

Моделирование условий достижения максимального КПД в клистронах дециметрового диапазона

© А.Ю. Байков,² О.А. Грушина,¹ М.Н. Стриханов¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ),
115409 Москва, Россия

e-mail: obkv@mail.ru

² Московский финансово-юридический университет (МФЮА),
117447 Москва, Россия

e-mail: baikov.a@mfua.ru; a_yu_baikov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.)

На основе разработанной авторами математической модели трансформации электронного пучка в узкой трубе и комплекса программ KlypWin исследованы условия достижения максимального КПД в клистронах дециметрового диапазона, имеющих от трех до шести каскадов усиления. Рассматриваемые клистроны смоделированы на основе реальной электронно-оптической системы и реальных параметров резонаторов. Показано, что максимальный КПД (в нагрузку) для четырехрезонаторного клистрона составляет 83%, для пятирезонаторного — 86%, для шестирезонаторного — 88%, для семирезонаторного — 90%. Соответствующий электронный КПД смоделированного семирезонаторного клистрона составил 94%, что позволяет говорить о достижении глобального экстремума.

Введение

Основные области применения мощных многорезонаторных клистронов [1] — это радиолокация, дальняя и космическая радиосвязь, питание 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.

Широкое применение мощных клистронов в этих областях сдерживается их сравнительно низким КПД. И теоретически, и экспериментально было показано [2,3], что возможен режим работы клистрона с КПД, близким к 100%. Фактически же выпускающиеся узкополосные клистроны имеют КПД не более 60–70%, а широкополосные — не более 30–40%.

Вопрос о повышении КПД пролетных клистронов рассматривался во многих работах (см., например, [4]). Однако усилия специалистов пока не привели к возможности синтеза мощных клистронов с заранее заданным высоким КПД.

Это объясняется тем, что первая часть проектирования клистрона — его математическое моделирование на основе компьютерных программ — является очень сложной и затратной задачей. Например, у семирезонаторного клистрона 6 труб дрейфа, 7 собственных частот и 7 добротностей, т.е. всего 20 параметров. Для того чтобы получить максимальный КПД, необходимо провести оптимизацию по всем этим параметрам, что выливается в огромный объем вычислений. Если использовать численную модель клистрона, то такой объем вы-

числений оказывается не под силу даже самым мощным ЭВМ. Поэтому при проектировании реальных приборов исходят из некоторой заданной конструкции или из прототипа (т.е. из фиксированного набора указанных параметров) и далее проводят оптимизацию, изменяя эти параметры в небольшом диапазоне. Такой подход приводит к тому, что исследуются только небольшие локальные области многомерного пространства параметров, причем каждая из этих областей далека от области глобального экстремума, соответствующей максимальному КПД для клистрона с заданным количеством каскадов усиления.

Разработанные авторами дискретно-аналитическая модель клистрона [5,6] и программа KlypWin [6,7] на ее основе позволяют проводить оптимизацию в сравнительно больших областях пространства параметров, что, в свою очередь, позволяет ставить и решать задачу поиска глобального максимума КПД клистрона.

Максимально возможный КПД клистрона зависит от количества каскадов усиления. В работе [8] исследована зависимость максимального КПД от коэффициента усиления для нескольких однокаскадных (двухрезонаторных) клистронов, построенных на основе реальных прототипов. В частности, для дециметрового клистрона показано, что максимальный КПД составляет 46% и достигается при коэффициенте усиления 17–18 dB. В работе [9] исследована аналогичная зависимость для трехрезонаторного клистрона, построенного на основе того же прототипа, и показано, что максимальный КПД составляет 73% и достигается при коэффициенте усиления 25 dB.

В настоящей работе исследуются условия достижения максимального КПД для клистронов, построенных на основе этого же прототипа с последовательно увеличивающимся числом резонаторов от 4 до 7.

Таблица 1. Основные параметры исследуемого клистрона

f_0 , GHz	U_0 , kV	I_0 , A	N_b	d_T , mm	l_g , mm	ρ , Ω	Q_0
0.71	15	2.8	7	14	14.3	70	1500

1. Постановка задачи

Параметры прототипа приведены в табл. 1, где f_0 — рабочая частота, U_0 — ускоряющее напряжение, I_0 — суммарный ток всех лучей пучка, N_b — число лучей, d_T — диаметр труб дрейфа, l_g — величина зазоров резонаторов, ρ — характеристическое сопротивление резонаторов, Q_0 — собственные добротности резонаторов.

