

Two-cascade orboklystron-amplifiers of submillimetric waves band

Anatoli V. Aksenchyk, Alexander A. Kurayev, Irina F. Kirinovich
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, 220013, Republic of Belarus,
aksenchik@bsuir.by, kurayev@bsuir.by, kirinovich.irina@yandex.ru*

Abstract: *The mathematical model of the two-cascade orboklystron-amplifier with sheet beams is formulated. The analysis of processes of interaction in two-cascade amplifiers is carried out. Optimum parameters of amplifiers are defined and calculations of amplitude characteristics of amplifiers on frequency of 180 GHz are carried out. Calculation electronic efficiency of two-cascade orboklystron-amplifiers with sheet beams on frequency of 180 GHz can reach values of 5 %, electronic power 16 W, gain 35 dB.*

Keywords: *O-type amplifier, regenerative, submillimetric, sheet beam, orbotron, open resonator, klystron, optimization.*

Двухкаскадные орбоклистроны-усилители субмиллиметрового диапазона длин волн

Аксенчик А.В., Кураев А.А., Киринович И.Ф.
*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, 220013, Беларусь,
aksenchik@bsuir.by, kurayev@bsuir.by, kirinovich.irina@yandex.ru*

Аннотация: *Сформулирована математическая модель двухкаскадного орбоклистроны-усилителя с ленточным пучком. Проведен анализ процессов взаимодействия в двухкаскадных усилителях. Определены оптимальные параметры усилителей и проведены расчеты амплитудных характеристик регенеративных усилителей на частоте 180 ГГц. Расчетный электронный КПД двухкаскадных орбоклистронов-усилителей с ленточными электронными потоками на частоте 180 ГГц может достигать значений 5% , коэффициент усиления 35 дБ, электронная мощность 16 Вт.*

Ключевые слова: *усилитель О-типа, регенеративный, субмиллиметровый, ленточный пучок, орботрон, открытый резонатор, клистрон, оптимизация*

1. Введение

В работах [1-4] показано, что для усиления сигналов субмиллиметрового диапазона можно использовать орботроны-клистроны (орбоклистроны) с ленточными электронными потоками (ЭП) и ускоряющим напряжением 3 кВ. В данной работе сформулирована математическая модель двухкаскадных усилителей (без Y-циркуляторов), определены оптимальные параметры усилителей, рассчитаны амплитудные характеристики. Орбоклистрон-усилитель представляет собой клистрон с открытым резонатором (ОР). На рис. 1 приведена схема конструкции двухкаскадного орбоклистрона-усилителя с ленточным электронным пучком.

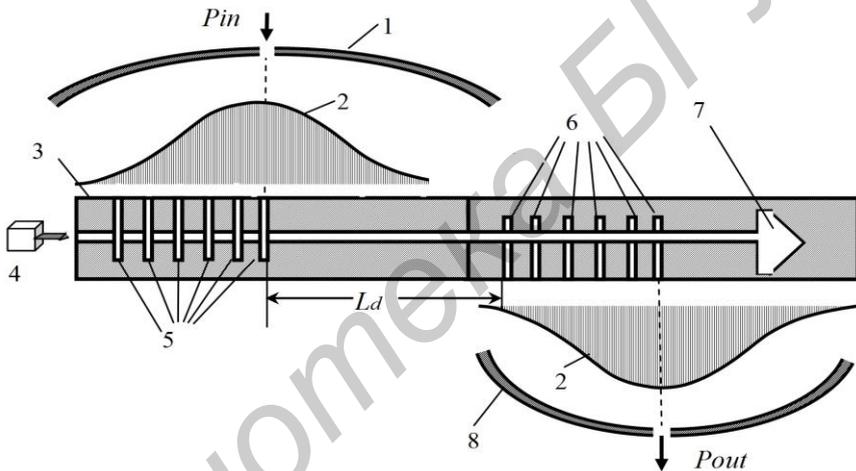


Рис. 1 Схема конструкции двухкаскадного орбоклистрона-усилителя

Fig.1. Circuit of design two-cascade orboklystron-amplifier

Здесь 1 – фокусирующее зеркало ОР первого каскада, через окно связи электромагнитная (ЭМ) волна мощностью P_{in} возбуждает в резонаторе ЭМ колебания; 2 – распределение поля рабочей моды на плоском зеркале (оно близко к гауссовому); 3 – плоское зеркало ОР; 4 – электронная пушка, формирующая ленточный электронный поток;

5 – щели связи с объемным полем резонатора первого каскада, одновременно это резонаторы клистрона первого каскада; 6 – щели связи с объемным полем резонатора второго каскада, одновременно это резонаторы клистрона второго каскада; 7 – коллектор с водяным охлаждением; 8 – фокусирующее зеркало ОР второго каскада, через окно связи (6) усиленная ЭМ волна мощностью P_{out} поступает далее в согласованную нагрузку (антенну, волновод и т.д.). L_d – длина области дрейфа между каскадами.

