

## Исследование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистродах

© А.Ю. Байков,<sup>2</sup> О.А. Грушина,<sup>1</sup> М.Н. Стриханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ),  
115409 Москва, Россия

e-mail: obkv@mail.ru

<sup>2</sup> Московский финансово-юридический университет,  
117447 Москва, Россия

e-mail: baikov.a@mfua.ru; a\_yu\_baikov@mail.ru

(Поступило в редакцию 26 апреля 2012 г. В окончательной редакции 30 августа 2012 г.)

На основе разработанной авторами математической модели трансформации электронного пучка в узкой трубе и комплекса программ KlypWin исследованы зависимости максимального КПД от коэффициента усиления для двухрезонаторных клистронов, смоделированных на основе реальных электронно-оптических систем и реальных электродинамических параметров резонаторов. Показано, что максимальный КПД таких клистронов составляет 46–47% и достигается при коэффициенте усиления 16–18 dB.

### Введение

Хотя все используемые в различных областях науки и техники мощные пролетные клистроны [1] включают не менее 6–7 резонаторов, рассмотрение двухрезонаторного клистрода представляет несомненный теоретический интерес, так как для такого прибора можно установить некоторые общие закономерности.

Исследование этих закономерностей можно рассматривать как первый шаг в построении аналогичных зависимостей для реальных многорезонаторных клистронов.

В простейшей модели [2] двухрезонаторного клистрода считается, что зазоры являются бесконечно тонкими, а пространственный заряд отсутствует (кинематическое приближение).

Для такой модели можно аналитически рассчитать выходные характеристики и получить некоторые общие теоретические выводы. Например, в рамках этой модели оказывается, что максимальный КПД двухрезонаторного клистрода равен 58% и не зависит от коэффициента усиления [2].

В реальных приборах приближения такой упрощенной модели не выполняются. В частности, оказывается, что пространственным зарядом пренебрегать нельзя, так как эффект пространственного заряда оказывает значительное влияние на группировку пучка. Кроме того, реальные зазоры нельзя считать бесконечно тонкими.

Влияние пространственного заряда проявляется, например, в том, что при различных значениях входной мощности группировка пучка происходит по-разному. В частности, при малой входной мощности невозможно получить сильную группировку из-за кулоновского расталкивания частиц, энергия которого оказывается больше, чем кинетическая энергия взаимного сближения.

Таким образом, качественные физические соображения приводят к выводу, что максимальный КПД двухрезонаторного клистрода должен зависеть от вход-

ной мощности, а следовательно, от коэффициента усиления.

Зависимость максимального КПД от коэффициента усиления была исследована в работе [3] с учетом пространственного заряда для клистрода с бесконечно тонкими зазорами. Однако приближение бесконечно тонких зазоров является в той же степени нереализуемым, как и кинематическое приближение. Поэтому интересной и с теоретической, и с практической точек зрения является задача исследования зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистродах при реальных значениях как величины пространственного заряда, так и зазоров резонаторов и диаметров труб.

Разработанный комплекс программ KlypWin [4,5] позволяет такое исследование провести, его результаты рассматриваются в настоящей работе.

### Модели двухрезонаторных клистронов

Для исследования были выбраны 5 двухрезонаторных клистронов, модели которых были построены на основе электронно-оптических и электродинамических систем реальных клистронов (прототипов) из различных областей применения (телевидение, питание ускорителей и т.д.).

Прототипы выбирались таким образом, чтобы охватить максимальный диапазон изменения основных параметров: по рабочей частоте от 700 MHz до 34 GHz, по мощности пучка — от 4 kV до 100 MV.

Основные параметры прототипов и соответственно построенных на их основе двухрезонаторных клистронов приведены в таблице.

