

УДК 621.385

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КЛИСТРОН-ГЕНЕРАТОР С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗВИТЫМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ПУЧКОМ

А.Б. ГУРИНОВИЧ, А.А. КУРАЕВ, А.К. СИНИЦЫН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 15 декабря 2008

Выполнено моделирование двух- и трехкаскадной конструкции генератора на сильноточном релятивистском пучке с электродинамической системой в виде отрезка полого цилиндрического волновода, имеющего две или три резонансные канавки. В поле первой канавки реализуется начальная модуляция электронного пучка, вторые две обеспечивают отбор энергии. Обратная связь реализуется на волне E_{01} . Показано, что в такой конструкции клистрона возможен режим генерации с КПД (коэффициент полезного действия) до 31% (в трехкаскадной) и до 20% (в двухкаскадной) в диапазоне напряжений электронного пучка 150–300 кВ при токах 0,5–1 кА.

Ключевые слова: клистрон-генератор, модуляция, резонансные канавки, режим генерации.

Введение

Появление импульсных сильноточных электронных пушек с холодными катодами в режиме взрывной эмиссии, формирующих высокоперевые релятивистские электронные пучки, стимулировало поиск перспективных конструкций генераторов СВЧ черенковского типа большой и сверхбольшой мощности [1, 2]. В классических черенковских генераторах реализуется излучение электронных сгустков, находящихся в синхронизме с поверхностной волной вблизи периодически гофрированной границы волновода. При этом наилучшие условия генерации реализуются в двухсекционной конструкции, в которой, как отмечают авторы [1], первая секция в режиме задающего ЛОВ-генератора с участком дрейфа во многом аналогична группирователю клистрона с распределенным взаимодействием. Как следует из [2], роль модулятора может выполнять и резонатор, образованный регулярным участком волновода между катодной сеткой и замедляющей системой. В работах [3–6] показано, что роль модулятора в таком генераторе может также выполнять резонансная канавка, настроенная на отражение E_{01} -волны и выполняющая одновременно роль рефлектора, закрывающего катод (что важно при многоволновой реализации генератора). Обратная связь в генераторе осуществляется за счет отраженной волны от замедляющей системы и дополнительных нерегулярностей волновода, которые совместно с модулирующей канавкой образуют резонансную систему.

В настоящей статье рассматриваются простейшие двух- и трехкаскадная конструкции генератора, работающего по схеме клистрона с обратной связью, в котором роль, как модулятора, так и отбирателя играют резонансные канавки. Электродинамическая система предлагаемой конструкции соответствует пространственно развитой структуре сильноточного релятивистского пучка. Показано, что даже при частичной оптимизации в двухкаскадной конструкции возможен мягкий режим генерации с КПД до 20%, что не уступает классическому карсинотрону. Также показано, что в трехкаскадной конструкции возможен режим генерации с КПД до 31%, что приближается к лучшим вариантам черенковских генераторов. Рассматриваются особенности моделирования и обсуждаются найденные варианты клистронов-генераторов.

Устройство генератора

На рис. 1 изображены схемы рассматриваемых двух- и трехкаскадного клистрона-генератора.

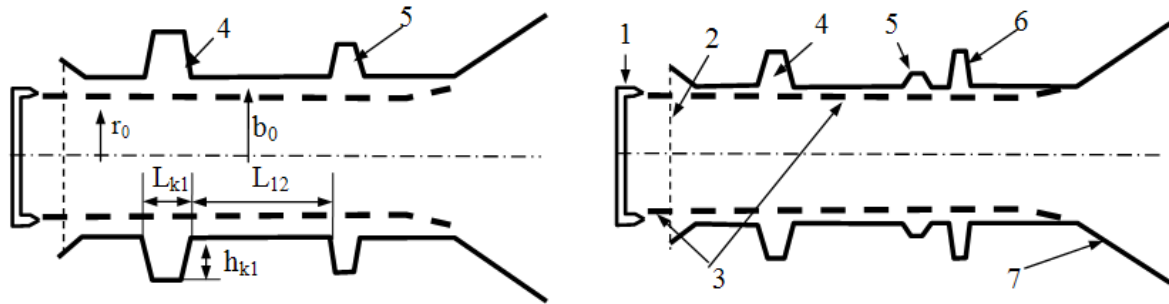


Рис. 1. Схема релятивистского клистрона: *а* — двухкаскадного; *б* — трехкаскадного. 1, 2 — лезвийный катод и анод, 3 — трубочатый электронный поток, 4 — модулирующая канавка, 5, 6 — отбирающие канавки, 7 — выходной рупор

