

УДК 621.385.624

ВЛИЯНИЕ ДВУМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГРУППИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ КЛИСТРОНАХ

© 2025 г. В. Е. Родякин¹, *, В. Н. Аксенов²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

* e-mail: vrodyakin@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 16.09.2024 г.

Принята в печать 30.09.2024 г.

Представлены результаты исследования влияния двумерных процессов на группирование электронных потоков в однолучевых и многолучевых широкополосных клистро́нах. Приводятся результаты сравнительного анализа группирования с помощью одномерной и двумерной модели. Анализируются причины ошибок в определении выходных параметров широкополосных клистро́нов, полученных с помощью одномерных программ.

Ключевые слова: электронный пучок, широкополосный клистрон, усилитель, группирование электронов, скоростная модуляция, многолучевой клистрон

DOI: 10.31857/S0367676525010166, EDN: DAERAC

ВВЕДЕНИЕ

Весьма актуальной задачей остается разработка и создание мощных широкополосных усилительных клистро́нов. В настоящее время клистро́ны с полосой от 2 до 15% широко используются в передатчиках мощных РЛС различного назначения в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн. В своей основе клистрон является резонансным узкополосным прибором типа «О» с дискретным взаимодействием электронного потока с электромагнитными полями резонаторов и с полосой усиления менее 1%.

Для расширения ширины рабочей полосы частот клистро́на используют низкодобротные промежуточные резонаторы, с относительно сильной отстройкой частоты от центральной частоты рабочего диапазона усилителя. Первые несколько промежуточных резонаторов обычно настроены на частоты внутри рабочей полосы и образуют линейный усилитель, который формирует полосу усиливаемых частот и необходимый уровень усиления. Последующие промежуточные резонаторы настраиваются на частоты, выходящие за пределы правой границы полосы, и образуют нелинейный группирователь, ответственный за получение высокого КПД клистро́на и коррекцию его полосовой характеристики.

Кроме расширения естественной полосы усиления клистро́на за счет отстроек промежуточных резонаторов, для широкополосных клистро́нов важно, чтобы выходная система также имела широкую полосу. Для этого необходимо уменьшать ее нагруженную добротность, что, в свою очередь, увеличивает активную составляющую проводимости выходной резонаторной системы. Для обеспечения эффективного отбора энергии в выходной системе необходимо, чтобы проводимость электронного потока примерно равнялась проводимости выходной системы. Поэтому для увеличения проводимости электронного потока либо используют высокоперевые электронные пучки, либо многолучевые конструкции. Кроме того, для расширения полосы в качестве выходных систем широкополосных приборов используют многозачерные резонаторы.

Все эти факторы усложняют физические процессы в клистро́нах и требуют при разработке их конструкции системного двумерного и трехмерного численного анализа. Применение же одномерных программ для оптимизации параметров конструктивных элементов широкополосных клистро́нов ограничено начальной стадией исследования процессов в таких приборах. В работах [1, 2] были показаны пределы применимости аналитиче-

ских и одномерных численных моделей для описания нелинейных процессов в клистронах. Там же были приведены оценки влияния на эффективность группирования со стороны поперечного расщепления пучка, вызванного радиальной неоднородностью сил пространственного заряда, провисанием потенциала, радиальной неоднородностью полей резонаторов.

В данной работе рассматриваются особенности влияния данных двумерных факторов на эффективность группирования в широкополосных клистронах на примере однолучевого и многолучевого клистронов. Поскольку воздействие на эффективность группировки электронного пучка различных нелинейных факторов происходит одновременно, определить степень влияния каждого фактора в отдельности представляется затруднительным. Поэтому для исследования их влияния будем использовать результаты сравнительного анализа эффективности группирования по различным физическим моделям.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теория мощных электровакуумных приборов СВЧ в общем случае строится на принципах классической электродинамики и сводится к решению совместной системы уравнений Максвелла и уравнений движения заряженных частиц. Прямое решение данной системы в общей постановке требует использования нестационарных трехмерных численных моделей электронного потока и электромагнитных полей. Такое решение является весьма трудоемким, требует значительных вычислительных затрат, и применяется только в таких полных компьютерных кодах, как CST Studio Suite [3].

