

УДК 621.385.623.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИНИАТЮРНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОДА С ДВУХЧАСТОТНЫМ ДВУХАЗОРНЫМ РЕЗОНАТОРОМ ^[1]

В. А. Царев, И. В. Бороденкова
Саратовский государственный технический университет имени
Гагарина Ю.А., кафедра «Электронные приборы и устройства»

Статья получена 17 июля 2015 г.

Аннотация. Описаны результаты численного моделирования выходных характеристик миниатюрного четырехлучевого клистрода, предназначенного для работы в диапазоне частот 200-700 МГц с выходной непрерывной мощностью около 300 Вт в полосе усиления 8 МГц. Приведены результаты экспериментальных исследований макета выходного двухмодового двухазорного резонатора на печатной плате. Показана возможность независимой настройки этого резонатора одновременно на синфазный и противофазный виды колебаний, частоты которых соответствуют первой и третьей гармоникам входного сигнала. Применение одноступенчатой рекуперации позволяет реализовать технический КПД около 70%. Прибор может использоваться вместо СВЧ тетродов в фазированных антенных решетках РЛС дециметрового диапазона.

Ключевые слова: многолучевой клистрод, численное моделирование, анодно-сеточная характеристика, двухчастотный двухазорный резонатор, печатная плата, КПД, полоса усиления.

Abstract. The results of numerical simulation of the output characteristics of a miniature four-beam klystrode designed for operation in the frequency range 200-700 MHz with continuous output power of about 300 W in-band gain of 8 MHz are described. The results of experimental studies of the layout of the output two-mode double-gap resonator on the PCB are given. The possibility of independent tuning of the resonator simultaneously in-phase and anti-phase modes of oscillations, the frequencies of which correspond to the first and third harmonics of the input signal, is shown. The usage of single-stage recovery allows to increase technical efficiency to

about 70%. The device can be used instead of the microwave tetrodes in phased array radar UHF.

Key words: multibeam klystrone, numerical modeling, anode-grid characteristic, dual-frequency double-gap resonator, a printed circuit, efficiency, band gain.

Введение

В последние годы клистроны (Inductive output tube — IOT) [1,2], являющиеся гибридами тетрода и клистрона [1,2], находят самое широкое применение в различных областях науки и техники. Они имеют малые габариты и позволяют получать высокий электронный КПД (до 60-70%) в широком диапазоне рабочих частот, начиная от 200 МГц до 1.3 ГГц. Наибольшее распространение в настоящее время получили телевизионные клистроны с выходной непрерывной мощностью свыше 10 кВт. Однако значительный интерес представляет создание миниатюрных клистронов с выходной мощностью 0,3-1 кВт. Их резонансные системы, также как и замедляющие системы ЛБВ на печатных платах [3], могут быть миниатюризированы за счет выполнения их на подвешенной керамической подложке. Такие приборы могли бы использоваться вместо СВЧ тетродов в фазированных антенных решетках РЛС дециметрового диапазона, для которых вопросы миниатюризации, уменьшения стоимости и повышения идентичности параметров выступают на первое место [4]. Одной из возможностей дальнейшего повышения их КПД (до 75%) является использование двухчастотного режима отбора энергии от модулированного потока за счет использования двух выходных резонаторов без трубы дрейфа между ними (кластера), один из которых настроен на первую гармонику, а другой на третью гармонику [5] (рис. 1).

Использование кластера из двух однозачерных резонаторов 5, 6, при оптимально подобранных по амплитуде и фазе напряжениях первой и третьей гармоник, позволяет уменьшить влияние пролетных эффектов при отборе энергии, а также улучшить спектр скоростей электронов на входе в коллектор.

Последнее позволяет реализовать одноступенчатую рекуперацию пучка в коллекторе и повысить технический КПД по первой гармонике с примерно на 10%. Кроме этого, уменьшается мощность, рассеиваемая в коллекторе, и, следовательно, ослабляются требования к системе охлаждения [6].

