УДК 621.396.67

Генератор со спиральным распределенным резонатором

К. В. Троцюк, В. Б. Профе, А. И. Астайкин, А. П. Мартынов
Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

На основе нелинейной теории получены зависимости выходных характеристик генератора от параметров замедляющей структуры и электронного пучка. Исследованы траектории движения электронов в пространстве взаимодействия. Проведенный анализ позволяет определить пути повышения удельных характеристик прибора.

Изменение структуры ВЧ-поля вдоль длины пространства взаимодействия приводит к изменению характера взаимодействия электронного потока с этим полем. Изменить структуру поля можно путем введения отражений от концов замедляющей системы (ЗС), что позволяет сочетать в одном приборе достоинства распределенного взаимодействия с преимуществами, обусловленными резонансными свойствами спирального распределенного резонатора (РР).

Большой интерес, кроме интегральных характеристик (КПД, амплитуды поля), представляют исследование движения электронов в РР и анализ влияния динамики захваченных полем волны частиц на характеристики генератора.

Взаимодействие электронного пучка с полем волны в РР описывается с помощью системы нелинейных уравнений для ЛБВ в режиме больших амплитуд [1]. Решение системы проведено методом крупных частиц с учетом пространственного заряда и наличия отраженной волны. В расчете учитывается также влияние встречной волны, так как при больших сигналах ее амплитуда достаточно велика. С учетом сформулированных условий система записывается в виде:

$$C\frac{d^2F(\xi)}{d\xi^2} - 2j\frac{dF(\xi)}{d\xi} + (2r + Gr^2)F(\xi) = 2j(1 + Gr)(1 + bC)^2 I_1(\xi); \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial\xi^2} = -\left(1 + C\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\right)^3 \mathrm{Re}\left\{F(\xi)e^{j\Phi_0} + jq_0 I_1(\xi)e^{j\Phi}\right\};$$

$$I_1(\xi) = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} I_1 e^{-j\Phi} d\varphi_0 ,$$

где F — амплитуда прямой волны;
C — параметр Пирса;
q_0 — параметр поля пространственного заряда;
I_1 — первая гармоника тока;
b — параметр расстройки по скорости;
Φ — безразмерная фаза частицы;
ξ — безразмерная координата;
$d\varphi_0$ — приращение фазы частицы;
r — комплексный параметр расстройки.

Результатом решения данной системы являются значения амплитуды первой гармоники сгруппированного тока $I_1(\xi)$. Это, в свою очередь, позволяет, используя уравнение возбуждения (1), определить возбужденное в линии передачи ВЧ-поле $F(\xi)$, а затем активную составляющую электронной мощности взаимодействия, которая соответствует действительной разнице в скоростях электронов пучка и возмущенной волны, а следовательно, и электронный КПД генератора.

Используя принцип баланса мощностей $P_{ea} + P_{пот} = 0$, где P_{ea} — активная электронная мощность, $P_{пот}$ — мощность потерь, определяем амплитуду стационарных колебаний [2].

Исследование проводилось для спиральной ЗС в дециметровом диапазоне длин волн. Эффективность взаимодействия электронного пучка с полем ЗС в основном определяется сопротивлением связи в рабочей полосе частот. Параметры ЗС (постоянная распространения β, сопротивление связи $R_{св}$, фазовая $v_ф$ и групповая $v_{гр}$ скорости волны) рассчитываются путем решения дисперсионного уравнения, исходя из геометрических размеров ЗС. Введение пучка с определенными энергетическими характеристиками позволяет определить параметры, используемые при нелинейном анализе генератора со спиральным РР. По результатам решения системы нелинейных уравнений определяется оптимальная длина резонатора, соответствующая максимальному уровню выходного сигнала и максимальному КПД.

На рис. 1 приведены результаты расчета максимального КПД генератора, полученные для оптимального значения добротности спирального РР в режиме стационарных колебаний.