Электронный поток 3, сформированный электронной пушкой 1, 2 подается на вход электродинамической системы генератора, состоящей из отрезка полого цилиндрического нерегулярного волновода на котором имеется одна модулирующая канавка 4 и одна или две отбирающие канавки 5, 6. Между канавками 4, 5 находится регулярный участок дрейфа и группирования электронного пучка. Модулирующая канавка 4 полностью отражает E_{01} -волну и заграждает катод. Ее параметры подбираются из условия полного отражения E_{01} -волны на рабочей частоте. Параметры же канавок 5, 6 и связанного с ними и согласованного с рупором 7 выходного волновода подбираются такими, чтобы обеспечить нагруженную добротность резонансной системы канавка-дрейф-канавка-вывод энергии в пределах 100–200. Вывод СВЧ-мощности на волне E_{01} производится через выходной рупор 7. Отрабатывший электронный поток осаждается на стенку волновода сразу за отбирающими канавками.

Математическая модель

Решение самосогласованной задачи для возбуждаемых электронным потоком симметричных E_{01} -волн полого нерегулярного волновода производится с использованием метода преобразования координат, описанного в [4, 6]. Данная методика позволяет выполнять полную оптимизацию профиля электродинамической системы электронного прибора.

Конфигурация канавок задавалась тремя параметрами h_k , L_k , Δ_k : $h_k = b_k - b_0$ — высота канавки, b_0 — внутренний радиус регулярного волновода, b_k — радиус регулярного волновода на дне канавки; L_k — ширина основания канавки, Δ_k — параметр крутизны боковых стенок, через который определяется $L_k \cdot \Delta_k$ — ширина регулярного участка на дне канавки. Для гладкого сопряжения (углы профиля должны исключаться из-за опасности ВЧ-пробоя) регулярных участков боковые стенки канавки задавались в виде полинома пятой степени [6]. Все геометрические размеры здесь приводятся в относительных единицах $\lambda_0/2\pi$, $\lambda_0 = 2\pi c/\omega$ — опорная длина волны. Используются также следующие безразмерные переменные [6]: $W = \omega/\omega_0$ — относительная частота, ω — рабочая частота, $\beta_0 = v_0/c$, v_0 — начальная скорость электронов пучка, c — скорость света, $F = B_0 e/m_0 \omega_0$, B_0 — величина индукции магнитного фокусирующего поля, e , m_0 — заряд и масса покоя электрона, η — КПД взаимодействия.

Результаты расчетов

Вначале был выполнен поиск оптимальных по КПД параметров двухкаскадной схемы — рис. 1, *а*. Для заданного радиуса волновода b_0 подбирались параметры h_k , L_k , Δ_k модулирующей канавки h_k , L_k , Δ_k , при которых она обеспечивает полное отражение E_{01} волны. После этого выполнялась оптимизация параметров β_0 , I_0 , r_0 , L_{12} , h_{k2} , L_{k2} , для достижения максимального КПД генерации. Крутизна всех канавок была выбрана равной $\Delta_{k1,2,3} = 0,5$. При большой крутизне $\Delta_k \uparrow$ резко возрастает напряженность электрического поля на границе, при малой кру-

тизне $\Delta_k \downarrow 0$ увеличиваются размеры канавки, что не способствуют модуляции и отбору энергии пучка. Полученные варианты двухкаскадного клистрона сведены в табл. 1.

Таблица 1. Оптимизированные варианты двухкаскадного клистрона

$N\#$	β_0	$I_0[A]$	$\eta\%$	b_0	r_0	h_1	L_{K1}	L_{J2}	h_{K2}	L_{K2}
1	0,65	345	17,5	3,5	3,2	1,57	1,625	7,55	1,39	1,19
2	0,69	743	16,6	3,5	2,3	1,57	1,625	7,58	1,40	1,18
3	0,73	760	15,5	3,5	3,3	1,63	1,625	7,10	0,72	1,18
4	0,836	826	17,6	2,6	2,9	1,64	1,000	10,39	1,50	1,23

Для фокусировки пучка требуется значительное магнитное поле ($F \geq 3,5$). Основные характеристики процесса взаимодействия в расчетной области для варианта 1 из табл. 1 двухкаскадного клистрона представлена на рис. 2.