При анализе процессов группирования и отбора энергии в клистронах в двумерном приближении использовался программный комплекс PARS [4], разработанный авторами на основе модернизации программы «Арсенал-МГУ» [5], зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследования многочисленных клистронных усилителей [6–9]. В модели электронный пучок представляется последовательностью заряженных колец, при движении которых учитываются продольная и радиальная координаты, а также все три компонента скорости.

Для проведения сравнительных расчетов в одномерном приближении использовалась программа «Клистрон-МГУ» [10], успешно применявшаяся при разработке многочисленных клистронов в СССР. В модели электронный пучок представляется в виде последовательности заряженных дисков, при движении которых учитываются только продольная координата и продольная компонента скорости.

Помимо различия в моделях электронного пучка программы отличаются в подходах к вычислению амплитуд напряжений, возникающих в зазорах резонаторов. В одномерной программе «Клистрон-МГУ» в эквивалентной схеме резонатора вводится статическая комплексная проводимость электронного пучка $G_{en} + iB_{en}$, которая рассчитывается по аналитическим формулам в предположении, что влетающий в резонатор электронный пучок является немодулированным. Для нахождения амплитуды напряжения на зазоре резонатора используется линейное приближение, позволяющее по известному значению первой гармоники конвекционного тока I_{1n} в центре зазора резонатора вычислить значение наведенного тока:

$$I_{наб\ n} = M_n I_{1n}, \quad (1)$$

где M_n — коэффициент электронного взаимодействия зазора n -го резонатора. Амплитуда напряжения на зазоре n -го резонатора в линейном приближении определяется из следующего выражения:

$$V_n = \frac{I_{наб\ n}}{\sqrt{(G_{cn} + G_{en})^2 + (B_{cn} + B_{en})^2}}, \quad (2)$$

где $B_{cn} = \frac{1}{\rho_n} \left[1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]$ — реактивная проводимость резонатора, $G_{cn} = \frac{1}{\rho_n Q_n}$ — активная проводимость резонатора, где $\omega_n = 2\pi f$, Q_n , ρ_n , f_n , собственная добротность, волновое сопротивление и собственная частота рабочей моды резонатора.

В двумерной программе PARS для вычисления амплитуды напряжения на зазоре промежуточного резонатора применяется уже нелинейный подход, при котором используется теория Шокли–Рамо, а напряжение в зазоре резонатора определяется итерационным методом через мощность взаимодействия:

$$P(t) = \int_{V_{gn}} \vec{E}_{gn} \cdot \vec{j} dV_{gn}, \quad (3)$$

где V_{gn} — объем области взаимодействия электрического поля n -го резонатора \vec{E}_{gn} с электронным пучком, \vec{j} — вектор плотности конвекционного тока пучка. При этом на каждом периоде колебаний поля в резонаторе $T = 1/f$ проводится вычисление реальной и мнимой части комплексного наведенного тока:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \bar{I}_{наб\ n} = \frac{2}{Td_n} \int_0^T dt \iiint_{V_{gn}} [j_r(r, z, t) F_m(r, z) + \\ + j_z(r, z, t) F_{zn}(r, z)] \sin(\omega t + \alpha_n) dV_{gn}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} \bar{I}_{наб\ n} = \frac{2}{Td_n} \int_0^T dt \iiint_{V_{gn}} [j_r(r, z, t) F_m(r, z) + \\ + j_z(r, z, t) F_{zn}(r, z)] \cos(\omega t + \alpha_n) dV_{gn}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $F_m(r, z)$, $F_{zn}(r, z)$ — функции распределения радиальной и продольной компонент собственного электрического поля n -го резонатора. Амплитуда и фаза напряжения на $k + 1$ периоде (итерации) определяется из следующего выражения:

$$\vec{V}_n^{k+1} = \sqrt{\frac{\vec{I}_{\text{наб } n} \vec{V}_n^k}{(G_{\text{сн}} + iB_{\text{сн}})}}. \quad (6)$$

