

# Сравнение различных конструкций релятивистских клистронов

Гуринович А.Б., Лущицкая И.В.

ВМиП, ФИТУ

Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники

г. Минск, Беларусь,

e-mail: gurinovich@bsuir.by, Liv@bsuir.by

**Аннотация** – Построены модели двухкаскадных и трехкаскадных конструкций генератора на сильноточном релятивистском пучке с электродинамической системой в виде отрезка полого цилиндрического волновода. В первом случае клистрон имел две резонансные канавки, во втором – три резонансные канавки. Было показано, что в трехкаскадной конструкции режим генерации с КПД увеличивается в 1.5 раза по сравнению с двухкаскадной.

**Ключевые слова:** черенковский генератор, двухкаскадный клистрон, трехкаскадный клистрон, электродинамическая система, резонансная система

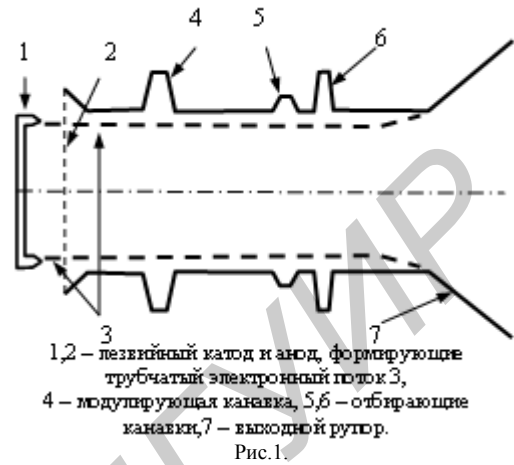
## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящем докладе выполнен поиск параметров трехкаскадной конструкции клистроно-генератора. Показано, что в такой конструкции возможен режим генерации с КПД до 28%, что приближается к лучшим вариантам черенковских генераторов. Рассматриваются особенности моделирования и обсуждаются найденные варианты клистроно-генераторов.

Появление импульсных сильноточных электронных пушек с холодными катодами в режиме взрывной эмиссии, формирующих высокопереванские релятивистские электронные пучки, стимулировало поиск перспективных конструкций генераторов СВЧ черенковского типа большой и сверхбольшой мощности [1,2]. Как показано в [3], конкуренцию черенковскому генератору в диапазоне 5-12см, может составить простая конструкция двухкаскадного релятивистского клистроно-генератора, обеспечивающая КПД до 18%. Электродинамическая система такой конструкции соответствует пространственно развитой структуре сильноточного релятивистского пучка.

## II. УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА

На рис. 1 изображена схема рассматриваемого трехкаскадного клистроно-генератора. Электронный поток 3, сформированный электронной пушкой 1,2 подается на вход электродинамической системы генератора, состоящей из отрезка полого цилиндрического нерегулярного волновода на котором имеется три резонансные канавки 4,5,6, разделенные регулярным участком. Параметры модулирующей канавки 4 подбираются из условия полного отражения  $E_{01}$ -волны на рабочей частоте. Параметры же канавок 5,6 подбираются такими, чтобы обеспечить нагруженную добротность резонансной системы канавка-дрейф-канавка в пределах 100-200. Вывод СВЧ-мощности на волне  $E_{01}$  производится через выходной рупор 7. Отработавший электронный поток осаждается на стенку волновода сразу за отбирающей канавкой 6.



1,2 – лезвийный катод и анод, формирующие трубчатый электронный поток 3, 4 – модулирующая канавка, 5,6 – отбирающие канавки, 7 – выходной рупор.  
Рис.1.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Решение самосогласованной задачи для возбуждаемого электронным потоком поля находилось с использованием методики [4].

