений получают качественно иные результаты. Так, для возмущения

скорости в виде короткого импульса решение представляет собой 2 импульса плотности (разрежения и сжатия), распространяющиеся вдоль пучка, причем скорость импульса сжатия оказывается выше скорости пучка, а скорость импульса разрежения ниже скорости пучка.

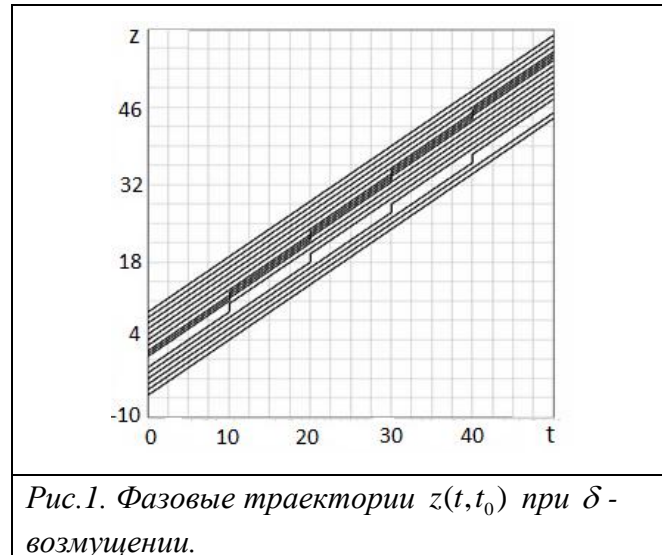


Рис.1. Фазовые траектории $z(t, t_0)$ при δ -возмущении.

На рис.1 концентрация фазовых траекторий (темная полоса) соответствует волне сжатия, а светлая полоса соответствует волне разрежения. На рис.2,3 представлены "мгновенные фотографии" таких волн в фиксированный момент времени.

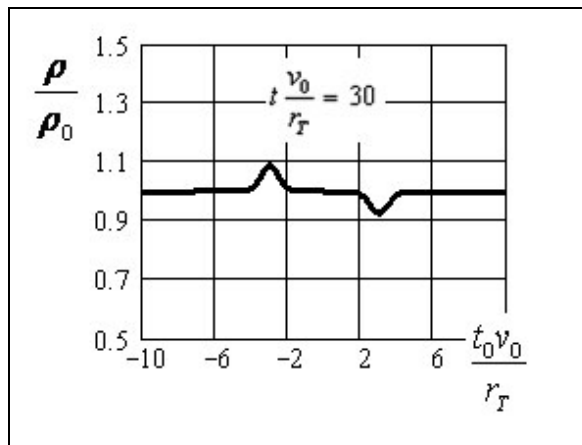


Рис.2. Плотность заряда пучка в зависимости от t_0 в фиксированный момент времени после воздействия локального возмущения.

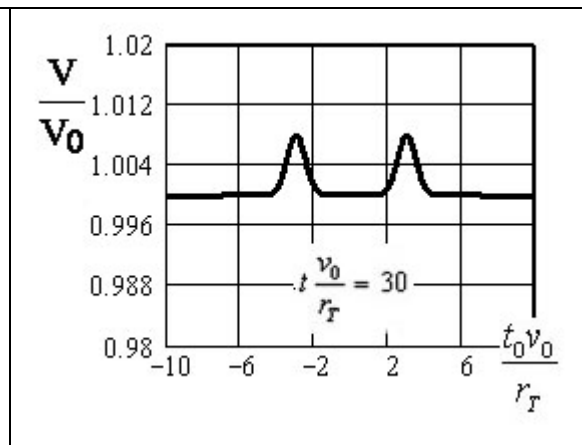


Рис.3. Скорость пучка в зависимости от t_0 в фиксированный момент времени после воздействия локального возмущения.

Следует отметить, что ранее такие конвекционные волны (быстрая и медленная волна пространственного заряда) рассматривались другими авторами только как результат гармонических возмущений.