Итерации продолжаются до сходимости амплитуды и фазы напряжения на зазоре резонатора к стационарному значению. Разработанный нелинейный метод анализа позволяет учесть в квазистационарном квазитрехмерном приближении нелинейные эффекты взаимодействия интенсивных электронных потоков с электромагнитными полями в зазорах резонаторов, в том числе и выходных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались два широкополосных импульсных усилительных клистрона С диапазона, разработанных специалистами Института электроники Китайской Академии Наук (IECAS) с помощью одномерной программы KLY6. Параметры изготовленных приборов приведены в табл. 1. Клистрон KC4083A является однолучевым и ис-

пользует электронный пучок с высоким первеансом. Система взаимодействия клистрона состоит из девяти резонаторов, последний из которых — двухззорный выходной резонатор, работающий на π -виде колебаний. Параметры резонаторов клистрона KC4083A указаны в табл. 2. Клистрон KC4079E — является многолучевым и использует электронный пучок с низким первеансом. Система взаимодействия клистрона состоит из семи резонаторов, последний из которых — двухззорный выходной резонатор, работающий на 2π -виде колебаний. Параметры резонаторов клистрона KC4079E указаны в табл. 3. В обоих клистроны используется схема с частотной отстройкой второго резонатора в левой части полосы усиления.

При испытаниях обоих клистронов специалисты IECAS столкнулись с весьма неприятной проблемой. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) изготовленных приборов имели весьма существенные провалы недалеко от центральной частоты полосы усиления (кривые 1 на рис. 1). По просьбе китайских специалистов были проведены теоретические исследования работы изготовленных клистроны с помощью программ «Клистрон-МГУ» и «Арсенал-МГУ».

Таблица 1. Параметры клистронов

Параметр	KC4083A	KC4079E
Ускоряющее напряжение, кВ	68.2	23
Сила тока на луч, А	39.2	1.2
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	2.2	0.344
Радиус трубы, см	0.43	0.175
Число лучей	1	24
Радиус пучка, см	0.32	0.105
КПД	30%	30%
Ширина полосы	7%	5.3%
Коэффициент усиления, дБ	45	35
Выходная мощность, кВт	800	200

Таблица 2. Параметры резонаторов клистрона KC4083A

№	z, см	f/f_0	ρ , Ом	Q
1	0	0.9866	100	50
2	3.4	0.9671	110	230
3	7.2	0.9971	110	120
4	10.2	1.0199	110	67
5	13.4	1.0368	110	105
6	16.6	1.046	110	210
7	19.6	1.0575	110	180
8	22	1.0699	110	3000
9	24.3	1	67.5	138

Таблица 3. Параметры резонаторов клистрона KC4079E

№	z , см	f/f_0	ρ , Ом	Q
1	0	0.991935	22	65
2	3.2	0.967742	22	250
3	6.4	1.005376	22	150
4	9.6	1.016129	22	150
5	12.8	1.031362	22	500
6	16.2	1.039427	22	500
7	17.8	1	20	30

Исследования с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ» (кривые 3 на рис. 1) не показали наличие провалов. Это соответствует результатам, полученным специалистами IECAS с помощью одномерной программы KLY6 (кривая 4 на рис. 1). Результаты же, полученные с помощью двумерной программы «Арсенал-МГУ» (кривые 2 на рис. 1), очень хорошо совпали с экспериментальными результатами [11].

Для того, чтобы понять причины такого отличия результатов анализа, полученных по одномерным и двумерной программам, было проведено более детальное исследование физических процессов в клистронах KC4083A и KC4079E с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ» и двумерной программы PARS.