В приведенной таблице  $f_0$  — рабочая частота,  $U_0$  — ускоряющее напряжение,  $I_0$  — суммарный ток всех лучей пучка,  $N_b$  — число лучей,  $d_T$  — диаметр труб

Основные параметры исследуемых клистронов

№	$f_0$ , GHz	$U_0$ , kV	$I_0$ , A	$N_b$	$d_T$ , mm	$l_g$ , mm	$\rho$ , Ohm	Режим	$\Omega_p$	$\Theta_{\text{eff}}$
1	0.71	15	2.8	7	14	14.3	70	Непрерывный	0.06	1.3
2	11.6	120	850	30	3	3.5	13	Импульсный	0.09	2.0
3	0.99	50	170	42	14	20	25	»	0.07	1.3
4	33.7	31	3.1	1	1	0.7	90	»	0.09	2.7
5	6.4	4	0.99	7	1.8	1.4	46	Непрерывный	0.1	2.4

дрейфа,  $l_g$  — величина зазоров резонаторов,  $\rho$  — характеристическое сопротивление резонаторов. Колонка „режим“ указывает основной режим работы прибора (непрерывный или импульсный). В последних двух колонках таблицы приведены основные безразмерные параметры, которые рассчитываются на основе данных из колонок 2–8:  $\Omega_p$  — параметр пространственного заряда [3],  $\Theta_{\text{eff}}$  — эффективный угол пролета выходного зазора [2].

Одна из основных задач при проектировании многорезонаторного клистронов — добиться максимального КПД. Для этого необходимо найти оптимальные значения всех свободных параметров: длин труб дрейфа, расстроек (относительных отклонений собственных частот резонаторов от рабочей частоты прибора) и добротностей резонаторов. В многорезонаторном клистроне количество этих параметров доходит до двадцати и более, поэтому задача оптимизации оказывается весьма сложной. В этом смысле двухрезонаторный клистрон является значительно более простой системой — у него всего два свободных параметра — длина единственной трубы дрейфа и нагруженная добротность выходного резонатора. Задача моделирования двухрезонаторного клистронов с максимально возможным КПД сводится к задаче оптимизации по двум параметрам.

Поставим следующую задачу. Для каждого из пяти рассматриваемых двухрезонаторных клистронов при всех возможных значениях входной мощности найти максимальный КПД

$$\eta_{\max}(P_{\text{in}}) = \max_{l_T, Q_{\text{out}}}(\eta(l_T, Q_{\text{out}}, P_{\text{in}})), \quad (1)$$

подобрав оптимальные значения длины трубы дрейфа  $l_T$  и нагруженной добротности  $Q_{\text{out}}$  выходного резонатора.

Каждому значению входной мощности при условии максимума КПД будет соответствовать вполне определенное значение коэффициента усиления

$$K_u(P_{\text{in}}) = 10 \lg \frac{\eta U_0 I_0}{P_{\text{in}}}. \quad (2)$$

Результаты таких расчетов можно рассматривать как параметрическую зависимость максимального КПД от коэффициента усиления и представить их в виде графика  $\eta^{(\text{opt})}(K_u)$ .

Получение таких графиков для пяти рассматриваемых двухрезонаторных клистронов и сравнение их между собой является целью настоящей работы.

## Методика решения задачи

Для решения поставленной задачи использован комплекс программ KlypWin [4,5] в котором реализована уточненная модель группирования на основе приближения „замороженного пучка“ (ПЗП) [3].

В работах [6,7] проведено сравнение модели ПЗП с использовавшейся ранее квазилинейной моделью и показана корректность получаемых результатов.

Пользовательский интерфейс программы KlypWin позволяет вводить данные, редактировать их, сохранять в виде иерархического дерева проектов, получать результаты расчетов в виде графиков, сравнивать их между собой и анализировать результаты. Кроме того, программа KlypWin позволяет проводить многопараметрическую оптимизацию по любому количеству оптимизируемых параметров.

При оптимизации основной целевой функцией является КПД или минимальный КПД в полосе (если оптимизация проводится по полосе частот), но возможен и выбор других более сложных целевых функций, включая векторные [4].

Для оптимизации используются 2 метода.

1. Метод зондирования на основе генерации точек в многомерном пространстве с использованием последовательностей ЛП<sub>T</sub>, Холтона и случайной последовательности [8,9]. Этот метод применяется для обзора достаточно больших областей пространства с целью нахождения глобального экстремума в первом приближении.

2. Метод перебора с масштабированием [10]. Используется для уточнения приближенно найденного экстремума.

Выбор именно этих методов оптимизации связан с использованием в процессе оптимизации понятия „корректности“ получаемого значения целевой функции. Если в процессе моделирования возникла ситуация, которая плохо описывается моделью (например, отражение электронов) или приводит к недоверности результата по другим причинам (например, несходимость итерационной процедуры), то полученное в результате значение целевой функции считается некорректным.