В главе 3 получено решение основного уравнения в приближении замороженного пучка (ПЗП). Выведены различные формы решения, в том числе, запись функции прибытия с помощью итерационного метода Ньютона и явное аналитическое выражение для функции прибытия через частичную сумму ряда по степеням пространственного шага.

$$\begin{aligned}
\Delta t = & \frac{1}{v_1} \Delta z + \frac{1}{4} \Phi'_n(\xi_1) \frac{v_0^2}{v_1^3 v_{01}} \omega \Omega_p^2 \Delta z^2 + \\
& + \left(\frac{1}{8} \frac{v_0^4}{v_{01}^2 v_1^5} \omega^2 \Omega_p^4 \Phi'_n(\xi_1) + \frac{1}{12} \frac{v_0^2 (v_1 - v_{01})}{v_{01}^2 v_1^4} \omega^2 \Omega_p^2 \Phi''_n(\xi_1) \right) \Delta z^3 + \\
& + \left(\frac{5}{48} \Phi'_n(\xi_1) \Phi''_n(\xi_1) \omega^3 \Omega_p^4 \frac{v_0^4 (v_1 - v_{01})}{v_{01}^3 v_1^6} - \frac{1}{96} \Phi'_n(\xi_1) \Phi''_n(\xi_1) \omega^3 \Omega_p^4 \frac{v_0^4}{v_{01}^3 v_1^5} + \right. \\
& \left. + \frac{5}{4} \omega^3 \Omega_p^5 \frac{v_0^6}{v_{01}^3 v_1^7} \Phi_n^{(3)}(\xi_1) \right) \Delta z^4 + \\
& + \left(-\frac{1}{64} \Phi_n^{(2)2}(\xi_1) \Phi''_n(\xi_1) \omega^4 \Omega_p^6 \frac{v_0^6}{v_{01}^4 v_1^7} + \frac{3}{144} \Phi_n^{(2)2}(\xi_1) \omega^4 \Omega_p^4 \frac{v_0^4 (v_1 - v_{01})^2}{v_{01}^4 v_1^7} + \right. \\
& + \frac{14}{256} \Phi_n^{(4)}(\xi_1) \frac{v_0^8}{v_1^9 v_{01}^4} \omega^4 \Omega_p^8 - \frac{1}{480} \Phi_n^{(2)2}(\xi_1) \omega^4 \Omega_p^4 \frac{v_0^4 (v_1 - v_{01})}{v_{01}^4 v_1^6} + \\
& \left. + \frac{21}{192} \Phi_n^{(2)2}(\xi_1) \Phi''_n(\xi_1) \omega^4 \Omega_p^6 \frac{v_0^6 (v_1 - v_{01})}{v_{01}^4 v_1^8} \right) \Delta z^5, \quad (5)
\end{aligned}$$

где Δt - приращение функции прибытия на пространственном шаге, Δz - величина пространственного шага, ω - СВЧ-частота, $v_1(t_0)$ - скорости усредненных при $z = z_1$ (т.е. на начальной плоскости шага), v_{01} - среднее значение функции $v_1(t_0)$, $\xi_1 = \frac{\omega z_1}{v_{01}} - \omega t_1(t_0)$ - переменная бегущей волны, $t_1(t_0)$ - функция прибытия для начальной плоскости шага, $\Phi(\xi_1)$, - потенциальная функция, выражающаяся через гармоники плотности на начальной плоскости шага.

В выражении (5) оставлено 5 членов ряда, показано, что вклад отброшенных членов более высокого порядка не превышает 10^{-5} .

ПЗП-решения протестированы на задачах о рассеянии моноскоростного сгустка и о КПД двухрезонаторного клистрона с бесконечно тонкими зазорами.