На рис. 2а и 2б представлены рассчитанные по программе PARS для клистрона KC4083A мгновенные значения относительных продольных компонент импульсов заряженных частиц и их положения соответственно. Данные результаты были получены для частоты входного сигнала, имеющего отстройку от центральной частоты полосы усиления $\Delta f = -20$ МГц. Как видно из рисунков, электроны пучка модулируются по скорости электромагнитным полем входного резонатора.

Модуляция по скорости приводит к модуляции по плотности и группированию электронов в сгустки. Электромагнитные поля последующих промежуточных резонаторов, возбуждаемые сгустками электронов, усиливают модуляцию по скорости и по плотности. Степень сжатия электронов в сгустках характеризуется амплитудой первой гармоники конвекционного тока I_1 , которая постепенно увеличивается по длине прибора.

Одной из основных особенностей широкополосных клистронов является сильная зависимость характера нарастания $I_1(z)$ от частоты входного сигнала. На рис. 2в приведены рассчитанные продольные распределения относительной первой гармоники конвекционного тока в приборе для различных значений отстройки частоты входного сигнала Δf . За счет второго и третьего резонаторов линейного усилителя клистрона, частоты которых отстроены влево от центральной частоты, нарастание амплитуды $I_1(z)$ для частот левого края полосы происходит более равномерно, чем на правом краю. Группирование же на правом краю полосы является неравномерным по длине прибора и происходит в основном за счет эффективного взаимодействия с полями резонаторов нелинейного

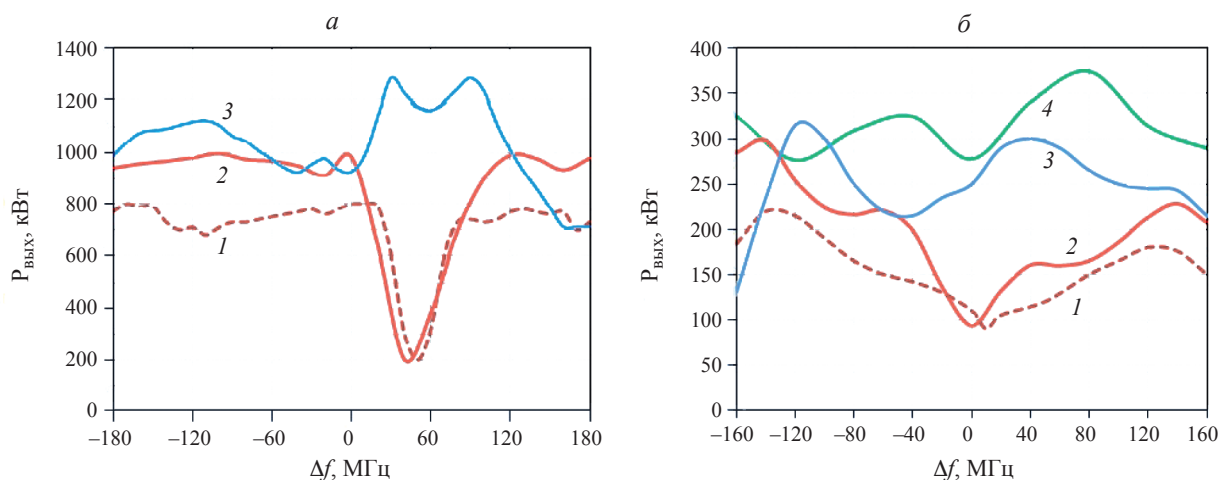


Рис. 1. АЧХ клистронов KC4083A (а) и KC4079E(б), полученные в эксперименте (кривая 1), с помощью двумерной программы «Арсенал-МГУ» (кривая 2), с помощью одномерных программ «Клистрон-МГУ» (кривая 3) и KLY6 (кривая 4).