Указанные 2 метода оптимизации позволяют исключить некорректные точки из рассмотрения и проводить оптимизацию только по корректным точкам.

Кроме того, целесообразность использования метода зондирования связана с большим количеством локаль-

ных экстремумов целевой функции. Для двухрезонаторного клистрона количество таких локальных экстремумов может достигать десятков тысяч, при переходе к многорезонаторным клистроном их количество увеличивается до  $10^{12}-10^{14}$ . Это делает невозможным нахождение глобального экстремума как лучшего из локальных.

Расчеты проводились следующим образом. Для каждого из рассматриваемых приборов сначала проводилась оптимизация по трем параметрам — входной мощности  $P_{in}$ , длине трубы  $l_T$  и нагруженной добротности выходного резонатора  $Q_{out}$ . Далее входная мощность  $P_{in}$  изменялась относительно оптимальной в большую и меньшую сторону, и для каждого значения входной мощности решалась задача оптимизации по длине трубы  $l_T$  и нагруженной добротности выходного резонатора  $Q_{out}$ .

Оптимальные значения  $l_T^{(opt)}$  и  $Q_{out}^{(opt)}$  для данного значения  $P_{in}$  использовались как начальные данные для оптимизации при следующем значении  $P_{in}$ , т.е. брались в качестве центра новой прямоугольной области оптимизации в пространстве  $\{l_T, Q_{out}\}$ .

В результате такой процедуры получается кривая зависимости  $\eta^{(opt)}(K_u)$ , определяемой формулами (1), (2). Для получения каждой точки этой кривой требуется проведение двух этапов оптимизации (сначала методом зондирования, затем перебором с масштабированием); это примерно  $10^4-4 \cdot 10^4$  расчетов. Погрешность нахождения экстремума составляет при этом не более 0.1% по КПД.

Кроме значения целевой функции в результате оптимизации получают и значения оптимизируемых параметров  $l_T^{(opt)}$  и  $Q_{out}^{(opt)}$ , которые также можно представить в виде графиков  $l_T^{(opt)}(K_u)$  и  $Q_{out}^{(opt)}(K_u)$ . Вместо  $Q_{out}^{(opt)}$  будем рассматривать резонансное сопротивление выходного резонатора  $Z_{out}^{(opt)} = \rho_{out} Q_{out}^{(opt)}$ , где  $\rho_{out}$  — характеристическое сопротивление выходного резонатора. Для сопоставления результатов, относящихся к разным приборам, будем рассматривать нормированные значения параметров  $Z_{out}^{*(opt)} = Z_{out}^{(opt)}/R_0$ ,  $l_{out}^{*(opt)} = l_{out}^{(opt)}/l_0$ , где  $R_0 = U_0/I_0$  — сопротивление луча, а  $l_0 = v_0/\omega_0$  — расстояние, проходимое пучком за время, соответствующее 1 рад СВЧ-поля,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — частота,  $v_0$  — невозмущенная скорость пучка.

## Анализ результатов

Рассмотрим результаты оптимизации для двухрезонаторных клистронов, параметры которых приведены в таблице.

По характеру полученных зависимостей рассматриваемые приборы разбиваются на две группы: к первой группе относятся приборы № 1–3, ко второй — приборы № 4, 5.

Для прибора № 1 результаты оптимизации приведены на рис. 1–3 (стрелкой обозначено направление увеличения входной мощности).

Отметим основные особенности кривой, представленной на рис. 1.

1. Максимальный КПД = 47%, что существенно отличается от значения КПД = 58%, полученного в [2,3].

Это объясняется следующими эффектами. Во-первых, в протяженном зазоре сгусток находится в течение длительного времени, за которое фаза СВЧ-поля меняется, что приводит к снижению эффективности взаимодействия. Во-вторых, в процессе торможения в протяженном выходном зазоре электронный пучок разгруппировывается, следовательно, средний ток по зазору, а значит, и наведенный ток, возбуждающий резонатор, уменьшаются. Оба эти эффекта приводят к понижению КПД.