В главе 4 проведено исследование зависимости максимального КПД η от коэффициента усиления K_u в двухрезонаторных клистронах, смоделированных на

основе пяти реальных прототипов, а также в одном трехрезонаторном клистроне. Расчеты проводились с помощью разработанного ранее под руководством Байкова А.Ю. комплекса программ KlypWin, в который были встроены ПЗП-решения в виде соответствующих программных модулей. Каждая точка зависимости $\eta(K_u)$ получалась как результат многомерной оптимизации на основе методов зондирования и перебора с масштабированием. Как оказалось, все найденные зависимости имеют вид куполообразных кривых с максимумом в области 17-18dB (рис.4).

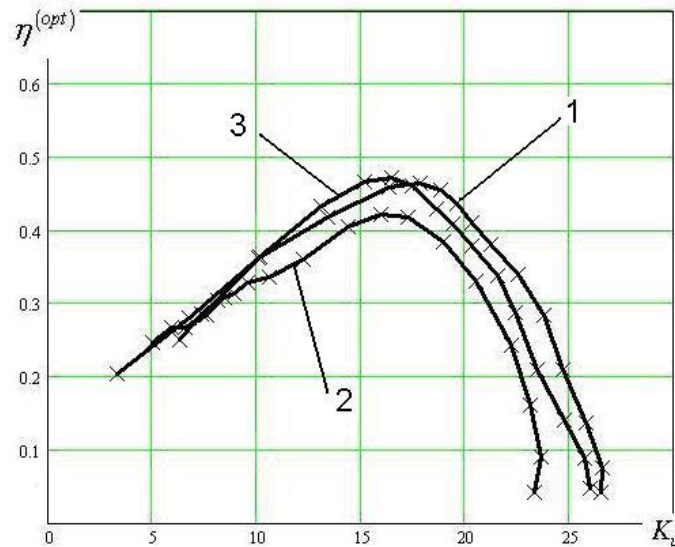


Рис.4. Зависимости максимального КПД от коэффициента усиления (dB) в двухрезонаторных клистронах, смоделированных на основе трех различных прототипов.

Максимальный электронный КПД для рассматриваемых приборов составил 40-50%, максимальный КПД в нагрузку - от 27 до 46%. Для трехрезонаторного клистрона аналогичная зависимость была получена для заданной фиксированной полосы усиления. Максимальный КПД составил 72%, соответствующий коэффициент усиления оказался равным примерно 25dB.

В главе 5 проведено исследование условий достижения максимального КПД в многорезонаторных клистронах.

В разделе 5.1 последовательно смоделированы четырех-, пяти-, шести- и семirezонаторные клистроны с максимальным КПД на основе одного реального прототипа (частота 706MHz, мощность пучка 40kW, 7 лучей). Показано, что максимальный КПД в нагрузку четырехрезонаторного клистрона составляет 83%, пятирезонаторного - 86%, шестирезонаторного - 88%, семirezонаторного - 90%.

Соответствующие электронные КПД равны 87%, 90%, 92%, 94%. Показано, что такие значения КПД могут быть достигнуты только при волнообразном характере группирования, при котором в каждой трубе дрейфа частицы сначала приближаются к центру сгустка, а затем удаляются от него. Это возможно только в том случае, если суммарная длина труб дрейфа достаточно велика.

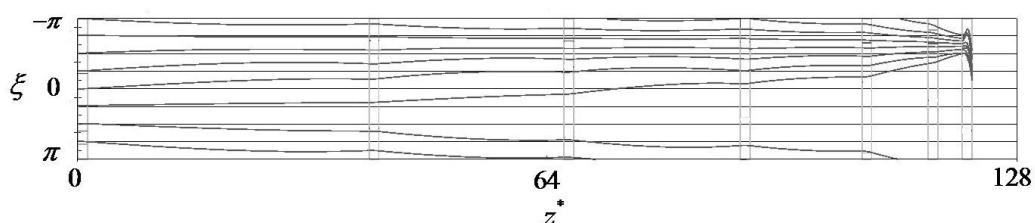


Рис.5. Фазовые траектории семирезонаторного клистрона с КПД 89.4%.