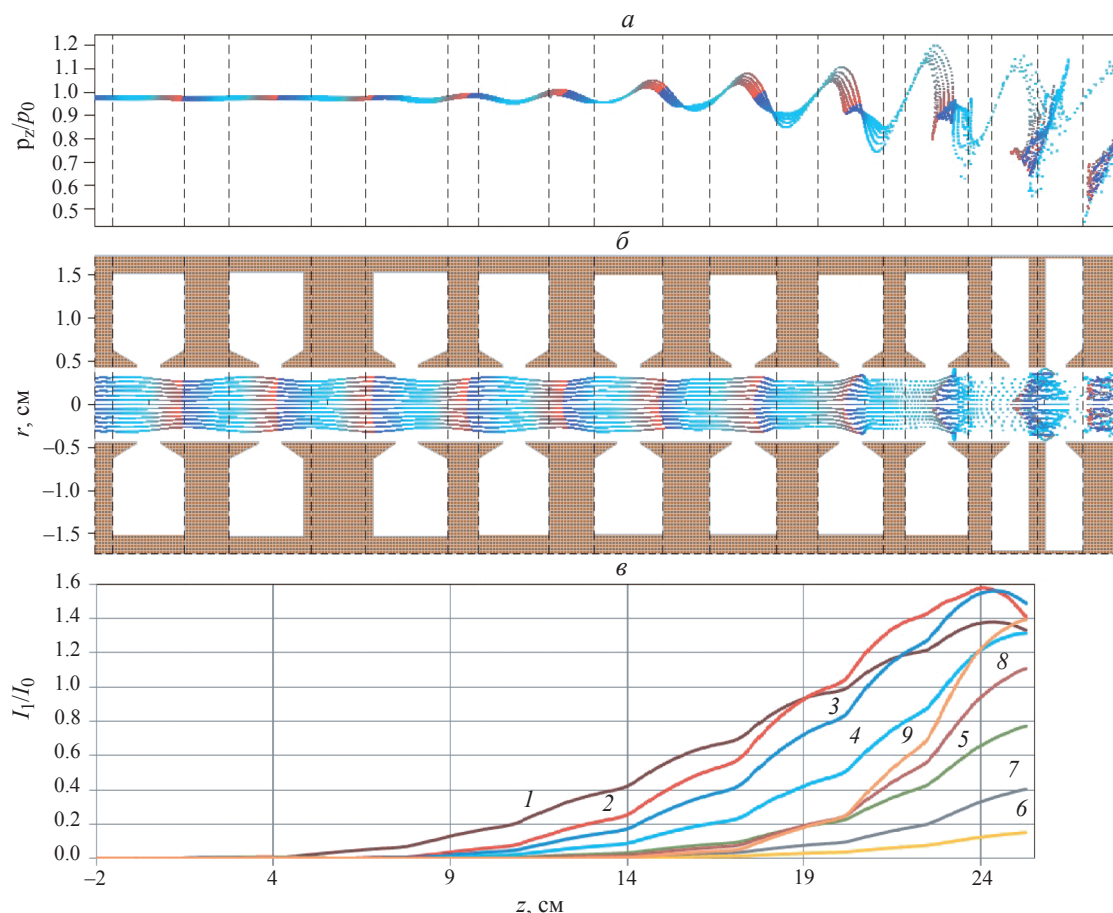


Рис. 2. Рассчитанные по программе PARS для клистрона КС4083А мгновенные значения относительных продольных компонент импульсов заряженных частиц (а), их положения (б) и продольные распределения относительной первой гармоники конвекционного тока в приборе для различных значений отстройки частоты входного сигнала от центральной частоты рабочей полосы прибора Δf , МГц: -180 (1), -40 (2), -20 (3), 0 (4), 20 (5), 40 (6), 60 (7), 100 (8), 160 (9).

группирователя. При этом на их зазорах возникают значительные амплитуды напряжения.

С помощью двумерной программы PARS были проведены исследования влияния динамической расфокусировки электронного пучка на АЧХ прибора. Было проведено сравнение результатов для случая использования экспериментальных данных для фокусирующего магнитного поля и для случая «замороженного» пучка с бесконечной величиной магнитного поля, при котором отсутствуют какие-либо радиальные пульсации электронов в пучке. Сравнение показало слабое влияние на АЧХ со стороны динамической расфокусировки в данном клистроне.