Параметры, приведенные в табл. 1, считаются заданными и неизменными. Все же остальные параметры изменятся в процессе оптимизации. Собственные добротности резонаторов считаются неизменными, так как предполагается, что все промежуточные резонаторы должны быть отстроены за полосу. Справедливость такого предварительного ограничения подтвердилась в ходе дальнейших расчетов.

Оптимизация проводилась в следующем порядке.

1. Задавался число каскадов n и выбирался исходный вариант на основе оптимизированного $(n - 1)$ -каскадно-го прибора.

2. Проводилась оптимизация по всем свободным параметрам: по всем длинам труб дрейфа, по всем расстройкам (относительным отклонениям собственных частот резонаторов от рабочей частоты), по нагруженным добротностям первого и последнего резонаторов, по входной мощности.

Схема оптимизации для двухрезонаторных и трехрезонаторных клистронов описана соответственно в [8,9]. Эта же схема сохраняется и для многорезонаторных клистронов.

В качестве основных методов оптимизации использовались метод зондирования [10,11] и метод перебора с масштабированием [12], которые позволяют оптимизировать алгоритмически заданную целевую функцию с некорректными точками. Под „некорректными точками“ при этом понимаются такие наборы значений параметров, при которых расчет КПД не дает корректного численного результата. Это происходит, например, при возникновении отражения частиц в выходном резонаторе, при отсутствии сходимости итераций и т.д.

Еще одной важной особенностью таких методов оптимизации является возможность их использования в задачах с большим количеством локальных экстремумов. В рассматриваемых задачах количество локальных экстремумов очень велико и может достигать $10^{12} - 10^{14}$, что делает неэффективным использование большинства традиционных методов оптимизации.

В настоящей работе не ставится задача получения большой полосы усиления, но, как будет показано результатами расчетов, увеличение КПД до предельных

значений происходит в некоторой „естественной“ полосе усиления, сужение этой полосы является признаком ухода от глобального экстремума. Поэтому оптимизация проводилась не на одной частоте, а в некоторой узкой полосе, равной 0.2%. Использовались два вида целевых функций: минимальный КПД в заданной полосе и минимальный КПД с ограничением асимметрии АЧХ.

При исследовании процессов группирования одним из ключевых параметров является длина группирования, т.е. суммарная длина всех труб дрейфа:

$$l_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (1)$$

где n — количество каскадов усиления.

Так как процесс группирования зависит не от геометрической длины, а от фазовой длины, выраженной в радианах СВЧ-поля (далее будем использовать обозначение rad), и, кроме того, на этот процесс существенно влияет величина пространственного заряда, то вместо длины группирования будем далее в качестве ключевого параметра использовать приведенную длину группирования

$$l_{\Omega} = \Omega_p \frac{\omega}{v_0} l_{\Sigma}, \quad (2)$$

где Ω_p — параметр пространственного заряда [5], ω — частота СВЧ-поля, v_0 — невозмущенная скорость пучка.

Использование такого безразмерного параметра позволяет сравнивать между собой результаты, полученные для различных приборов.

При моделировании клистронов со значениями КПД, близкими к предельным, возрастают требования к точности модели. Критерием достаточной точности при этом является неизменность результата при дальнейшем ее повышении. Экспериментальным путем было установлено, что для оптимизации клистронов с электронным КПД до 94% достаточная точность обеспечивается при следующих параметрах модели: количество усредненных частиц 128 на период; количество парциальных зазоров 9 для входного и промежуточного резонаторов, 17 для выходного резонатора; шаг по координате 0.2 rad ; допустимая погрешность итераций по СВЧ-напряжению 0.0001. После проведения оптимизации при контрольных расчетах точность еще дополнительно увеличивалась: количество парциальных зазоров 65 для всех каскадов, шаг по координате 0.05 rad .