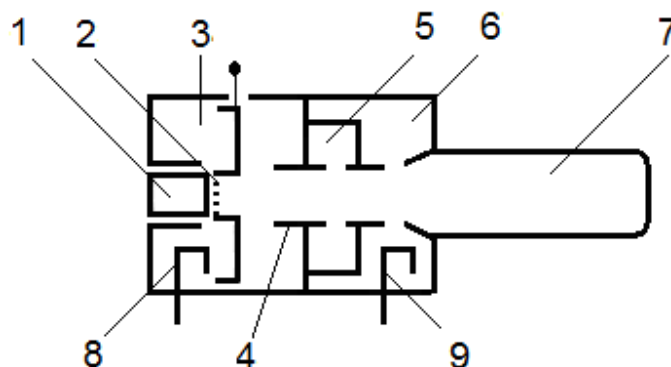


Рис. 1. Схема однолучевого клистрода с кластерным бигармоническим резонатором: 1- катод, 2-управляющая сетка, 3-входной резонатор, 4-труба дрейфа, 5- резонатор, настроенный на третью гармонику, 6- резонатор, настроенный на основную частоту, 7- коллектор, 8, 9-ввод и вывод энергии.

Целью настоящей работы является исследование возможности создания в дециметровом диапазоне миниатюрного клистрода с выходным резонатором на печатной плате, настроенным одновременно на первую и третью гармоники входного сигнала. Положим, для определенности, что мини-клистрода должен работать на центральной частоте 450 МГц с выходной непрерывной мощностью 300 Вт. При этом он должен иметь полный КПД не менее 60%, полосу усиления около 8 МГц и коэффициент усиления не менее 20 дБ.

1. Конструкция прибора

Для уменьшения величины рабочего напряжения, расширения полосы и увеличения коэффициента усиления и КПД была выбрана четырехлучевая конструкция клистрода с одноступенчатой рекуперацией электронного потока и бигармоническим двухззорным резонатором, выполненным на печатной плате. Схематическое изображение этого прибора показано на рис.2. Двухззорные резонаторы имеют, по сравнению с одноззорными резонаторами, повышенное (в 1,5-2 раза) значение эффективного

характеристического сопротивления ρM^2 [7,8]. Такие объемные резонаторы можно настроить на двухмодовый режим одновременного возбуждения на двух частотах с кратностью $k = f_3 / f_1 = 3$, соответствующих синфазному и противофазному видам колебаний [9].

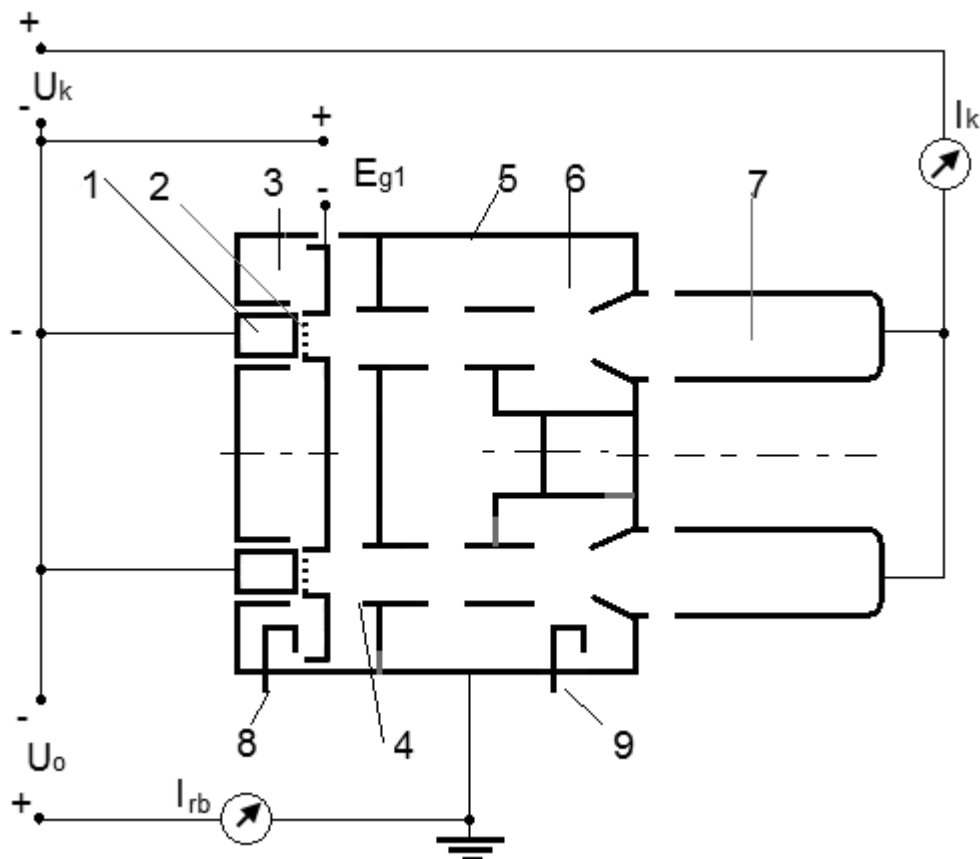


Рис. 2. Схема многолучевого клистрода (обозначения элементов соответствуют, принятым на рис.1).