Показано, что приведенная длина группирования должна составлять для четырехрезонаторного клистрона не менее 3.5, для пятирезонаторного клистрона не менее 4.6, для шестирезонаторного клистрона не менее 5.7, для семирезонаторного - не менее 6.9. На рис.5 представлены фазовые траектории - зависимость безразмерного отклонения ξ частиц пучка от безразмерной продольной координаты z^* . Как видно из рисунка, фазовые траектории имеют ярко выраженный пульсирующий характер.

В разделе 5.2 исследованы условия достижения максимального КПД в семирезонаторном клистроне с мощностью пучка 8.5MW и с рабочей частотой 991MHz, смоделированном на основе реального прототипа, предназначенного для питания ускорителей. Показано, что для увеличения КПД в нагрузку до 87% (что соответствует электронному КПД около 90%) также необходимо реализовать волнообразный характер группирования, увеличив длину группирования в 1.6-1.8 раз по сравнению с прототипом. Оптимальная приведенная длина группирования составила 5.5-6.

Отметим, что увеличение КПД не приводит к уменьшению полосы усиления, которая для данного прибора составляет 6% по уровню 3dB (см. рис.6).

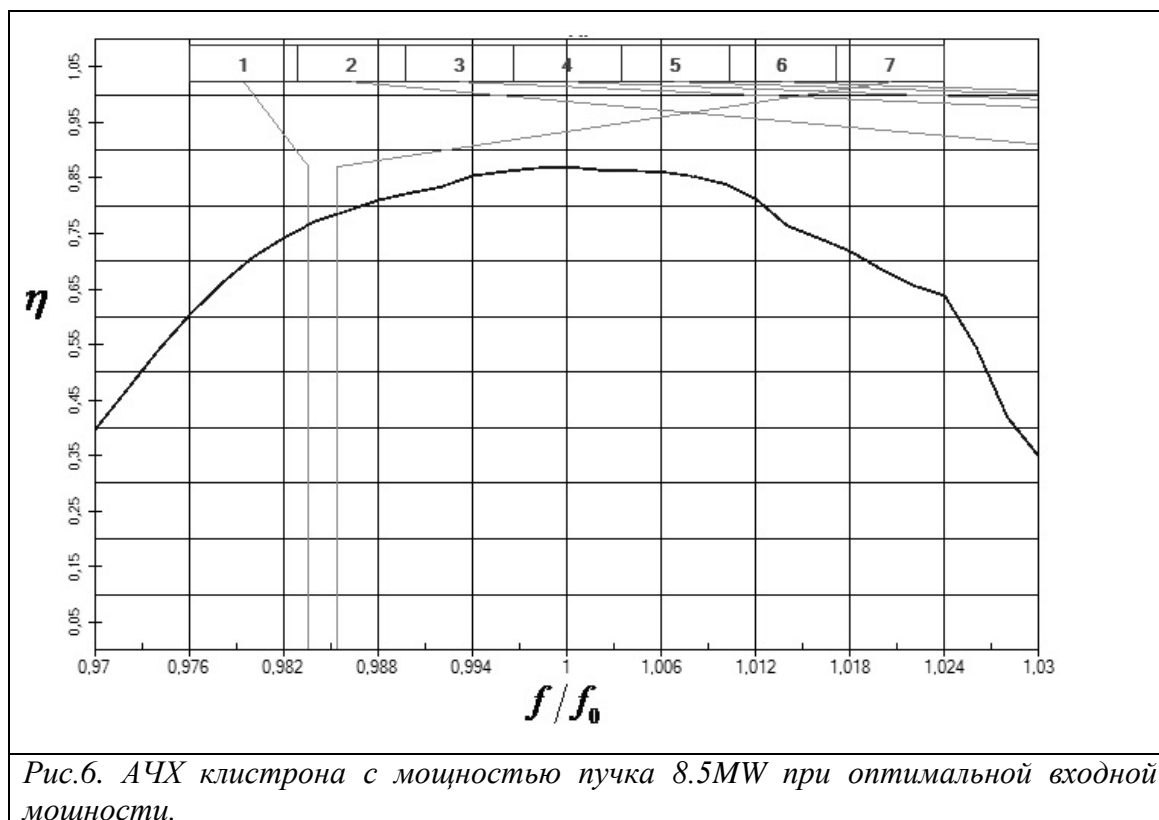


Рис.6. АЧХ клистрона с мощностью пучка 8.5MW при оптимальной входной мощности.