На рис. 2 представлены основные характеристики процесса взаимодействия в расчетной области для одного из найденных вариантов профиль  $b(z)$ , границы электронного пучка  $r_{0min}$ ,  $r_{0max}$ , функция группировки  $G_r$ , электронный и волновой КПД  $\eta$ . Так же при моделировании были рассмотрены амплитуды  $|B_i|$ ,  $i=1..6$  возбуждаемых  $E_{0i}$  волн ( $i=1$  распространяющаяся,  $i>1$  закритические) и распределение компоненты  $E_z$  [кВ/см] для  $\lambda=6$ см вдоль движения пучка.

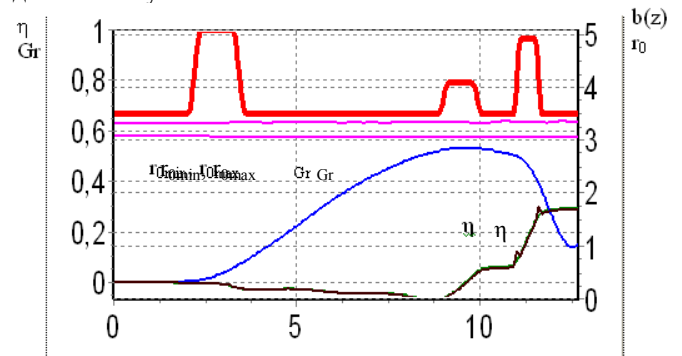


Рис.2.

Внутренний радиус волновода  $b_0=3.5$  (геометрические размеры приведены в единицах  $\lambda/2\pi$ ). Канавка 4 имеет параметры: ширина  $L_{k1}=1.625$ , высота  $h_{k1}=1.57$ . Канавка 5 -  $L_{k2}=1.23$ ,  $h_{k2}=0.57$ . Канавка 6 -  $L_{k3}=0.78$ ,  $h_{k3}=1.41$ . Крутизна всех канавок  $\Delta_{k1,2,3}=0.5$ . Участки дрейфа между канавками:  $L_{12}=5.23$ ,  $L_{23}=0.83$ . Скорость электронов  $\beta_0=0.655$  ( $U_0=160$ кВ), ток  $I_0=600$ А, средний радиус пучка  $r_0=3.1$ , его толщина 0.25. Для фокусировки пучка требуется значительное магнитное поле ( $F=B_0e/m_0\omega_0 \geq 3.5$ ).

Слева от первой и справа от третьей канавки ставится условие полного согласования. Между канавками устанавливается характерное для стоячей  $E_{01}$ -волны распределение амплитуды  $B_1(z)$ . Мощность выводится распространяющейся вправо  $E_{01}$ -волной, амплитуда которой примерно в 5 раз меньше амплитуды поля в резонаторе. Добротность электродинамической системы, рассчитанная по полуширине резонансной кривой равна 180.

Основное взаимодействие электронов с продольной составляющей  $E_z$  электромагнитного поля происходит в области канавок, где величина  $E_z$  достигает 50-100 кВ/см.

За счет того, что электронный поток проходит вблизи границы волновода, действие поля несинхронной  $E_{01}$ -волны в области дрейфа незначительно и ослаблено также действие продольной составляющей поля пространственного заряда [5,6]. На участке дрейфа происходит монотонный рост функции группировки до насыщения в области отбирающих канавок и происходит небольшая накачка энергии в электронный поток за счет взаимодействия с  $E_{01}$  волной. Интенсивный отбор энергии реализуется в области второй и третьей канавок.

Зависимость эффективности генерации от величины тока пучка трехкаскадного клистрона представлена на рис. 3. Пусковой ток равен  $\sim 300$ А. Максимальная эффективность генерации достигается при токе  $\sim 550$ А. Эффективная генерация наблюдается вплоть до токов  $\sim 1500$ А. Графические характеристики работы трехкаскадного клистрона.