Триодная часть исследуемого мини-клистрода включает в себя, помимо съемного входного резонатора, четыре отдельные электронные пушки с мелкоструктурными управляющими сетками. Размерная схема одной из парциальных пушек показана на рис.3. Выходной резонатор, входящий в состав клистронного узла прибора, разделен на вакуумную и невакуумную части (рис.4). Резонансные элементы в вакуумной части резонатора б представляют собой Т-образную высокочастотную полосковую линию в виде пленочных металлических проводников 11, расположенных с двух сторон на диэлектрической плате 8 внутри о корпуса прямоугольной формы. На разветвленных концах этой линии закреплены два стержня 9, закачивающиеся

пролетными трубками 10. Торцы пролетных труб 10 вместе со стенками резонатора образуют четыре двойных бессеточных зазора. Находящаяся вне вакуума часть резонатора 12 представляет собой короткозамкнутый отрезок экранированной полосковой линии. Длина этой линии может изменяться за счет перемещения короткозамыкающего поршня. Прибор имеет два отдельных коллектора 7, размещенных соответственно пролетным каналам. Магнитная фокусирующая система на рисунке 3 не показана. Диаметр одного пролетного канала $2a=8$ мм, длина зазора $d_1=d_2=7$ мм, длина втулки $L=20$ мм.

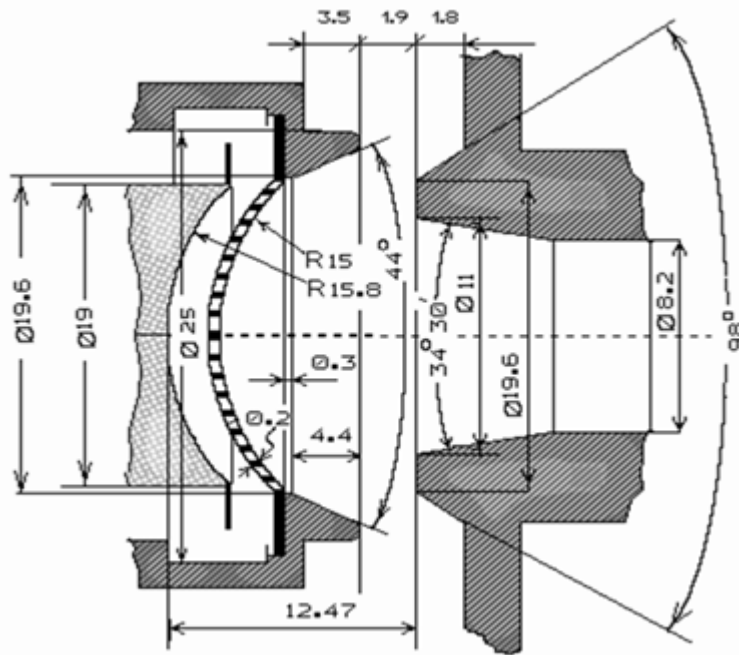


Рис. 3. Конструкция частичной пушки.