Процесс уменьшения КПД, связанный с разгруппировкой пучка в выходном зазоре, отображается на рис. 4 (расхождение фазовых траекторий) и на рис. 5 (уменьшение гармоник тока в зазоре). На рис. 4 по оси абсцисс отложена безразмерная координата вдоль пучка  $z^* = \frac{\omega_0 z}{v_0}$ , а по оси ординат — безразмерное отклонение частиц от невозмущенного положения в пучке

$$\xi = \omega_0 t(z, t_0) - \frac{\omega_0 z}{v_0},$$

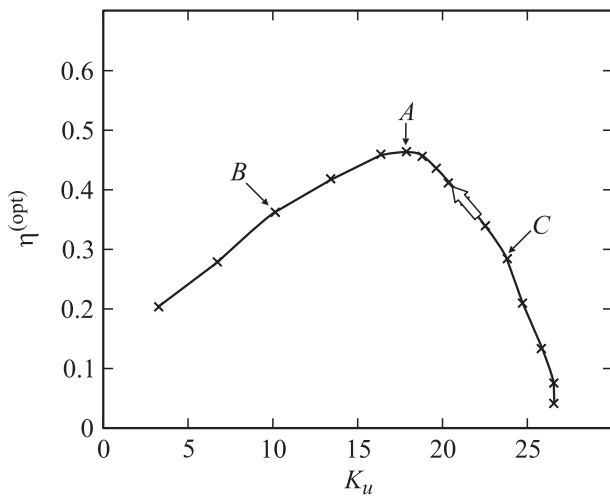
где  $t(z, t_0)$  — функция прибытия частиц [3],  $t_0$  — лагранжева координата [3]. На рис. 5 по оси абсцисс отложена безразмерная координата вдоль пучка  $z^*$ , а по оси ординат — безразмерная величина гармоник тока  $I_c/I_0$ .

В оптимальном режиме максимально сгруппированному пучку соответствует значение относительной величины первой гармоники конвекционного тока  $I_1/I_0 \approx 1.2$  (рис. 5). В клистроне с бесконечно тонкими зазорами при таком значении гармоники тока КПД составил бы 60% [3].

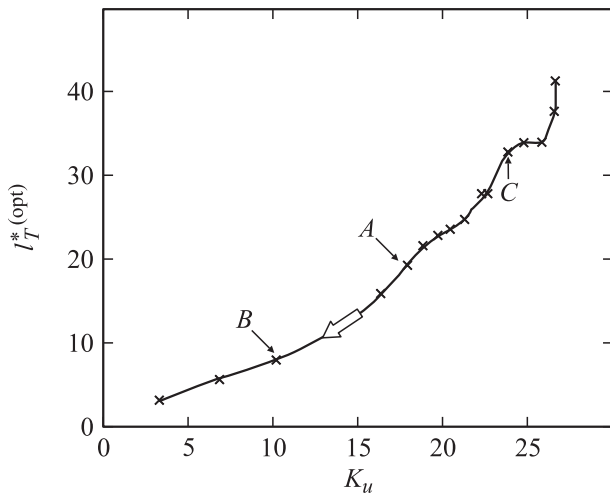
2. Максимум достигается при определенном значении  $K_u \approx 17$  dB (точка А на рис. 1). При отклонении входной мощности от оптимального значения как вправо (правая ветвь графика), так и влево (левая ветвь графика) значения  $\eta^{(opt)}$  уменьшаются. Отметим, что в приближении бесконечно тонких зазоров значение  $\eta^{(opt)}$  в левой части остается постоянным.

Уменьшение КПД справа от оптимального значения связано с невозможностью полной группировки пучка при уменьшенном значении входной мощности. Сравним процесс группирования в оптимальном режиме (точка А) и при входной мощности ниже оптимальной в 7 раз (точка С).