2. Оптимизация четырехрезонаторного клистрона

Исходный вариант четырехрезонаторного клистрона строился на основе полученного ранее оптимального трехрезонаторного клистрона [9] с длиной группирования 68 см (приведенная длина группирования 2.17) и с КПД 73%. В трехрезонаторном клистроне был продублирован второй каскад усиления и уменьшена входная

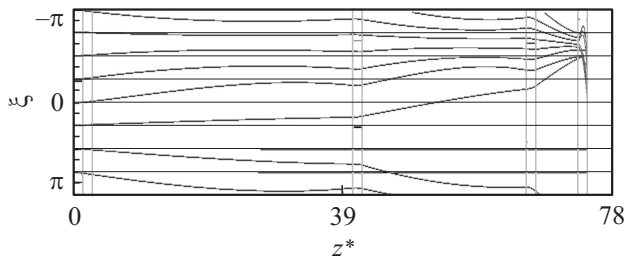


Рис. 1. Фазовые траектории четырехрезонаторного клистрона с КПД 83%.

мощность до оптимального значения, определяемого по амплитудной характеристике.

Далее полученный вариант оптимизировался по десяти параметрам: по трем длинам труб, по четырем расстройкам резонаторов, по нагруженным добротностям входного и выходного резонаторов и по входной мощности.

Как показали результаты расчетов, для любой приведенной длины группирования в диапазоне от 2.17 до 3.56 получается оптимальный вариант прибора с КПД в диапазоне от 73% до 83%. Максимальный КПД получается при приведенной длине группирования 3.56 и составляет 83%.

Рассмотрим процесс группирования в оптимальном четырехрезонаторном клистроне. На рис. 1 показаны фазовые траектории — зависимость безразмерного отклонения частиц пучка $\xi = \omega t(z, t_0) - \frac{\omega z}{v_0}$ от безразмерной координаты $z^* = \frac{\omega z}{v_0}$ вдоль пучка [8], где z — координата вдоль пучка, $\omega = 2\pi f$ — частота СВЧ-поля, v_0 — невозмущенная скорость пучка, t_0 — лагранжева координата, $t(z, t_0)$ — функция прибытия частиц [5]. Далее символом $*$ будем обозначать безразмерные координату, время и скорость, т.е. кроме z^* будем использовать переменные $t^* = \omega t$, $t_0^* = \omega t_0$ и $v^* = \frac{v}{v_0}$.

Для достижения максимального КПД необходимо собрать все частицы в достаточно короткий сгусток в плоскости влета в выходной зазор. Обозначим через t_{0C}^* безразмерную лагранжеву координату частицы, соответствующей центру сгустка в этой плоскости. Для получения КПД, близкого к 100%, необходимо, чтобы в сгусток попали все частицы, в том числе и периферийные частицы с лагранжевыми координатами, близкими к координатам $t_{+\pi}^* = t_{0C}^* + \pi$ и $t_{-\pi}^* = t_{0C}^* - \pi$. Именно недогруппировка этой периферийной части периода является главным препятствием получения высокого КПД, так как недогруппированные частицы (не попавшие в сгусток) неизбежно попадают в ускоряющую фазу СВЧ-напряжения в выходном зазоре и, следовательно, вносят отрицательный баланс в обмен энергией между пучком и СВЧ-полем. Но периферийным частицам для попадания в сгусток нужно получить гораздо большее относительное смещение, чем центральным частицам, близким к t_{0C}^* . Это возможно только в случае немонотонного характера группировки, при котором централь-

ные частицы в процессе группировки сначала приближаются к центру сгустка, а потом удаляются от него. Периферийные частицы при этом должны все время приближаться к центру сгустка. Такой процесс возможен только на основе влияния пространственного заряда на процесс группировки. Действительно, силы пространственного заряда отталкивают частицы от центра сгустка, но эти силы быстро убывают по мере удаления от сгустка [5]. Поэтому частицы, близкие к центру сгустка, могут испытывать достаточно сильное расталкивание, которое будет приводить к разгруппировке центральной части сгустка. Периферийные же частицы будут двигаться практически в кинематическом режиме, почти не испытывая влияния пространственного заряда.