Основные выводы.

Таким образом, решена важная и актуальная задача: разработка дискретно-аналитической модели группирования и исследование на ее основе условий достижения максимального КПД в клистронах.

В процессе решения этой задачи проведены следующие исследования.

1. Выведено и проанализировано одномерное нестационарное интегро-дифференциальное уравнение трансформации электронного пучка в узкой трубе. Уравнение получено в лагранжевых координатах и интерпретировано как уравнение движения "усредненных частиц". Исследованы свойства усредненной одномерной функции Грина, а также возможные способы нахождения приближенных аналитических решений полученного уравнения. Результаты этих исследований доказывают первое научное положение, выносимое на защиту.
2. Проведена линеаризация исходного интегро-дифференциального уравнения и исследовано его общее решение в линейном приближении. Показано, что это решение имеет вид конвекционных волн в лагранжевой системе координат. Исследованы различные виды этих волн, включая не изученные ранее,

например, непериодическое возмущение в виде короткого импульса. Показано, что все рассмотренные возмущения представляются в виде суперпозиции двух волн, форма каждой из которых определяется формой начального возмущения. Результаты исследования линейных конвекционных волн в электронном пучке доказывают второе научное положение, выносимое на защиту.

3. Построено аналитическое решение исходного интегро-дифференциального уравнения в приближении постоянства плотности в пределах одного пространственного шага (приближение замороженного пучка, ПЗП). Получены различные виды этого решения на основе итерационного метода Ньютона и на основе разложения в ряд по величине пространственного шага. Приближение замороженного пучка вынесено на защиту в виде второго научного положения.
4. Разработаны и встроены в комплекс программ KlypWin программные модули, реализующие ПЗП модель. Проведено тестирование ПЗП модели на основе моделирования клистронов с известными характеристиками.
5. Исследованы общие зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двух- и трехрезонаторных клистронах на основе модернизированного комплекса программ KlypWin в рамках ПЗП модели. Исследовалось 5 двухрезонаторных клистронов, построенных на основе реальных прототипов. Показано, что при эффективном угле пролета выходного зазора не более 2 rad эти зависимости имеют универсальный характер: кривая характеризуется единственным нерезким максимумом при 17-18 dB, максимальный КПД в нагрузку составляет 42-46%. Для одного трехрезонаторного клистрона, также смоделированного на основе реального прототипа, получены аналогичные кривые для заданной полосы усиления (максимальный КПД в полосе и минимальный КПД в полосе). Показано, что эти кривые также характеризуются единственным максимумом при коэффициенте усиления примерно 25 dB. Максимальный КПД трехрезонаторного клистрона составляет 73%. Полученные результаты доказывают третье научное положение, выносимое на защиту.
6. На основе последовательного добавления каскадов к смоделированному трехрезонаторному клистроноу с максимальным КПД получены модели четырех-, пяти-, шести- и семirezонаторных клистронов с максимальным КПД. Показано, что максимальный КПД достигается при волнообразном характере

группирования: в каждой трубе дрейфа частицы сначала сходятся, а затем расходятся. Такой процесс позволяет собрать все частицы (включая периферийные) в достаточно короткий сгусток. Показано, что максимальный КПД в нагрузку четырехрезонаторного клистрона составляет 83%, пятирезонаторного 86%, шестирезонаторного 88%, семирезонаторного 90%. Их электронные КПД составляют соответственно 87%, 90%, 92% и 94%. Показано, что полоса усиления смоделированных клистронов составляет 0.7-0.8% по уровню 1dB. Для прототипа с мощностью пучка 8.5MW и частотой 991MHz смоделированы клистроны, способные работать в квазинепрерывном режиме с КПД 87%. Для реализации такого характера группирования необходимо существенно увеличить длину группирования примерно в 1.6-1.8 раз по сравнению с прототипом. При этом также получается пульсирующий волнообразный характер группирования. Полученные результаты доказывают четвертое научное положение, выносимое на защиту.