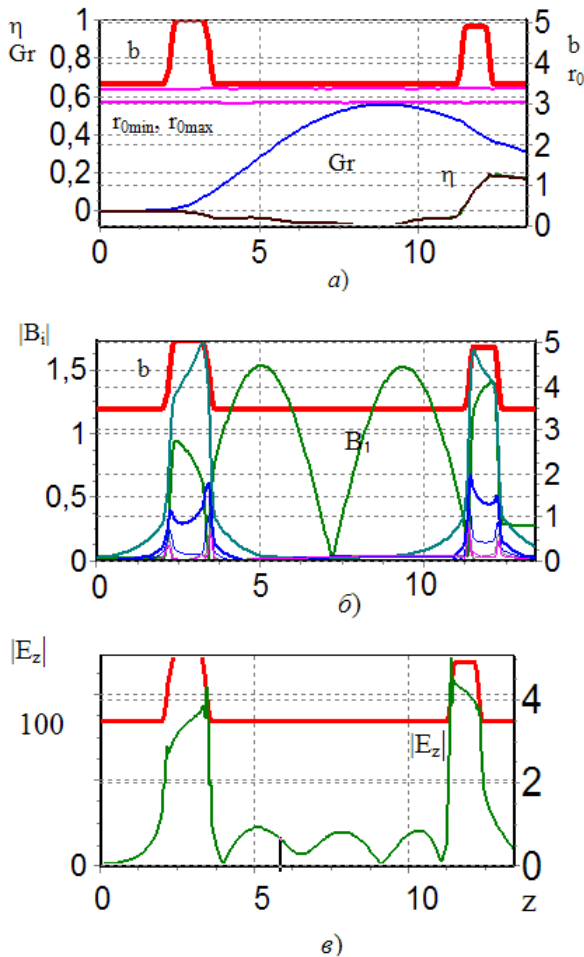


Рис. 2. Графические характеристики работы двухкаскадного клистрона: а) профиль $b(z)$, границы электронного пучка $r_{min}(z)$, $r_{max}(z)$, функция группировки G_r , электронный и волновой КПД η ; б) амплитуды $|B_i|$, $i=1 \dots 6$ возбуждаемых E_{0i} волн ($i=1$ — распространяющаяся, $i>1$ — закрытые); в) значение E_z [кВ/см] для $\lambda=6$ см вдоль волновода на радиусе пучка r_0

Слева от первой канавки волна отсутствует. Справа от последней 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. Основное взаимодействие электронов с продольной составляющей E_z электромагнитного поля происходит в области канавок, где величина E_z достигает 50–100 кВ/см (см. рис. 2, в).

Как видно из поведения кривой $\eta(z)$, модуляция и группировка происходят при ускорении в среднем электронов. За счет того, что электронный поток проходит вблизи границы волновода, действие поля E_z несинхронной E_{01} -волны в области дрейфа незначительно и ослаблено также действие продольной составляющей поля пространственного заряда, на что указывает малое значение амплитуд закрытых волн в области дрейфа. На участке дрейфа происходит монотонный рост функции группировки до насыщения в области отбирающей канавки и происходит небольшая накачка энергии в электронный поток за счет взаимодействия с E_{01} волной. Интенсивный отбор энергии реализуется в области второй канавки.

Длина дрейфа L_{J2} , при которой обеспечивается генерация, примерно равна длине волны E_{01} . С увеличением начальной скорости пучка оптимальный радиус волновода b_0 уменьшается, чтобы увеличить необходимую длину дрейфа за счет увеличения длины волны в волноводе.

Резонансная кривая холодной электродинамической системы для варианта 1 представлена кривой на рис. 3. Ее максимум сдвинут относительно рабочей частоты ($W=1$) "горячей" системы. Рассчитанная по ней добротность равна ~ 170 .