В щелях связи 6 и трубках дрейфа 2-го каскада происходит увеличение группировки ЭП и в последних щелях компактные сгустки электронов отдают свою энергию ЭМ полю резонатора 8 через щели связи. Электронная пушка 4 формирует ленточный ЭП, размеры пролетных каналов выбраны из условия нераспространения волн H_{10} , E_{11} по каналу.

2. Математическая модель

В математической модели применяются релятивистские уравнения движения в системе t , t_0 в декартовой системе координат в одномерном приближении [2].

Для моделирования электронного потока используется метод «крупных частиц». Электронный поток (в сечении прямоугольной формы) представлен в виде N_e «крупных частиц», расположенных равномерно на электронной длине волны $\lambda_e = \lambda\beta_0$, где $\beta_0 = v_0/c$, v_0 – начальная скорость частиц электронного потока, c – скорость света. Формулы расчета напряженности продольного поля \dot{E}^p пространственного заряда «крупной частицы» приведены в работах [3, 4]. Напряженность продольного ВЧ поля \dot{E}^0 в зазоре щели связи рассчитывается путем решения уравнения Лапласа с заданными граничными условиями [1, 4].

В модели орбоклистрона-усилителя в первом каскаде при расчете \dot{E}_k^0 – напряженности продольного ВЧ поля в зазоре k -ой щели связи учитывается поле, создаваемое входным сигналом мощностью P_{in} , подаваемого на резонатор через окно связи (рис. 1).

Порядок расчета усилителя будет следующий. Вначале рассчитываем первый каскад усилителя.

а) Для заданных значений ускоряющего напряжения U_0 , тока электронного луча I_0 , частоты f рассчитываем орбоклицтрон-генератор, затем этот генератор переводим в режим регенеративного усиления, реализуя пункты б) – г).

б) Численно определяем пусковой ток генератора I_{start} , уменьшая последовательно I_0 , рассчитываем электронный КПД η_e для дискретных значений I_0 . При некотором значении I_0 электронный КПД η_e будет близок к нулю. Это и будет значением пускового тока I_{start} .

в) Устанавливаем рабочий ток усилителя меньше пускового: $I_0 < I_{start}$.

г) Задаем входную мощность сигнала P_{in} . Полагаем, что напряжения на щелях распределены по нормальному закону, с центром распределения на последней щели, а также, что щели синфазны (все напряжения на щелях имеют нулевую фазу).

Для расчетов задаем начальное приближение напряжения на 1-й щели V_1 и напряжения на последней щели V_n , с учетом входной мощности. Тогда напряжение на k -ой щели рассчитывается по формуле:

$$V_k = V_n \exp\left(\frac{X_k - X_n}{X_1 - X_n}\right)^2 \operatorname{Ln} \frac{V_1}{V_2}$$

где X_k – расстояние между центрами 1-ой и k -ой щелями.

Электронный КПД k -го каскада рассчитываем по формуле:

$$\eta_{ek} = \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2} \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} [1 - (\beta_0 v_i)^2]^{-1/2}}{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}},$$

где $v_i = \frac{dX_i}{d\theta}$ – нормированная скорость «крупной частицы».

Решая совместно уравнения движения «крупных частиц» и уравнение возбуждения, находим решение самосогласованной задачи для первого каскада усилителя. В результате решения будут известны значения скоростей и положение «крупных частиц» на выходе из области взаимодейст-

вия 1-го каскада. Эти значения принимаем за граничные условия для начала расчета 2-го каскада.

Решая самосогласованную задачу для второго каскада, определяем выходные характеристики усилителя. Алгоритм решения самосогласованной задачи состоит в организации итерационного процесса [4].

3. Результаты расчетов

Расчет орбоклистрона-усилителя начинаем с расчета однокаскадного орбоклистрона-генератора. Размеры каналов дрейфа выбираем с учетом условия нераспространения в канале высших типов волн H_{m0} , E_{11} . При несоблюдении этого условия возникает сильная положительная обратная связь в усилителе, что приводит к самовозбуждению прибора. В работе [4] приведено описание расчета размеров щелей связи, длин труб дрейфа, размеров канала дрейфа. Для начала расчета генератора, используя [4], задаем следующие параметры для частоты $f=180$ ГГц: размеры трубки дрейфа прямоугольного сечения $a \times b = 0,08 \times 0,03$ см, размеры сечения ленточного потока $h \times \tau = 0,06 \times 0,02$ см. Размеры щели: ширина щели $l = 0,167$ см, длина щели (зазора) $d = 0,01$ см. Количество щелей $N = 10$, добротность открытого резонатора $Q = 300$, ускоряющее напряжение $U_0 = 3$ кВ, ток электронного пучка $I_0 = 0,2$ А. После проведения оптимизации орбоклистрон-генератор имеет следующие параметры: расчетный КПД $\eta_e = 0,097$, электронная мощность 58 Вт. Определяем пусковой ток генератора: $I_{\text{пуск}} = 0,105$ А. Для расчета усилителя задаем рабочий ток ниже пускового, вблизи границы самовозбуждения: $I_0 = 0,1$ А. Однако задавать рабочий ток значительно ниже пускового не следует, т.к. будет низкий КПД усилителя. Задаем добротность резонатора 1-го каскада $Q = 120$, 2-го каскада $Q = 300$.