На рис. 2в распределение $I_1(z)$, соответствующее частотной отстройке провала АЧХ $\Delta f = 40$ МГц (рис. 2а), обозначено цифрой 6. Можно заметить, что низкое значение I_1 в конце группирователя вызвано слабой группировкой пучка резонаторами линейного усилителя клистрона КС4083А. Поэтому для детального сравнительного анализа процесса группирования был выбран участок клистрона КС4083А, включающего в себя первые пять резонаторов.

В расчетах по программе PARS использовался «замороженный» электронный пучок. Результаты анализа для частоты $\Delta f = 40$ МГц приведены на рис. 3. Пунктирными линиями отмечены положения центров резонаторов. Затемненные области соответствуют зонам взаимодействия электромагнитных полей резонаторов с электронным потоком. В этих областях проводится вычисление интегральных значений мощности взаимодействия в двумерной программе PARS.

На рис. 3а представлены продольные распределения $I_1(z)$, рассчитанные по одномерной модели (кривая 1) и двумерной (кривая 2). Ход кривых 1 и 2 совпадают вплоть до третьего резонатора. Амплитуда напряжения на третьем резонаторе, полученная с помощью двумерной программы, совпадает с амплитудой, рассчитанной по одномерной модели. Однако фаза напряжения, рассчитанная по двумерной программе, сильно отличается от фазы, определенной с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ». Причины этого можно понять из рис. 3б, где представлены продольные распределения продольной компоненты относительной первой гармоники конвекцион-

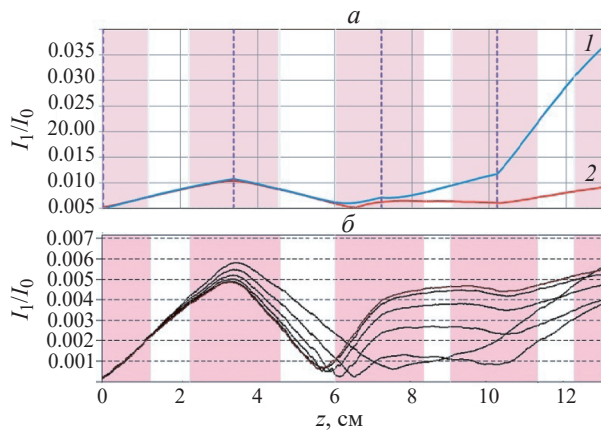


Рис. 3. Полученные для клистрона KC4083A продольные зависимости относительной первой гармоники конвекционного тока, с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ» (кривая 1 на рис. 3а) и двумерной программы PARS (кривая 2 на рис. 3а), а также продольные распределения относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока, рассчитанные по двумерной программе PARS в различных радиальных слоях электронного пучка (рис. 3б).

ного тока для различных радиальных слоев электронного пучка. Из рисунка следует, что в результате расслоения группировка различных слоев заметно различается уже во втором резонаторе, в третий резонатор электроны разных слоев попадают в различной фазе. Электроны внешних слоев продолжают демодулироваться после демодулирующего воздействия полей второго резонатора, отстроенного ниже частоты сигнала. Электроны внутренних слоев уже закончили демодулироваться и начали опять модулироваться. В результате сдвиг фаз между нелинейной проводимостью третьего резонатора и конвекционным током имеет противоположный знак относительно сдвига фаз между линейной проводимостью и конвекционным током. Это приводит к заметному отличию фазы напряжения третьего резонатора и, как следствие, к различному поведению электронов в пучке. Это хорошо видно на рис. 3а, где кривая $I_1(z)$, рассчитанная по одномерной программе, начинает опять свой рост, а кривая, полученная с помощью двумерной программы, продолжает свое падение после третьего резонатора. Как следствие, амплитуда I_1 на четвертом резонаторе, рассчитанная по двумерной программе, в 4 раза меньше, чем определенная по одномерной модели. В ходе дальнейшего усиления, погрешность одномерной программы в определении напряжения на третьем резонаторе приводят к весьма значительной накопленной ошибке в определении выходной мощности на данной частоте. Таким образом, отсутствие учета двумерного расслоения высокоперевансного электронного пучка в одномерных моделях привело к заметным ошибкам в АЧХ однолучевого клистрона KC4083A.