Результаты работы опубликованы в 13 научных статьях [1]-[13], доложены на 11 всероссийских и международных научных конференциях, отмечены Дипломом конкурса молодежных проектов в рамках XIV Международной телекоммуникационной конференции «Молодежь и наука», МИФИ, 2011 г.

По направлению работы были выиграны конкурс грантов ФЦП «Кадры», мероприятие 1.3.2 «целевые аспиранты» (Соглашение № 14.132.21.1430) и конкурс на получение Стипендии Президента РФ (СП-2012).

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах из списка ВАК.

1. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Математическая модель трансформации электронного пучка в узкой трубе. ЖТФ, 2012, том 82, вып. 6., С. 90 – 100.
2. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Исследование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистронах. ЖТФ, 2013, Т. 83, вып.4, с.127-133.
3. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Моделирование условий достижения максимального КПД в клистронах дециметрового диапазона. ЖТФ, 2014, том 84, вып.3.

Публикации в других журналах и в материалах конференций.

4. Байков А. Ю., Грушина О. А. Реакция электронного пучка в узкой трубе на полигармонические и непериодические возмущения // Математика, информатика, естествознание в экономике и в обществе / Труды международной научно-практической конференции. Том 1 – М.: МФЮА, 2009. – стр.97-100. ISBN 978 – 5 – 94811 – 139 – 1. Электронная версия: <http://conf.mfua.ru>
5. Байков А. Ю., Грушина О. А. Распространение продольных возмущений интенсивного электронного пучка в узкой трубе // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов в 3-х томах. Т.2. Нанofизика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. М: НИЯУ МИФИ, 2010. – с. 329.
6. Байков А.Ю., Грушина О.А. Аналитическое решение задачи группирования электронного пучка в режиме большой модуляции плотности. // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова. Серия: научная сессия, посвященная Дню радио. Выпуск LXV, М: 2010, с.339-342
7. Байков А.Ю., Грушина О.А. Исследование процесса группирования электронного пучка в клистроне на основе ПЗП-решения. // Математика, информатика, естествознание в экономике и в обществе/ Труды всероссийской научно-практической конференции. - М.: МФЮА, 2010. - стр.132-138. ISBN 978-5-94811-118-6. Электронная версия: <http://conf.mfua.ru>
8. Грушина О.А. О возможности моделирования мощных клистронов со сверхвысоким КПД. // Тезисы докладов XIV Международной телекоммуникационной конференции студентов и молодых ученых "Молодежь и наука", ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С.101.
9. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Влияние пространственного заряда на процесс группирования в клистроне в рамках "приближения замороженного пучка". //Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА, 2012, № 1. С.68-77. ISSN 2224-669X
10. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Компьютерное моделирование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в

двухрезонаторном клистроне //Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА, 2012, № 1. С.77-84. ISSN 2224-669X.

11. Байков А. Ю., Грушина О. А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Моделирование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в сверхмощном импульсном двухрезонаторном клистроне сантиметрового диапазона // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннотации докладов в 3-х томах. Т.3. Конференция "Методы математической физики и математическое моделирование физических процессов". Секция "Математическое моделирование физических процессов"- М: НИЯУ МИФИ, 2012. – с. 155
12. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Решение уравнения группирования интенсивного электронного пучка в узкой трубе методом кинематического шага. //Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА, 2013, № 1. С. ISSN 2224-669X.
13. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Моделирование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в трехрезонаторном клистроне дециметрового диапазона. //Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА, 2013, № 1. С.110-118. ISSN 2224-669X.