Приведенные качественные рассуждения полностью подтверждаются результатами расчетов. Как видно из структуры фазовых траекторий (рис. 1), и в первой, и во второй трубах дрейфа происходит именно такой процесс: центральные частицы сгустка сначала сходятся и после этого начинают расходиться, периферийные же продолжают приближаться к сгустку. В результате на входе в третий зазор сгусток имеет следующую структуру: центральная часть является разлетающейся, а периферийная — слетающей. Далее этот сгусток подвергается группирующему воздействию СВЧ-напряжения третьего резонатора. Амплитуда СВЧ-напряжения в этом резонаторе должна быть достаточно большой, для того чтобы преодолеть расталкивающие кулоновские силы

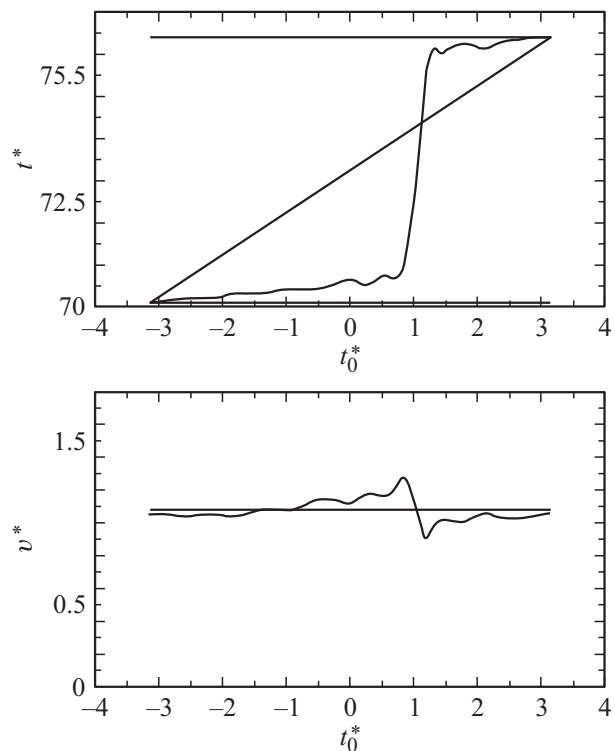


Рис. 2. Функция прибытия t^* (t_0^*) и распределение скоростей частиц v^* (t_0^*) на входе в зазор выходного резонатора четырехрезонаторного клистрона с КПД 83%.

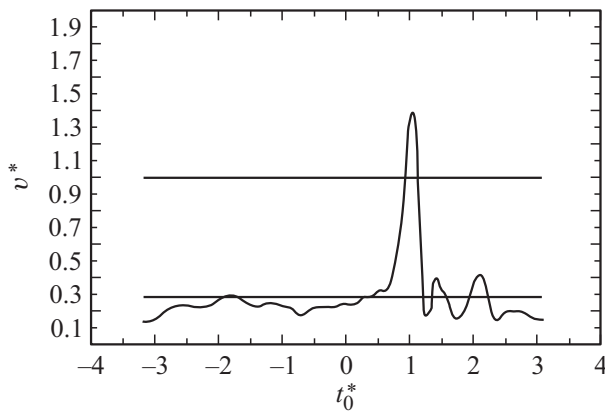


Рис. 3. Распределение скоростей частиц v^* (t_0^*) на выходе из зазора выходного резонатора четырехрезонаторного клистрона с КПД 83%.

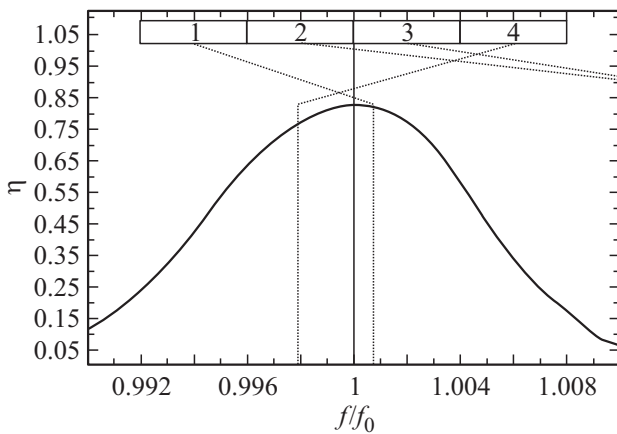


Рис. 4. АЧХ четырехрезонаторного клистрона с КПД 83%.

центральной части сгустка. Поэтому третий резонатор не может быть отстроен слишком далеко за полосу. Таким образом, для достижения максимального КПД в четырехрезонаторном клистроне получается обратная схема настроек резонаторов: расстройка третьего меньше, чем расстройка второго.