Для детального сравнительного анализа процесса группирования в многолучевом клистроне KC4079E был выбран участок клистрона, включающего в себя первые четыре резонатора. В расчетах по программе PARS использовался «замороженный» электронный пучок. Результаты анализа для центральной частоты ($\Delta f = 0$ МГц) приведены на рис. 4.

На рис. 4а представлены продольные распределения $I_1(z)$, рассчитанные по одномерной модели (кривая 1) и двумерной (кривая 2). Ход кривых 1 и 2 совпадают вплоть до третьего резонатора. В силу того, что в приборе используется электронный пучок с низким значением первеанса, в расчетах по программе PARS не наблюдался эффект расслоения. Поэтому фаза напряжения на третьем резонаторе, полученная с помощью двумерной программы, совпадает с фазой, рассчитанной по одномерной модели. Однако амплитуда напряжения, рассчитанная по двумерной программе, отличается от амплитуды, определенной с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ» на 40%. Причины этого можно понять из рис. 4б, где представлены зависимости относительного импеданса третьего резонатора, рассчитанные по линейной модели (кривая 1 на рис. 4б) и по нелинейной модели (кривая 2 на рис. 4б).

Из рисунка следует, что в области резонанса с собственной частотой третьего резонатора наблюдается падение амплитуды импеданса третьего резонатора на 40%, что приводит к соответствующему уменьшению амплитуды напряжения на третьем резонаторе. В ходе дальнейшего усиления, погрешность одномерной программы в определении напряжения на третьем резонаторе приводят к весьма значительной накопленной ошибке в определении выходной мощности на данной частоте. Таким образом, некорректный учет полной проводимости резонатора вблизи резонанса в одномерных моделях привел к заметным ошибкам в АЧХ многолучевого клистрона KC4079E с низкоперевансным электронным пучком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований было установлено, что при моделировании группирования интенсивных электронных потоков с высоким значением первеанса в широкополосных клистроны с использованием одномерных компьютерных программ в некоторых точках полосы может возникать значительная ошибка в определении выходных параметров прибора. Ошибка вызывается отсутствием учета в одномерных моделях эффекта расслоения электронного пучка.

Проведенный сравнительный анализ группирования в широкополосном многолучевом клистроне с помощью одномерной и двумерной программ показал возможность получения