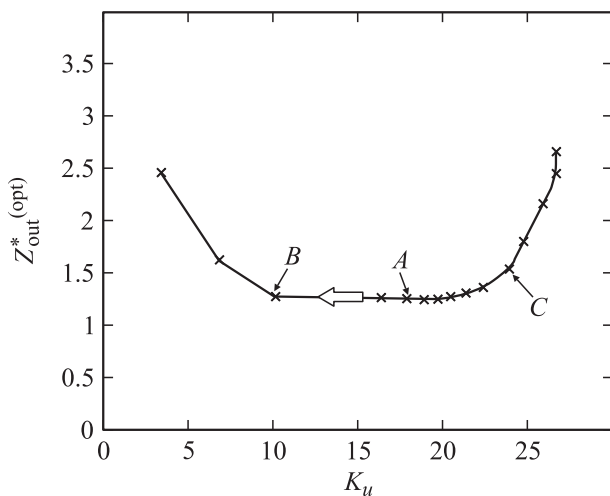
Как видно из рис. 6, при уменьшенном значении входной мощности полная группировка пучка становится невозможной, что и приводит к уменьшению КПД. Обозначения по осям на рис. 6, 7 такие же, как и на рис. 4.



**Рис. 1.** Зависимость максимального КПД от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в двухрезонаторном клистроне № 1.



**Рис. 2.** Зависимость оптимальной нормированной длины трубы  $l_T^{(opt)}$  от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в двухрезонаторном клистроне № 1.

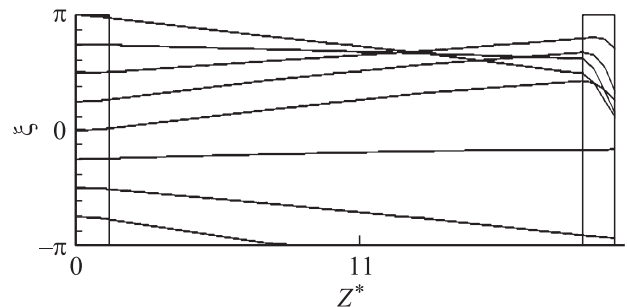


**Рис. 3.** Зависимость оптимального нормированного резонансного сопротивления  $Z_{out}^{(opt)}$  выходного резонатора от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в двухрезонаторном клистроне № 1.

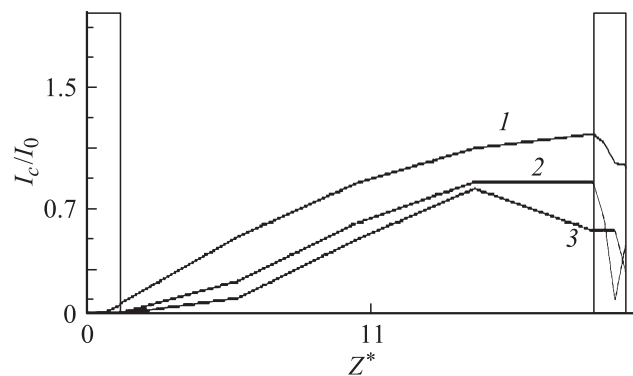
Рассмотрим левый край основной кривой (точка В рис. 1). Соответствующие фазовые траектории изображены на рис. 7. В этом случае наблюдается эффект перегруппировки, сопровождающийся обгоном. Режим группирования близок кинематическому, первая гармоника тока остается достаточно большой, но из-за того что частицы на входе в выходной зазор имеют большой разброс скоростей, разгруппировка в выходном зазоре оказывается существенно больше, чем при оптимальном режиме. Соответственно уменьшается значение наведенного тока и, следовательно, КПД.

3. Коэффициент усиления  $K_u$  ограничен максимальным значением  $K_u \approx 27$  dB — это коэффициент усиления, соответствующий режиму малого сигнала (линейному режиму прибора).

Рассмотрим прибор № 2 из таблицы. Хотя физические параметры его существенно отличаются от параметров прибора № 1, например, мощность пучка больше в 25 раз, а рабочая частота в 15 раз, кривая зависимости максимального КПД от коэффициента усиления имеет такой же вид (рис. 8). Аналогичный вид имеют и зависимости значений оптимальных параметров от  $K_u$  (рис. 9, 10).



**Рис. 4.** Фазовые траектории (зависимости безразмерного отклонения  $\xi$  частиц от безразмерной координаты  $z^*$  вдоль трубы) для оптимального режима группирования в двухрезонаторном клистроне № 1.



**Рис. 5.** Распределение относительных величин первых трех гармоник конвекционного тока по длине в двухрезонаторном клистроне № 1 при оптимальном режиме группирования (точка А на рис. 1–3).

Аналогичные зависимости получаются и для прибора № 3. Максимальный КПД для него составляет 47% и достигается при значении коэффициента усиления  $K_u \approx 16$  dB, максимальное значение  $K_u \approx 26$  dB.