К моменту влета в выходной зазор периферийная часть сгустка остается слетающей (рис. 2), что обеспечивает догруппировку пучка в выходном зазоре в процессе отбора энергии. В результате после прохождения выходного зазора почти все частицы периода тормозятся до скорости, близкой к величине $v_{out} \approx 0.2v_0$ (рис. 3). Некоторая доля периода шириной примерно 0.5rad попадает в ускоряющую фазу и увеличивает скорость. Эта доля соответствует доле недогруппированной периферийной части периода на рис. 2. Для увеличения КПД в клистронах с большим количеством каскадов необходимо решить задачу уменьшения этой недогруппированной доли пучка.

На рис. 4 приведена АЧХ, т.е. зависимость КПД η от безразмерной частоты f/f_0 для оптимального четырехрезонаторного клистрона. Как видно из рис. 4,

максимальный КПД достигается в некоторой естественной полосе, равной примерно 0.7%, т.е. существенно большей, чем исходная полоса оптимизации.

3. Оптимизация пятирезонаторного клистрона

Исходный вариант пятирезонаторного клистрона был сформирован путем дублирования второго каскада в оптимальном варианте четырехрезонаторного клистрона и уменьшения входной мощности в 5 раз (необходимая величина входной мощности определялась из амплитудной характеристики).

Оптимизация проводилась по двенадцати параметрам: по четырем длинам труб, по пяти расстройкам резонаторов, по нагруженным добротностям входного и выходного резонаторов и по входной мощности. В результате получился оптимальный прибор с приведенной длиной группирования 4.63 и с АЧХ, показанной на рис. 5. КПД прибора на центральной частоте составил 86%.

Рассмотрим процесс группирования в оптимальном пятирезонаторном клистроне (рис. 6). Как и в четырехрезонаторном клистроне, процесс группирования включает в себя 2 стадии: 1) предварительная группировка в первых трех каскадах, в каждом из которых частицы центральной части сгустка сначала приближаются к центру сгустка, а затем удаляются от него, а периферийные частицы монотонно приближаются к сгустку;

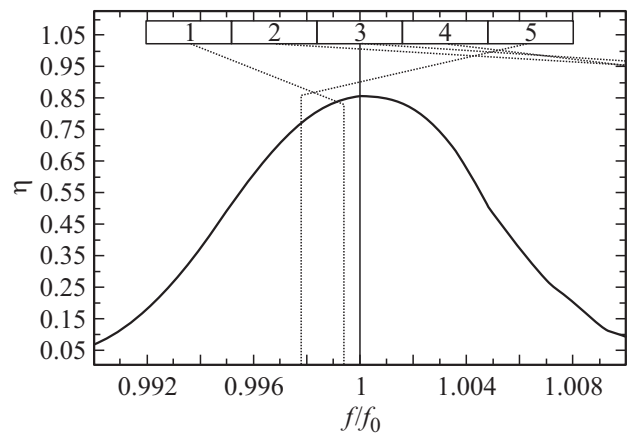


Рис. 5. АЧХ пятирезонаторного клистрона с КПД 86%.

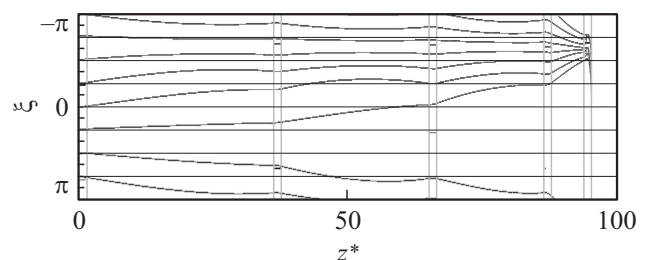


Рис. 6. Фазовые траектории пятирезонаторного клистрона с КПД 86%.

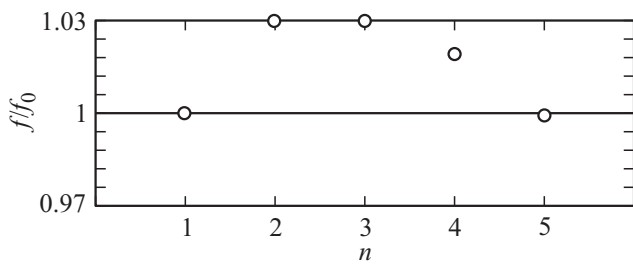


Рис. 7. Схема расстроек резонаторов пятирезонаторного клистрона с КПД 86%.