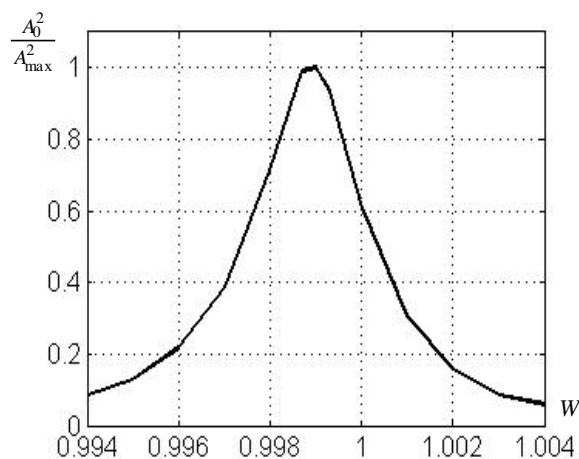


Рис. 3. Резонансные характеристики двухкаскадного клистрона

Зависимость эффективности генерации от величины тока пучка для вариантов 1–4 табл. 1 представлена на рис. 4. По мере увеличения напряжения пусковой и рабочей токи возрастают и находятся в пределах 300–1500 А.

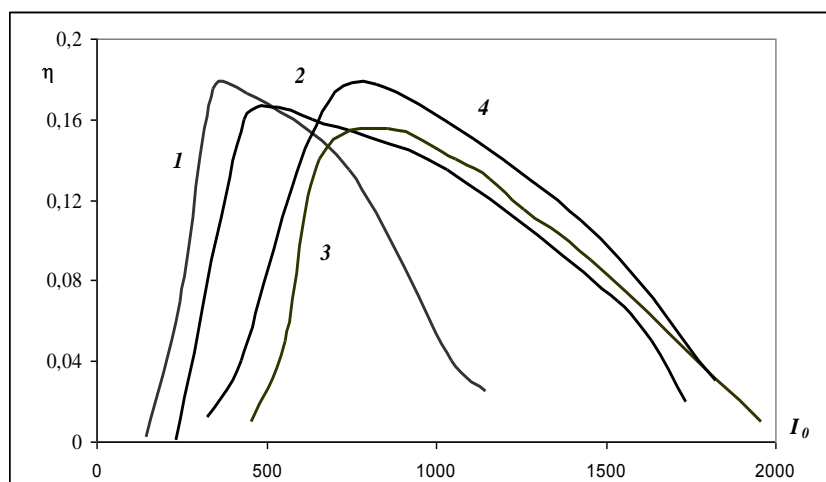


Рис. 4. Характеристики зависимости КПД от величины тока двухкаскадных клистронов

Максимальная эффективность генерации достигается при токе на 100–200 А превышающим пусковой. Эффективная генерация наблюдается вплоть до токов ~1500 А.

С целью достижения более эффективной генерации был выполнен поиск параметров трехрезонаторного 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.

Варианты трехкаскадного клистрона сведены в табл. 2.

На рис. 5, а–в представлены характеристики варианта 1 табл. 2, аналогичные описанным выше.

Таблица 2. Оптимизированные варианты трехкаскадного клистрона

№	β_0	$I_0[A]$	$\eta\%$	b_0	r_0	L_{k1}	h_{k1}	L_{12}	L_{k2}	h_{k2}	L_{23}	L_{k3}	h_{k3}
1	0,60	460	26,6	3,5	3,2	1,625	1,57	5,269	1,231	0,560	0,79	0,57	1,428
2	0,64	547	30,0	3,5	3,2	1,625	1,57	5,250	1,231	0,551	0,83	0,75	1,422
3	0,72	547	25,0	3,5	3,2	1,625	1,63	2,899	1,231	1,429	3,55	1,00	1,425
4	0,76	800	24,8	3,0	2,8	1,250	1,63	6,001	1,333	0,716	1,00	1,18	1,405