Кривые зависимостей максимального КПД от коэффициента усиления для приборов № 1–3 изображены на рис. 11. Соответствующие кривые похожи между собой, несмотря на существенное различие основных конструктивных и физических параметров приборов (мощность, рабочая частота, число лучей и т.д.). Все выводы, сделанные для прибора № 1, остаются в силе для приборов № 2, 3.

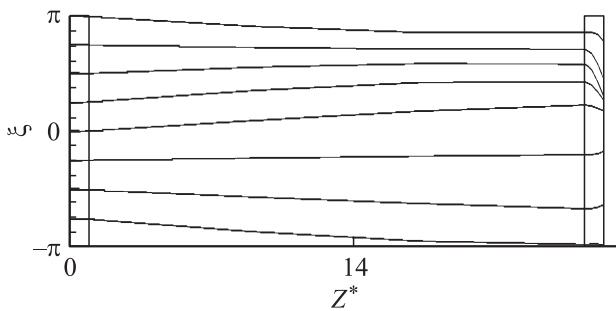


Рис. 6. Фазовые траектории в двухрезонаторном клистроне № 1 при коэффициенте усиления 25 dB (точка С на рис. 1–3).

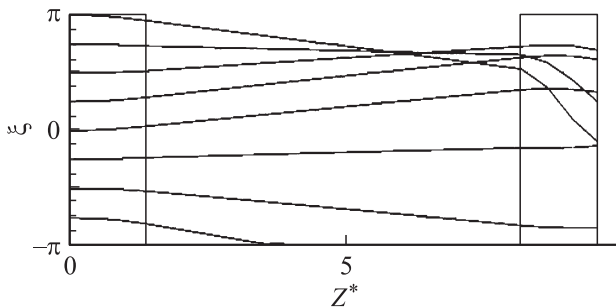


Рис. 7. Фазовые траектории в двухрезонаторном клистроне № 1 при коэффициенте усиления 10 dB (точка В на рис. 1–3).

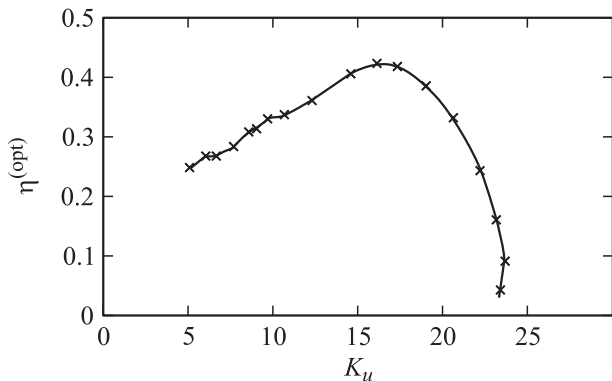


Рис. 8. Зависимость максимального КПД от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в клистроне № 2.

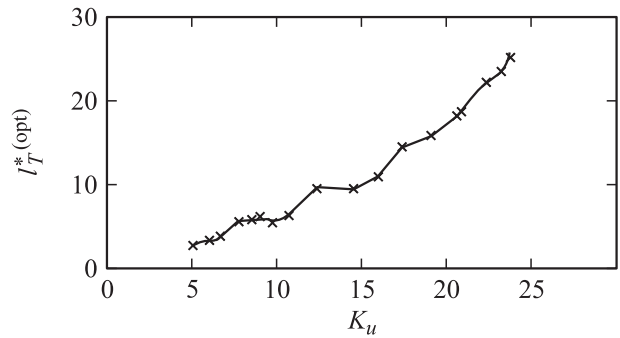


Рис. 9. Зависимость оптимальной нормированной длины трубы от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в клистроне № 2.

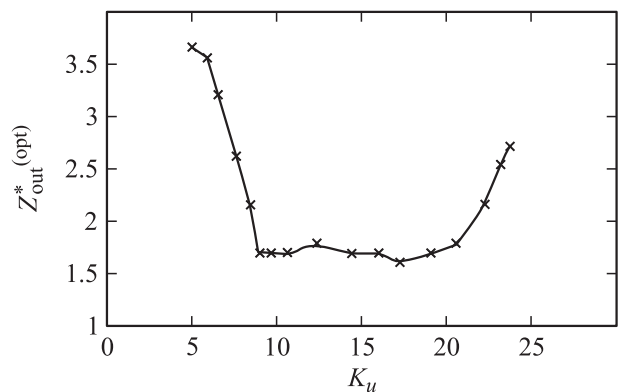


Рис. 10. Зависимость оптимального нормированного резонансного сопротивления выходного резонатора от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в клистроне № 2.