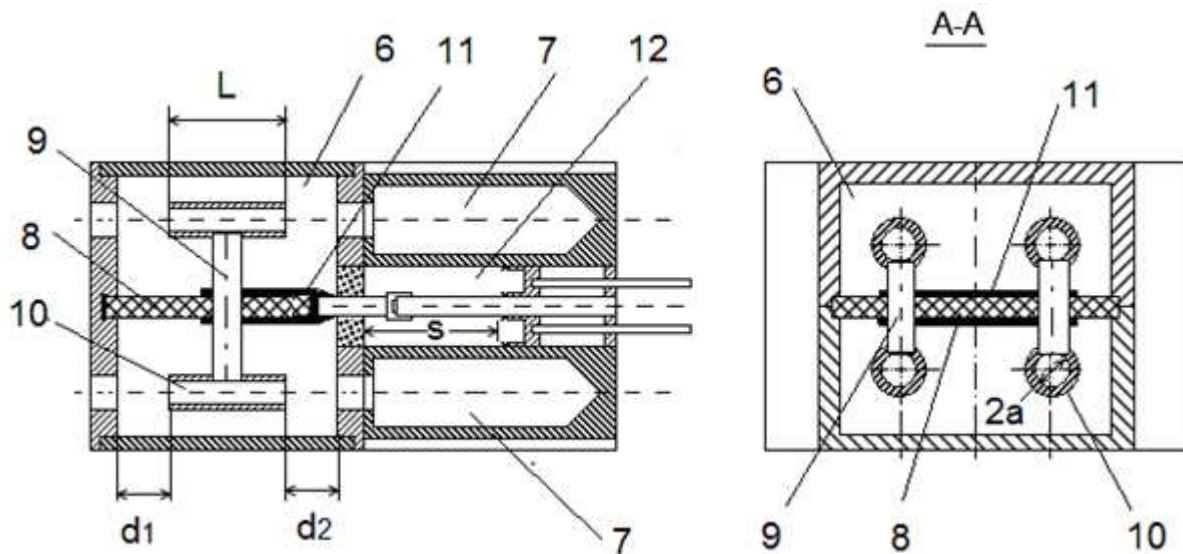


Рис. 4. Конструкция клистронной части прибора.

2. Результаты экспериментальных исследований

В ходе проведенных исследований был рассчитан и изготовлен макет выходного бигармонического резонатора, выполненный на печатной плате. С помощью этого макета были определены в рабочем диапазоне частот электродинамические параметры резонатора при возбуждении его одновременно на противофазном и синфазном видах колебаний. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 5. Из этого рисунка видно, что перемещение поршня S влияет лишь на частоту f_1 и характеристическое сопротивление ρ_1 противофазного вида колебаний. При перестройке резонансная частота f_1 изменялась от 200 до 700 МГц, а характеристическое сопротивление ρ_1 изменялось от 350-200 Ом. Резонансная частота синфазного вида колебаний $f_3=3 f_1=1350$ МГц и характеристическое сопротивление $\rho_3=125$ Ом оставались неизменными, поскольку они зависят лишь от объема прямоугольной части резонатора, который не изменялся.

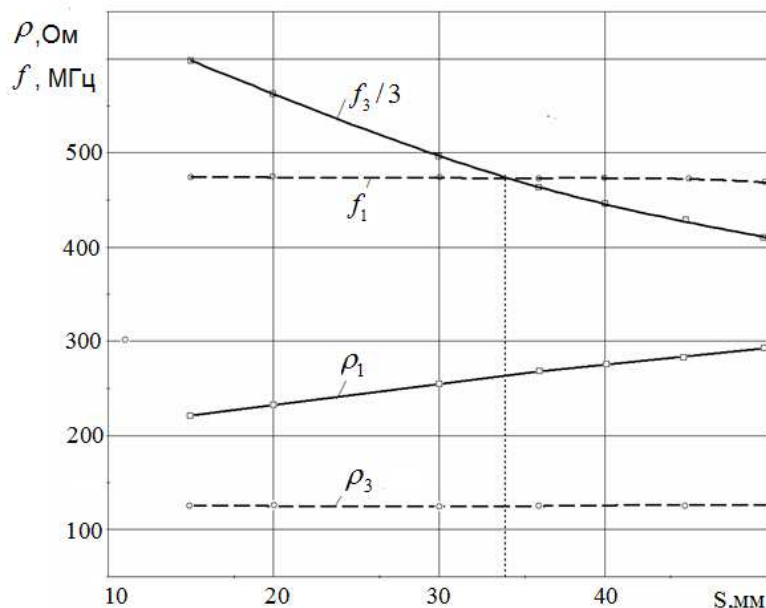


Рис. 5. Зависимости резонансных частот и величин характеристических сопротивлений от длины перемещения настроечного поршня S

3. Результаты расчета выходных параметров

Формирование электронных сгустков происходит в триодной части. Как видно из рис. 6а, при подаче входного сигнала в катодно-сеточный резонатор,

между сеткой и катодом, наряду с постоянным напряжением смещения E_{g1} , действует переменное напряжение $U_m = U_{mg} \sin(\omega t)$. За счёт суммарного действия этих напряжений в режиме с отсечкой катодного тока на выходе из сетки формируются импульсы конвекционного тока косинусоидальной формы с максимальной амплитудой I_{am1} и длительностью в половину или менее половины периода входного сигнала T .