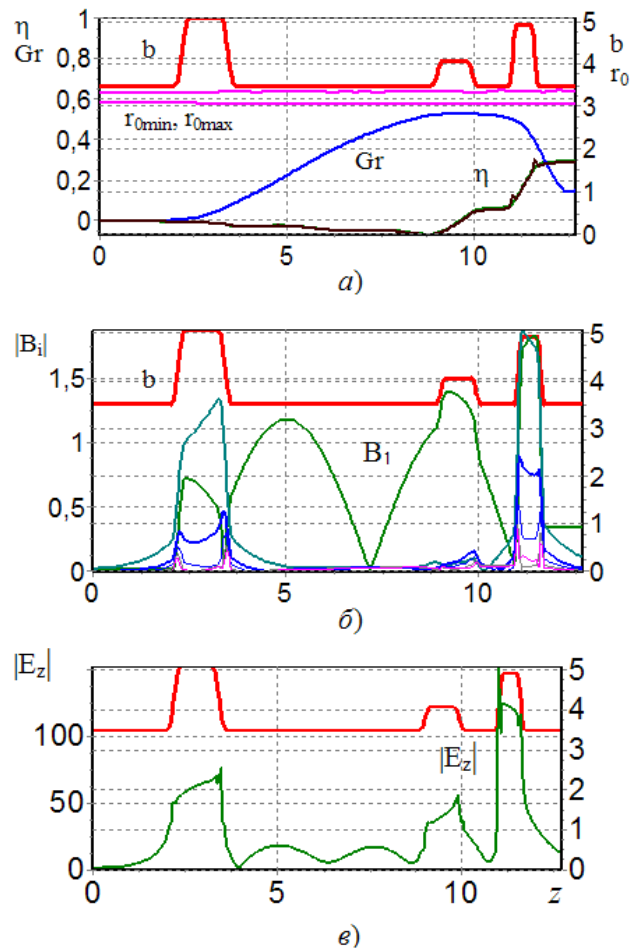


Рис. 5. Графические характеристики работы трехкаскадного клистрона

Видно, что на отбирающих канавках происходит каскадный отбор энергии. Группировка после 5 резонатора сохраняется. Величина E_z меньше, чем в двухкаскадном клистроне.

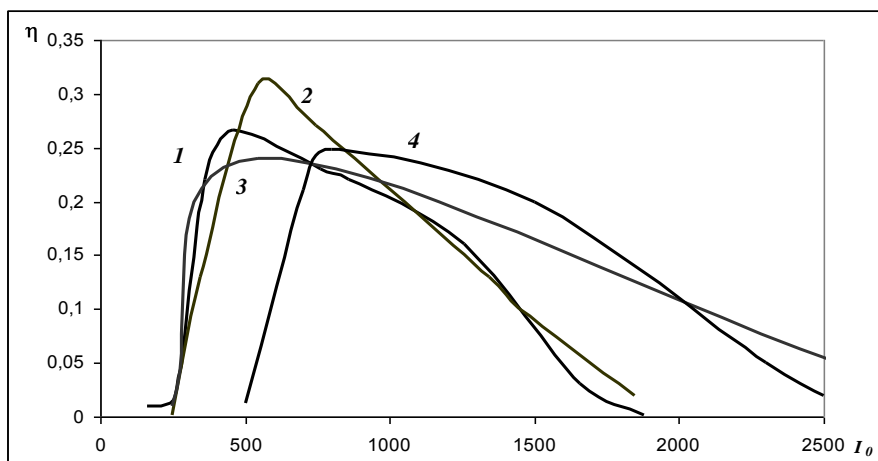


Рис. 6. Графические характеристики работы трехкаскадного клистрона

Заключение

Представленные в статье 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, что характерно для приборов с бегущей волной;
- для клистрона-генератора характерен мягкий режим самовозбуждения;
- конструкция клистрона-генератора имеет большее число параметров оптимизации, чем конструкция черенковского генератора, что предопределяет лучшие перспективы для повышения эффективности этого генератора.

THREE-STAGE RELATIVISTIC KLYSTRON-OSCILLATOR ON A HIGH-CURRENT RELATIVISTIC BEAM

A.B. GOURINOVITCH, A.A. KURAYEV, A.K. SINITSYN

Abstract

Simulation of a three-cascade design of the oscillator on a high-current relativistic beam with electrodynamic system as a section of a hollow cylindrical waveguide from which three sides resonant grooves are located is executed. The initial modulation of beam is realized at the electronic field of the first groove, the second and third grooves are provided the extraction of energy. It is shown, that in such design the feedback on reflected E_{01} -wave is provided and the regime of oscillation from efficiency up to 31% is possible.

Литература

1. Бугаев С.П. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы IV Всесоюзного семинара. Москва, 24–26 января 1984 г. Горький, 1984. Вып. 4. С. 79–103.
2. Климов А.И., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, Вып. 3. С. 55.
3. Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотъменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, Вып. 10. С. 17.
4. Батура М.П., Кураев А.А., Синицын А.К. // 15 Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 12–16 сентября 2005. Севастополь, Крым, Украина. С. 231–233
5. Батура М.П., Кураев А.А., Луцицкая И.В., Синицын А.К. // Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 12–16 сентября 2006. Севастополь, Крым, Украина. С. 613–614.
6. Батура М.П., Кураев А.А., Синицын А.К. Основы теории расчета и оптимизации современных приборов СВЧ. Минск, 2006.