2) последний каскад, в котором все частицы подвергаются сильному группирующему воздействию четвертого резонатора и сходятся в короткий сгусток. При этом для обеспечения большой амплитуды СВЧ-напряжения расстройка четвертого резонатора должна быть меньше расстроек второго и третьего. Схема расстроек показана на рис. 7, где по оси абсцисс отложен номер каждого резонатора, а по оси ординат — его безразмерная собственная частота. Такая же схема остается и для клистронов с большим количеством резонаторов.

4. Оптимизация шестирезонаторного клистрона

Переход от пятирезонаторного клистрона к шестирезонаторному проходил по описанной выше схеме: дублировался второй каскад, уменьшалась входная мощность. Количество оптимизируемых параметров увеличивается на два при добавлении нового каскада: добавляется еще одна длина трубы дрейфа и еще одна расстройка резонатора. Таким образом, число оптимизируемых параметров шестирезонаторного клистрона равно четырнадцати.

В процессе оптимизации оказалось, что для любой приведенной длины группирования в диапазоне от 4.63 до 5.79 можно получить оптимальный вариант с КПД не менее 86%, но значительного увеличения максимального КПД при этом не получается. Глобальный экстремум достигается для приведенной длины группирования 5.79 и соответствует КПД в нагрузку 88%. Характер группирования при этом остается таким же, как для четырех- и пятирезонаторного клистрона: медленная, „мягкая“ группировка в первых четырех каскадах и

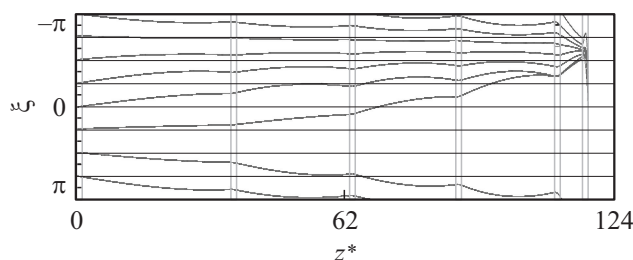


Рис. 8. Фазовые траектории шестирезонаторного клистрона с КПД 88.3%.

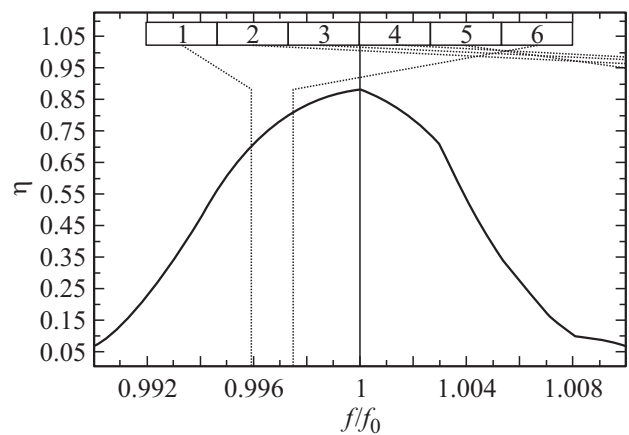


Рис. 9. АЧХ шестирезонаторного клистрона с КПД 88.3%.

сильная, ударная догруппировка в последнем, коротком каскаде (рис. 8). Вид АЧХ также мало отличается от соответствующих АЧХ четырех- и пятирезонаторного клистрона (рис. 9).

5. Оптимизация семирезонаторного клистрона

Семирезонаторный клистрон стал последним шагом настоящего исследования. Следует отметить, что реальный прототип рассматриваемого прибора имел тоже 7 резонаторов, но его максимальный КПД составлял около 70% [13].

Для семирезонаторного клистрона с любой приведенной длиной группирования из диапазона от 5.79 до 6.92 можно получить оптимальный вариант клистрона с КПД не менее 88%. Это означает, что для каждого значения приведенной длины группирования из этого диапазона существует локальный экстремум, достаточно близкий к глобальному. Каждый из этих экстремумов можно использовать для проектирования соответствующего прибора — КПД любого из этих приборов будет достаточно высоким.