В результате численного расчета прибора по программе [10] для заданных геометрических и электрических параметров парциальной сферической пушки, показанной на рис. 3, была определена зависимость максимального значения импульса анодного тока парциального луча I_{am1} от угла отсечки катодного тока Θ (рис. 6b), где $\Theta = \arccos \frac{E_{g0} - E_{g1}}{U_{mg}}$ - угол отсечки катодного тока, E_{g0} - напряжение запираения лампы, E_{g1} - напряжение смещения на сетке.

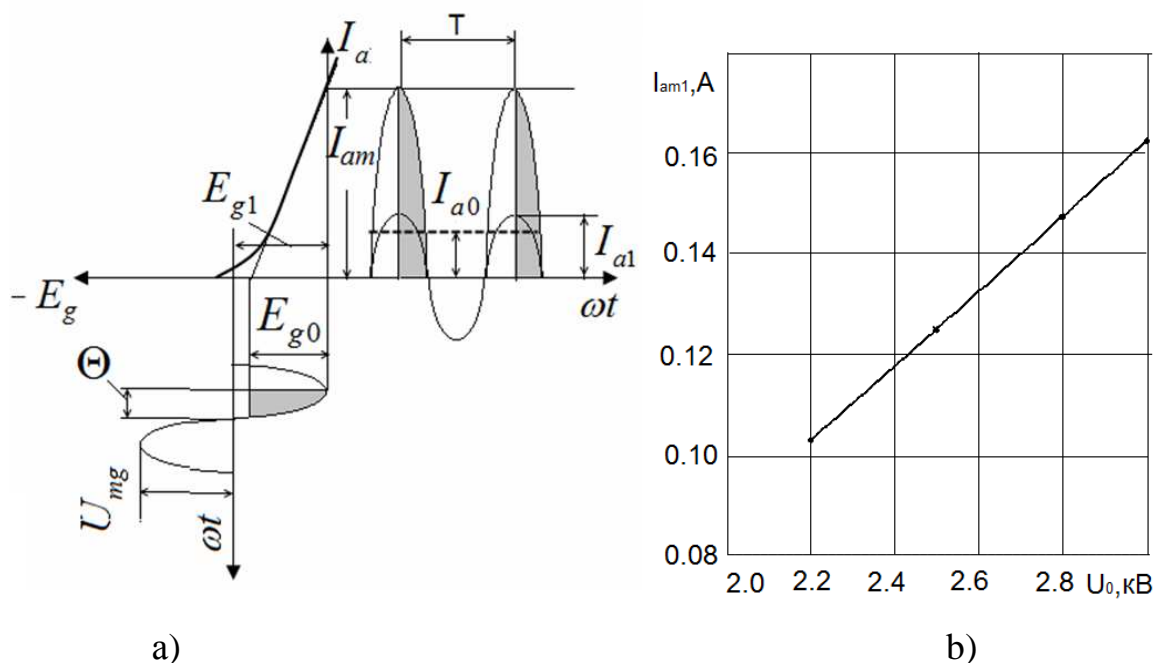


Рис. 6. Схема формирования косинусоидального импульса анодного тока (а) и расчетная зависимость максимального значения импульса анодного тока парциального луча на входе в первый зазор выходного резонатора от угла отсечки катодного тока (б).

Будем считать, что угол пролета в промежутке «сетка - центр первого зазора выходного резонатора» оказывается малым по сравнению с углом пролета расстояния «сетка-катод». Поэтому изменением формы импульсов конвекционного тока в этом промежутке можно пренебречь. Задаваясь величиной угла отсечки и пользуясь теорией разложения косинусоидального импульса анодного тока (при постоянной крутизне катодно-сеточной характеристики), определим постоянную составляющую I_{a0} и амплитуды первой I_{a1} и третьей I_{a3} гармоник конвекционного тока. [11]:

$$I_{a0} = \alpha_0 \cdot I_{am1} \cdot N, \quad I_{a1} = \alpha_1 \cdot I_{am1} \cdot N; \quad I_{a3} = \alpha_3 \cdot I_{am1} \cdot N, \quad (1)$$

где $\Theta = \arccos \frac{E_{g0} - E_{g1}}{U_{mg}}$ - угол отсечки катодного тока,

$$\alpha_0 = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi (1 - \cos \theta)}, \quad \alpha_1 = \frac{\theta - \cos \theta \sin \theta}{\pi (1 - \cos \theta)}; \quad \alpha_3 = \frac{(\sin 3\theta \cos \theta - 3 \cos 3\theta \sin \theta)}{3\pi(3^2 - 1)(1 - \cos \theta)};$$

N - число лучей, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_3$ - коэффициенты разложения косинусоидального импульса в ряд Фурье для соответствующих составляющих анодного тока.