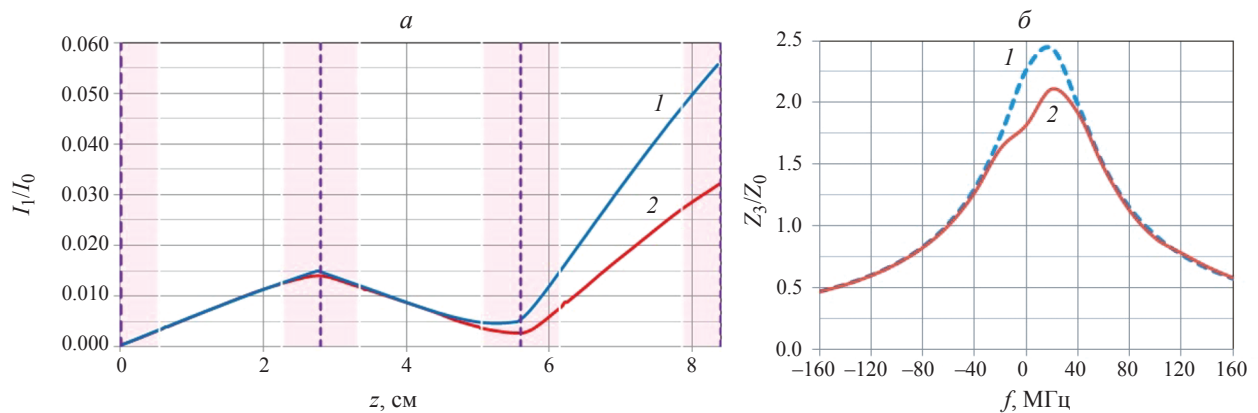


Рис. 4. Полученные для клистрона КС4079Е продольные зависимости относительной первой гармоники конвекционного тока, с помощью одномерной программы «Клистрон-МГУ» (кривая 1 на рис. 4а) и двумерной программы PARS (кривая 2 на рис. 4а), а также зависимости относительного импеданса третьего резонатора, рассчитанные по линейной модели (кривая 1 на рис. 4б) и по нелинейной модели (кривая 2 на рис. 4б).

некорректных характеристик прибора при использовании одномерных моделей, вызванных некорректным учетом электронной проводимости пучка. В точках полосы усиления вблизи резонансных частот резонаторов линейного усилителя возможно уменьшение полного импеданса резонаторов за счет влияния электронных потоков и, как следствие, уменьшение выходных параметров усилителя.

При конструировании широкополосных клистронных усилителей необходимо с осторожностью использовать оптимизацию приборов в полосе частот с помощью одномерных программ. Финальные результаты должны проверяться с помощью двумерных и трехмерных моделей.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родякин В.Е., Пикунев В.М., Аксенов В.Н. // Журн. радиоэлектрон. 2020. № 12. С. 1; Rodyakin V.E., Pikunov V.M., Aksenov V.N. // J. Radio Electron. 2020. No. 12. Art. No. 14.
2. Родякин В.Е., Аксенов В.Н. // Вест. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2021. № 5. С. 70.
3. www.cst.com
4. Родякин В.Е., Пикунев В.М., Аксенов В.Н. // Журн. радиоэлектрон. 2019. № 5. С. 1; Rodyakin V.E., Pikunov V.M., Aksenov V.N. // J. Radio Electron. 2019. No. 6. Art. No. 4.
5. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. et al. // KEK report 1/1997. P. 185.
6. Shen B., Ding Y., Zhang Z. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61. No. 6. P. 1848.
7. Zhiqiang Zhang, Jirun Luo, Zhaochuan Zhang et al. // Progr. Electromagn. Res. C. 2020. V. 103. P. 177.
8. Родякин В.Е., Пикунев В.М., Аксенов В.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 106; Rodyakin V.E., Pikunov V.M., Aksenov V.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2021. V. 85. No. 1. P. 83.
9. Родякин В.Е., Аксенов В.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 1. С. 88; Rodyakin V.E., Aksenov V.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2022. V. 86. No. 1. P. 62.
10. Канавец В.И., Сандалов А.Н. // Электрон. техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. № 3. С. 11.
11. Ding Y., Yunshu Zhu, Xiuling Yin et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2007. V. 54. No. 4. P. 624.

The effect of two-dimensional phenomena on the bunching of intense electron beams in broadband klystrons

V. E. Rodyakin^{a, *}, V. N. Aksenov^b

^a*Institute on Laser and Information Technologies of Russian Academy of Sciences, National Research Centre
«Kurchatov Institute»,
Shatura, 140700 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: vrodyakin@mail.ru*

The results of a study of the effect of two-dimensional phenomena on the electron beam bunching in single-beam and multi-beam broadband klystrons are presented. The results of a comparative analysis of beam bunching using a one-dimensional and two-dimensional model are presented. The causes of errors in determining the output parameters of broadband klystrons obtained using one-dimensional programs are analyzed.

Keywords: electron beam, broadband klystron, amplifier, electron grouping, velocity modulation, multibeam klystron