Для нахождения глобального экстремума пришлось провести около 30 серий оптимизации с суммарным количеством расчетов КПД более 600 тыс. В результате оказалось, что оптимальная приведенная длина группирования равна 6.92, соответствующий КПД составляет 90.5%.

На рис. 10, 11 приведены АЧХ и фазовые траектории для варианта прибора с приведенной длиной группирования 5.89 и с КПД 89.4%, а на рис. 12, 13 — аналогичные зависимости для оптимального семирезонаторного клистрона с приведенной длиной группирования 6.92 и с КПД 90.5%.

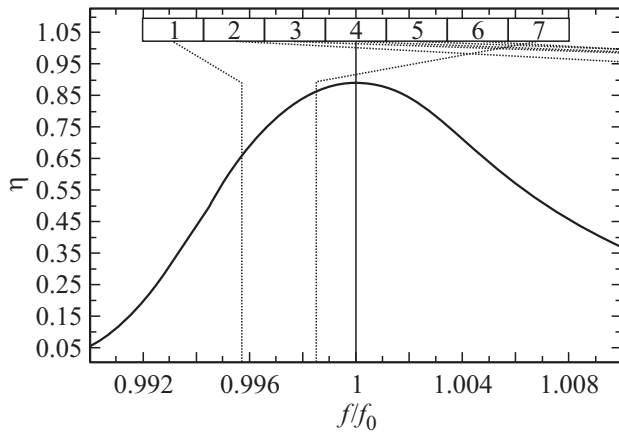


Рис. 10. АЧХ семирезонаторного клистрона с КПД 89.4%.

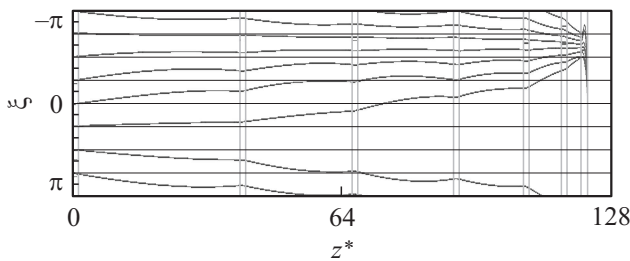


Рис. 11. Фазовые траектории семирезонаторного клистрона с КПД 89.4%.

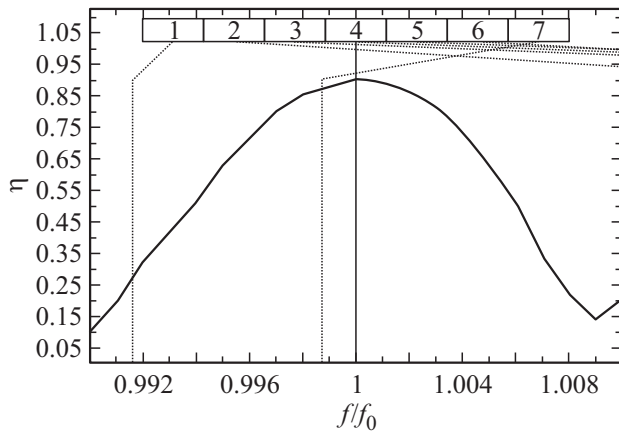


Рис. 12. АЧХ семирезонаторного клистрона с КПД 90.5%.

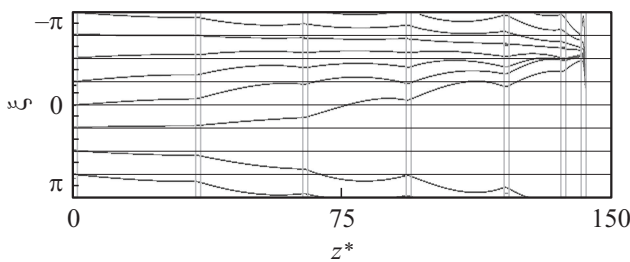


Рис. 13. Фазовые траектории семирезонаторного клистрона с КПД 90.5%.