Эти гармоники конвекционного тока при поступлении сгустков электронов в выходной бигармонический резонатор возбуждают его на двух частотах с кратностью $k = f_3 / f_1 = 3$, соответствующих синфазному и противофазному видам колебаний. Далее по известной в теории клистронов методике [12] были определены оптимальные параметры режима работы прибора с учетом нелинейного характера изменения электронных параметров двойного бессеточного зазора (коэффициентов взаимодействия M_1, M_3 и величин относительной электронной проводимости G_{e1} / G_0 и G_{e3} / G_0) от ускоряющего напряжения U_0 и угла отсечки катодного тока Θ . В результате проведенных расчетов найдено оптимальное отношение парциальных амплитуд ВЧ напряжения гармоник $K = U_{R3} / U_{R\Sigma} = 0.125$, при котором реализуется максимально плоская форма суммарного напряжения (рис.7). Показано, что

найденное соотношение может быть реализовано на практике, если вдвое увеличить резонансное сопротивление на третьей гармонике, путем введения дополнительного пассивного резонатора, образующий двухзвенную фильтровую систему, работающую на частоте 1350 МГц. Установлено, что в бигармоническом режиме отбора энергии амплитуда суммарного ВЧ напряжения на выходной колебательной системе уменьшается и составляет 0,875 от амплитуды ВЧ напряжения в одномодовом режиме, принятой за единицу ($K_f=0,875$).

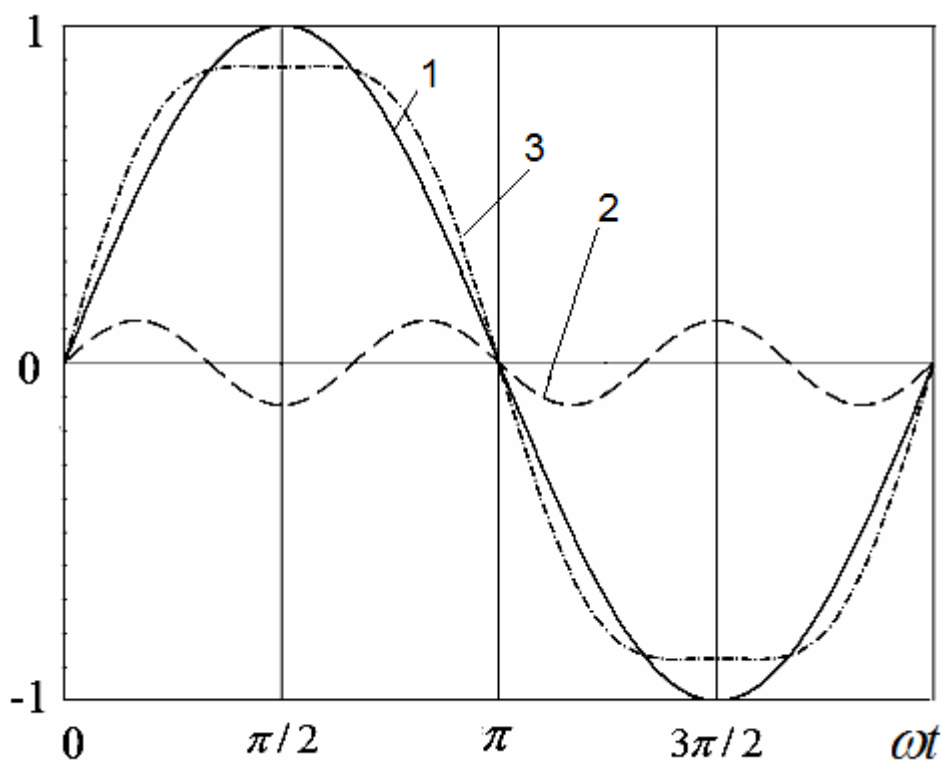


Рис.7. Форма ВЧ напряжения при одночастотном-1 ($U_{R1} = \sin \omega t$) и бигармоническом-3 ($U_{R\Sigma} = \sin \omega t + 0,125 \sin 3\omega t$) сигналах.