В результате расчета двухкаскадного усилителя получены: электронный КПД $\eta_e = 0,054$, коэффициент усиления по мощности $K_p = 23,3$ дБ, электронная мощность $P_{\text{out}} = 16,2$ Вт, при входной мощности $P_{\text{in}} = 0,075$ Вт. При $P_{\text{in}} = 0,0015$ Вт электронная мощность $P_{\text{out}} = 5,2$ Вт, $K_p = 35,3$ дБ.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента усиления по мощности K_p и электронной мощности P_{out} от входной мощности P_{in} ($f=180$ ГГц).

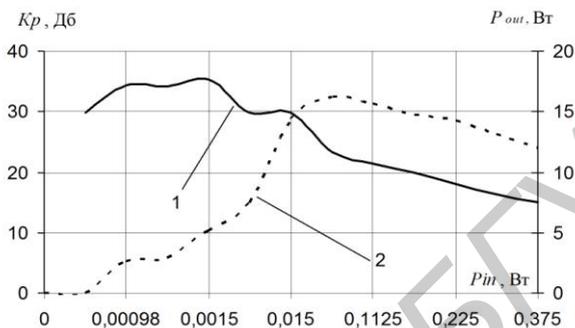


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления K_p и электронной мощности P_{out} от входной мощности P_{in} ($f=180$ ГГц)
(кривая 1 – коэффициента усиления K_p , кривая 2 – электронная мощность P_{out})

Fig. 2. Dependences of gain K_p and electronic power from input power P_{in} ($f=180$ GHz)
(curve 1 - gain K_p , curve 2 - electronic power P_{out})

Из рис.2 видно, что усиление начинается после превышения уровня входной мощности $P_{in}=0,0008$ Вт. Усилитель работает в режиме регенеративного усиления. Амплитудная характеристика – нелинейная.

4. Заключение

Проведены расчеты амплитудных характеристик усилителя на частоте 180 ГГц. Амплитудные характеристики – нелинейные. Расчетный электронный КПД орбоклистронов-усилителей с плоскими электронными потоками на частоте 180 ГГц с ускоряющим напряжением 3 кВ может достигать значений 0,054, коэффициент усиления 35 дБ, электронная мощность $P_{out}=16$ Вт. Для сравнения можно отметить, что однокаскадные схемы орбоклистронов-усилителей, описанные в [2, 4], имеют на частоте 180 ГГц

коэффициент усиления по мощности $K_p=23$ дБ, электронную мощность $P_{out}=2,8$ Вт

Список литературы

- [1] Аксенчик А.В., Киринович И.Ф., Кураев А.А. Моделирование орботронов-клистронов и умножителей частоты с плоскими пучками в диапазоне частот 0,1 – 3 ТГц // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2011. №4. С.110-118.
- [2] Аксенчик А.В., Киринович И.Ф., Кураев А.А., Еремка В.Д. Генераторы и усилители миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на орботронах клистронов с ленточными пучками // Материалы 22-ой междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (CrimiCo'2012), Севастополь, Украина, 10-14 сент. 2012, С.197-198.
- [3] Аксенчик А.В., Киринович И.Ф. Поля пространственного заряда плоских пучков // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2011. №2. С.97-107.
- [4] А. Аксенчик, А. Кураев, И. Киринович Усилители и генераторы О-типа миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (теория и оптимизация). Germany: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 с. ISBN 987-3-639-74531-3.

References

- [1] Aksenychuk A.V., Kirinovich I.F., Kurayev A.A. Modelling of orbotron-klystrons and frequency multipliers with sheet beams in the frequency band 0,1 - 3 Thz. *News of Belarus NAS, Ph.Tech. series*, 2011, no. 4, pp. 110 - 118. (In Russian).
- [2] Aksenychuk A.V., Kirinovich I.F., Kurayev A.A., Eyremka V.D. Oscillators and amplifiers of millimeter and submillimeter range on orbotron-klystrons with sheet beams // 22nd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CrimiCo'2012). Sevastopol, Ukraine, September 10-14, 2012, pp. 197 - 198. (In Russian).
- [3] Aksenychuk A.V., Kirinovich I.F. The fields of space-charge of sheet beam. *News of Belarus NAS, Ph.Tech. series*, 2011, no. 2, pp. 97 - 107. (In Russian).
- [4] Aksenychuk A.V., Kurayev A.A., Kirinovich I.F. *Amplifiers and generators of O-type of millimetric and submillimetric ranges of waves lengths (the theory and optimization)*, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 p. ISBN 987-3-639-74531-3. (In Russian).