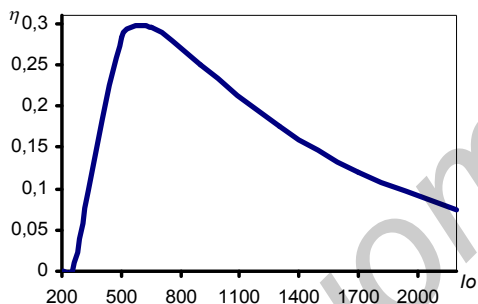


Рис. 3.

Для сравнения на рис.4 представлена зависимость эффективности генерации от величины тока пучка для двухкаскадного клистрона. Пусковой ток равен  $\sim 400$ А. Эффективная генерация наблюдается при токах в диапазоне  $500\text{А} < I_0 < 1500\text{А}$

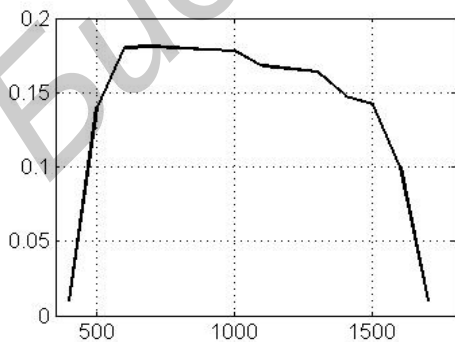


Рис. 4

Резонансная кривая холодной электродинамической системы для трехкаскадного клистрона представлена на рис.5. Здесь  $A_0$  - амплитуда  $E_{01}$  - волны. Рассчитанная по ней нагруженная добротность равна

$\sim 170$ . Как видно, рабочая частота генератора несколько выше собственной частоты холодного резонатора.

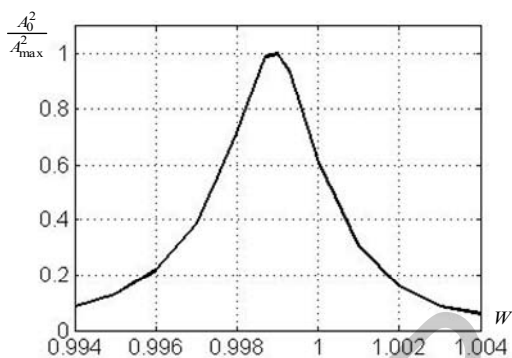


Рис.5

Представленные материалы свидетельствуют о достаточно высокой эффективности релятивистских клистронов-генераторов сверхбольшой мощности, сопоставимой с эффективностью лучших вариантов черенковских генераторов такой же мощности. Между тем клистрон-генератор имеет ряд преимуществ перед черенковским генератором: конструкция клистрона-генератора значительно проще и технологичней; в клистроне-генераторе одночастотная резонансная система, что обеспечивает отсутствие паразитных колебаний и неустойчивостей.

Для поиска параметров трехкаскадного клистрона в качестве начального приближения использовался вариант двухкаскадного клистрона, в области дрейфа которого помещалась дополнительная канавка. Вначале предполагалось, что дополнительная канавка будет выполнять роль догруппирователя. Однако, как показали расчеты, самым выгодным оказался каскадный отбор энергии в двух близко стоящих резонаторах.

- [1] Бугаев С.П. и др. Релятивистский многоволновой черенковский генератор // Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы IV Всесоюзного семинара (Москва, 24-26 января 1984г.), Горький, 1984. – Выпуск 4. – с.79-103
- [2] Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Релятивистская лампа обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором // Письма в ЖТФ, 2005, т.31, вып.10. С.17.
- [3] Лущицкая И.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Двухкаскадный релятивистский клистрон-генератор // КрыМиКо 2007 с.169.
- [4] Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Моделирование и оптимизация мощных электронных приборов СВЧ. – Минск, БГУИР. 2006. 275с.
- [5] Месяц Г.А. Импульсные ускорители для релятивистской СВЧ – электроники // Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы IV Всесоюзного семинара (Москва, 24-26 января 1984г.), Горький, 1984. – Выпуск 4. – с.192-216.
- [6] Канавец В.И. Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках М.:МГУ, 1987. 187с.