Таблица 2. Сравнительные характеристики оптимальных клистронов

№	Число резонаторов	l_{Σ} , см	l_{Ω}	K_U , dB	Электронный КПД, %	КПД в нагрузку, %	Полоса по уровню 1 dB, %
1	4	111.4	3.56	49	86.8	83.0	0.7
2	5	144.7	4.63	51	89.6	86.0	0.7
3	6	181	5.79	52	91.9	88.3	0.7
4	7	184	5.89	51	93.1	89.4	0.8
5	7	216.2	6.92	55	94.2	90.5	0.8

6. Сравнение результатов

Основные полученные результаты объединены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, все смоделированные приборы имеют близкие коэффициенты усиления и почти одинаковые полосы усиления. Необходимо отметить, что полоса выходного резонатора каждого из этих приборов также равна 0.8 по уровню 1 dB, т.е. полоса усиления ограничивается не группирователем, а выходным резонатором.

Наиболее заметное отличие параметров смоделированных приборов от приборов, разрабатываемых ранее и известных по публикациям [13,14] и др., заключается в значительно большей длине приведенной длины группирования. Так, например, у прототипа, имеющего КПД 70% при 7 резонаторах, приведенная длина группирования примерно в 2.5 раза меньше, чем у клистрона №4 из табл. 2 и почти в 3 раза меньше, чем у оптимального клистрона №5. При недостаточной приведенной длине группирования либо периферийные частицы не успевают в достаточной степени приблизиться к центру сгустка (при малых амплитудах СВЧ-напряжения в группирующих резонаторах), либо возникает обгон у частиц центральной части сгустка (при больших амплитудах СВЧ-напряжения). И тот, и другой процесс ведут к уменьшению эффективности энергообмена в выходном зазоре и, следовательно, к уменьшению КПД.

Вместе с тем длина группирования определяет длину прибора и поэтому является одним из базовых конструктивных параметров, закладываемых на самом раннем этапе проектирования приборов. Как было сказано ранее, большинство новых клистронов разрабатываются на основе уже существующих прототипов. Это приводит к тому, что новые приборы имеют недостаточную длину группирования, и этот фактор, ведущий к снижению КПД, не может быть исправлен ни изменением соотношения длин труб дрейфа между собой, ни изменением расстроек резонаторов.

Заключение

Таким образом, на основе дискретно-аналитической модели клистрода и комплекса программ KlypWin исследована возможность получения максимального КПД в клистродах с числом резонаторов 4, 5, 6, 7, смоделированных на основе реального прототипа. Показано, что максимальный КПД в нагрузку четырехрезонаторного клистрода 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 1 дБ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке реальных высокоэффективных клистронов для применения в науке, промышленности и энергетике.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, программа ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, контракты № П1093, 14.132.21.1430, и при поддержке стипендии президента РФ.

Список литературы

- [1] *Артюх И.Г., Байков А.Ю., Петров Д.М.* // Тр. 52-й Научной сессии, посвященной Дню радио. Москва, Россия, 1997. Ч. 2. С. 68–71.
- [2] *Доколин О.А., Кучугурный В.И., Лебединский С.В., Мальных А.В., Петров Д.М.* // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 1984. Т. 27. № 12. С. 47–55.
- [3] *Bajkov A.Yu., Petrov D.M.* // Int. Univ. Conf. „Electronics and Radiophysics of Ultra-high Frequencies“. St. Petersburg, Russia, 1999. P. 5–8.
- [4] *Царев В.А., Мирошниченко А.Ю.* // XIV Междунар. зимняя шк.-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов, Россия, 2009. С. 38–39.
- [5] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 6. С. 90–100.
- [6] *Байков А.Ю.* // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 4. С. 36–46.
- [7] *Байков А.Ю., Ежиков В.Б.* // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2011. № 1. С. 173–182.
- [8] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 127–133.
- [9] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н.* // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2013. № 1. С. 116–125.
- [10] *Соболь И.М.* Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 313 с.
- [11] *Антонова Г.М., Байков А.Ю.* // Тр. 5-й Междунар. конференции „Идентификация систем и задачи управления“. М.: Институт проблем управления, 2006. С. 823–837.
- [12] *Байков А.Ю., Ежиков В.Б.* // Тр. конференции „Математика, информатика, естествознание в экономике и в обществе“. М.: МФЮА, 2010. С. 53–57.
- [13] *Кочетова В.А., Кучугурный В.И., Лебединский С.В., Мальных А.В., Петров Д.М.* // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 1. С. 132–145.
- [14] *Артюх И.Г., Сандалов А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Штейн Ю.Г.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 17 (1490). М.: ЦНИИ „Электроника“, 1989. 70 с.