Результаты расчетов параметров процесса бигармонического отбора энергии приведены в таблице.

Таблица 1. Оптимальные параметры мини-клизтрода

п-номер гармоники	Θ , град	U_0 , кВ	I_{a0} , А	Mn	Gn/Go	Контурный КПД- η_k	ρ_n , Ом	Q_{0n}	Q_n	$K = \frac{U_{R\Sigma}}{U_{R1}}$
1	100	2.6	0.20 9	0.91	-0.129	0,9	250	60 0	56	1
3	-	-	-	0.53 3	0.528	-	125	12 00	140	0.125

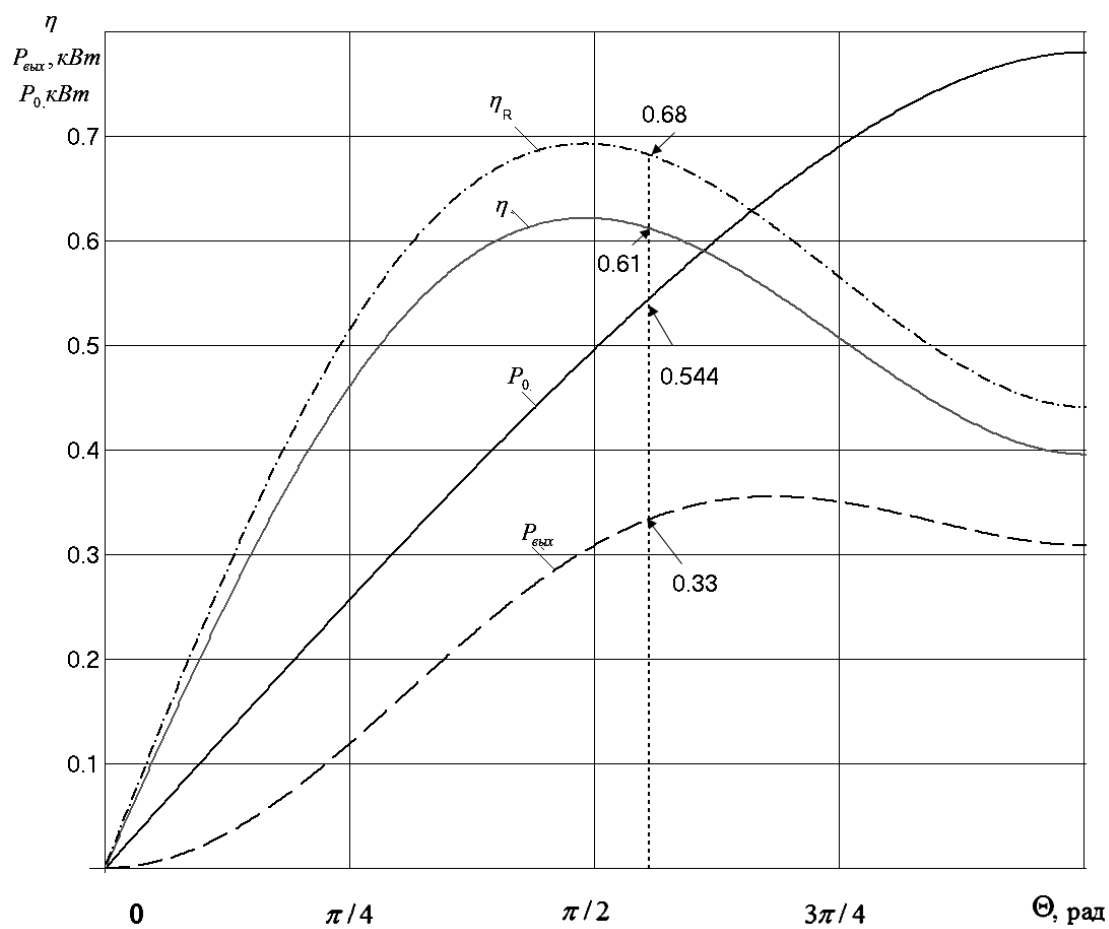


Рис.8. Зависимость выходных параметров прибора от угла отсечки катодного тока.