Рассмотрим приборы № 4, 5. Полученные зависимости максимального КПД от коэффициента усиления приведены на рис. 12. Эти кривые отличаются от соответствующих зависимостей, полученных для приборов № 1–3.

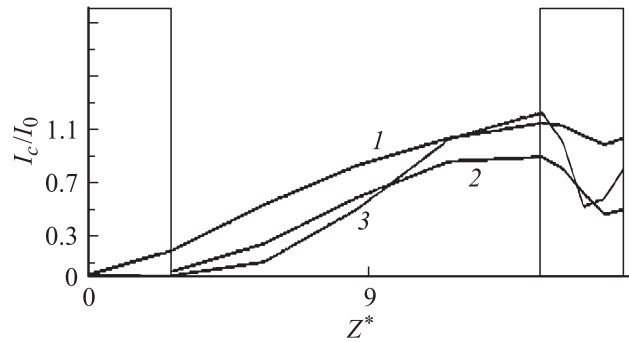
Наиболее существенное отличие — значительное уменьшение максимального КПД и максимального коэффициента усиления по сравнению с приборами № 1–3. Так, для прибора № 4 максимальный КПД составил 27%, а для прибора № 5 — 32%. Максимальный коэффициент усиления для обоих приборов составил  $K_u \approx 17$  dB. Для обоих приборов при расчетах входная мощность не увеличивалась более значений, соответствующих  $K_u \approx 7$  dB, так как при больших значениях входной мощности оптимальная длина трубы оказывалась меньше значений, корректных с физической точки зрения.

Второе отличие графиков на рис. 12 от графиков на рис. 11 заключается в отсутствии на графиках рис. 12 левой убывающей ветви — при больших уровнях входной мощности КПД остается примерно постоянным.

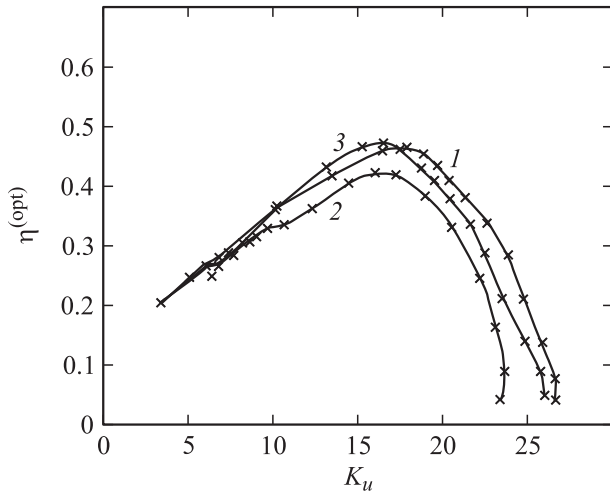
Для того чтобы выяснить причину расхождения зависимостей группы приборов I (№ 1–3) от группы II (№ 4, 5), рассмотрим процесс группирования для одного из приборов группы II (рис. 12) в оптимальном режиме. Фазовые траектории и гармоники тока изображены на

рис. 13 и 14 соответственно. При этом использованы те же обозначения, что и для рис. 4, 5.

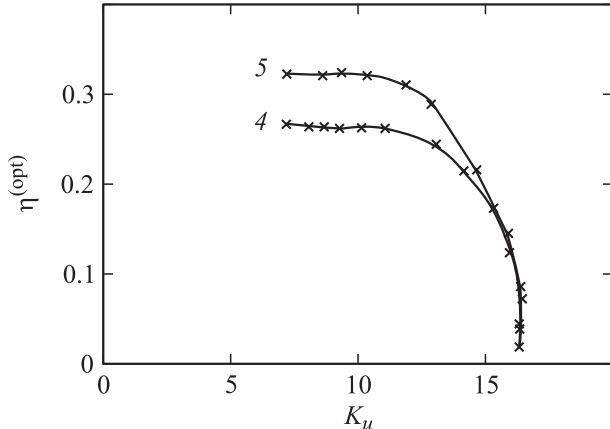
Как видно из рис. 14, максимальное значение относительной величины первой гармоники конвекционного тока оказывается почти таким же, как для приборов группы I. Это значит, что уменьшение КПД связано с