По найденным значениям этих параметров по формулам (2-3) были определены подводимая мощность, ВЧ мощность, поступающая в нагрузку, и

полный КПД для двух режимов; режима без рекуперации - η и для режима одноступенчатой рекуперации - η_R .

$$P_0 = I_{a0} U_0 = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi (1 - \cos \theta)} \cdot I_{am} \cdot U_0, \quad (2)$$

$$P_1 = \eta_k I_{a1} U_{R\Sigma} M_1 / 2 = 0.5 \cdot K_f \left[I_{am} M_1 \frac{\theta - \cos \theta}{\pi (1 - \cos \theta)} \right]^2 \cdot \eta_k \rho_1 Q_{n1} \quad (3)$$

Окончательные результаты расчетов показаны на рис. 8.

4. Выводы

Результаты расчета показали, что для достижения требуемых значений коэффициента усиления по мощности K_y (около 22 дБ) на частоте 450 МГц оптимальный угол отсечки должен составлять 100 градусов при общем числе лучей не менее 4, при величине ускоряющего напряжения $U_0=2,6$ кВ и микропервансе одного луча около 0.34 мкА/В^{3/2}.

Для увеличения резонансного сопротивления выходной бигармонической колебательной системы на частоте третьей гармоники необходимо ввести в состав этой системы дополнительный пассивный резонатор, образующий двухзвенную фильтровую систему, работающую на частоте 1350 МГц.

Потери в диэлектрической плате могут быть скомпенсированы за счет выбора параметров двойного бессеточного зазора на основной частоте в области отрицательных значений относительной электронной проводимости выходного резонатора. В режиме рекуперации возможно получение высокого полного КПД (около 60%) и выходной мощности не менее 300 Вт в полосе усиления 8 МГц. Применение одноступенчатой рекуперации позволяет реализовать технический КПД около 70%.

^[1] Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 8.1065.2014/К.

Литература

1. Wide-Band Inductive-Output Amplifier, by Haeff et al., Proceedings of the I.R.E., Mar. 1940, pp. 126-130.
2. *D. H. Preist and M. B. Shrader*. The klystrode – an unusual transmitting tube with potential for UHF-TV. Proc. IEEE, vol.70, pp.1318-1325, Nov. 1982.
3. Сазонов В.П. Приоритеты России в вакуумной СВЧ электронике в XX столетии. М.: ИД «Медпрактика-М», 2012.-356 с.
4. А. Н. Королев, С. А. Зайцев, М. И. Лопин и др. Многолучевые клистроды для телевидения и радарных применений. Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, № 1, 2003. С.5-7.
5. Pat. 6465958 United States, Int.Cl⁷ H 01 J 25/10. Electron beam tubes / Wilcox D.M., Bowler D.; assignee Eev Limited. – № 09/555,012; decl. 27.11.1998; publ. 15.10.2002. – 6 p.
6. Галдецкий А. В., Королев А. Н. О возможности повышения усиления и линейности телевизионных клистродов. В кн.: 15-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Материалы конф. [Севастополь, 14-17 сент. 2005 г.]. – Севастополь: Вебер, 2005, с. 195-196.
7. Патент № 2084042. Клистрод / В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко. Приоритет от 29.06.1994, опубл. 10.07.1997.
8. Патент на полезную модель № 55506 Многолучевой клистрод / Пчелинцев Г.А., Царев В.А. Заявка № 2006109342 от 23 марта 2006 г.
9. Корчагин, А. И. Исследование режима двухмодового взаимодействия полей фрактального двухззорного резонатора с электронами в многолучевом клистроде / А. И. Корчагин, В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). – 2012. – № 12. ISSN 1684-1719.
10. Кармазин, В.Ю. Математическое моделирование режимов работы катодно- сеточных узлов в многолучевом клистроде / В. Ю. Кармазин, В. А. Царев // Актуальные проблемы электронного приборостроения

(АПЭП-2002) : материалы 5 междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 18-19 сент. 2002 г. - Саратов, 2002. - С. 123-127.

11. Агафонов Б.С. Расчет экспериментальных режимов УКВ и ДЦВ генераторных ламп – М.: Энергия , 1966. – 224с.
12. Хайков А.З. Клистронные усилители.- М.: Связь, 1974.- 392 с.