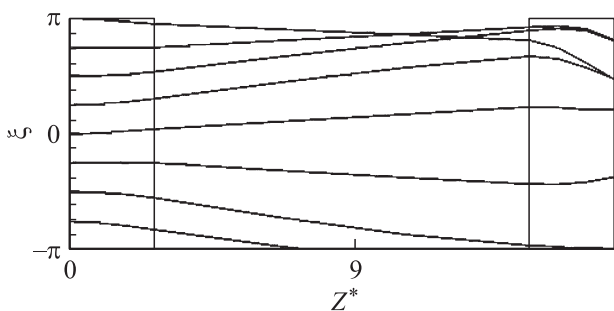
**Рис. 14.** Распределение первых трех гармоник конвекционного тока в двухрезонаторном клистроне № 4 (точка А на рис. 12).



**Рис. 11.** Зависимости максимального КПД от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в двухрезонаторных клистронах № 1–3.



**Рис. 12.** Зависимости максимального КПД от коэффициента усиления  $K_u$  (dB) в двухрезонаторных клистронах № 4, 5.



**Рис. 13.** Фазовые траектории для двухрезонаторного клистрона № 4 (точка А на рис. 12).

процессами взаимодействия пучка с полем в выходном зазоре. И действительно, если сравнить между собой эффективные углы пролета выходного зазора (последний столбец таблицы), то окажется, что для приборов № 4, 5 эффективный угол пролета значительно больше, чем для приборов № 1–3. Если сопоставить максимальный КПД каждого из рассматриваемых приборов с соответствующим значением эффективного угла пролета выходного зазора, то окажется, что эта зависимость носит монотонный характер: при увеличении эффективного угла пролета КПД уменьшается.

### Заключение

Таким образом, на основе комплекса программ КупрWin в рамках ПЗП-модели исследованы зависимости максимального КПД от коэффициента усиления для двухрезонаторных клистронов, смоделированных на основе пяти реальных прототипов.

Показано, что для значений эффективного угла пролета выходного зазора, не превышающих 2 rad, зависимость  $\eta^{(opt)}(K_u)$  носит универсальный характер (рис. 11): максимальный КПД достигается при оптимальном значении коэффициента усиления  $K_u \approx 16-18$  dB, при уменьшении (левая ветвь графика) или увеличении (правая ветвь графика) коэффициента усиления максимальный КПД падает. Этот вывод не зависит от других физических и конструктивных параметров прибора, таких как рабочая частота, мощность пучка, число лучей и т. д.

Показано также, что увеличение эффективного угла пролета более 1.5 rad приводит к снижению, а более 2 rad — к сильному снижению максимального КПД и максимального коэффициента усиления.

Основной вывод можно сформулировать следующим образом: максимальный КПД реального двухрезонаторного клистрона составляет 45–47%, он достигается при коэффициенте усиления 16–18 dB и при эффективном угле пролета выходного резонатора не более 1.5 rad.

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. М.: 1997. Ч. 2. С. 68–71.
- [2] *Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М.* Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. радио, 1971. 600 с.
- [3] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 90–100.
- [4] *Байков А.Ю.* // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 4. С. 36–46.
- [5] *Байков А.Ю., Ежиков В.Б.* // Вестник МФЮА. 2011. № 1. С. 173–182.
- [6] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А.* // Вестник МФЮА. 2012. № 1. С. 68–77.
- [7] *Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А.* // Вестник МФЮА. 2012. № 1. С. 77–84.
- [8] *Соболь И.М.* Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 313 с.
- [9] *Антонова Г.М., Байков А.Ю.* // Тр. 5-й Междунар. конф. Идентификация систем и задачи управления. М.: Ин-т проблем управления, 2006. С. 823–837.
- [10] *Байков А.Ю., Ежиков В.Б.* // Тр. конф. Математика, информатика, естествознание в экономике и в обществе. М.: МФЮА, 2010. С. 53–57.