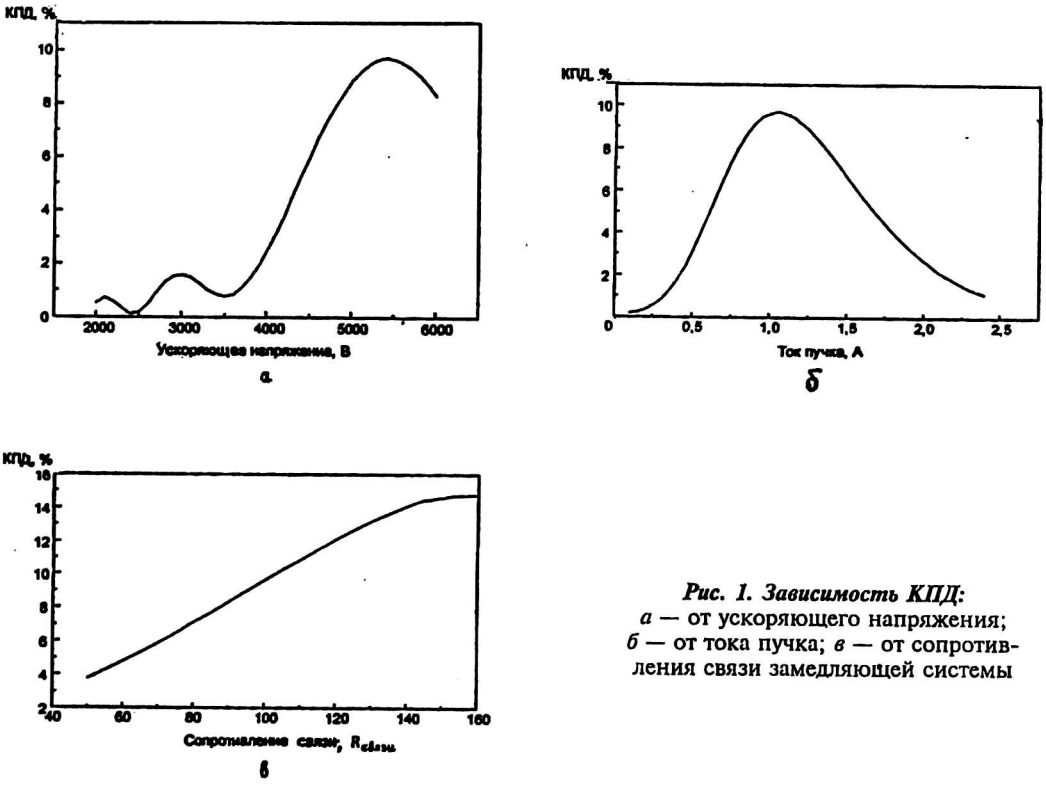

Рис. 1. Зависимость КПД:
а — от ускоряющего напряжения;
б — от тока пучка; *в* — от сопротивления связи замедляющей системы

На рис. 1, *а*, *б* представлены зависимости КПД генератора от напряжения и тока пучка. При расчете были определены параметры спирального резонатора: замедление равно 13,5; сопротивление связи равно 290 Ом. Максимум КПД достигается при $I_п$ = 1 А (см. рис. 1, *а*), U_0 = 5,5 кВ (см. рис. 1, *б*) и равен 10 %. Дальнейшее увеличение тока и напряжения приводит к уменьшению КПД. Это обусловлено увеличением рассинхронизма пучка и волны и значительным увеличением поля пространственного заряда, которое оказывает существенное влияние на группировку пучка. На рис. 1, *в* представлена зависимость КПД от сопротивления связи $R_{св}$ (при тех же параметрах, U_0; I_0 и $K_{замед}$).

Дальнейшее увеличение $R_{св}$ (например, путем уменьшения радиуса спирали) не приводит к значительному повышению КПД, но при этом токооседание пучка на спираль увеличивается в несколько раз.

На рис. 2 представлена зависимость оптимального коэффициента отражения Г от длины пространства взаимодействия, из которой видно, что существует определенная длина системы, при которой коэффициент отражения минимален, а мощность, поступающая в нагрузку, максимальна (U_0 = 5,5 кВ; I_0 = 1 А; $K_{замед}$ = 13,5; $R_{св}$ = 100 Ом).

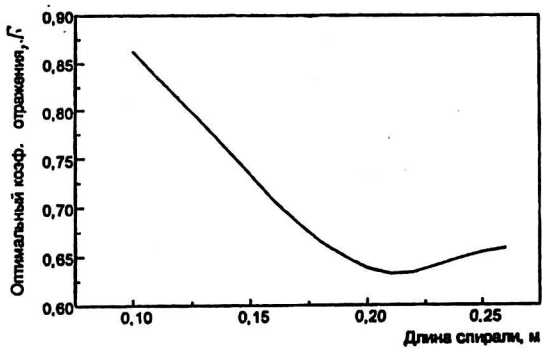

Рис. 2. Зависимость оптимального коэффициента отражения от длины спирали

На рис. 3 представлен фазовый портрет движения 3 электронов с различными фазами влета в область взаимодействия (см. параметры рис. 2).

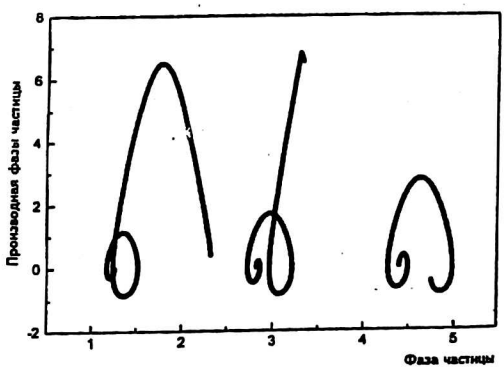

Рис. 3. Фазовый портрет движения частиц с различными фазами влета в пространство взаимодействия

В приближении сильной нелинейности проведена оптимизация входных параметров электронного пучка для выбранной ЗС. Использование метода крупных частиц позволило учесть пространственный заряд электронов и получить основные характеристики генератора (КПД и амплитуду стационарных колебаний) в зависимости от тока и напряжения пучка, сопротивления связи и добротности резонатора. Результаты работы позволяют повысить основные интегральные характеристики генератора.

Литература

1. *Цейтлин М. Б., Кац А. М.* Лампа с бегущей волной. — М.: Сов. радио, 1964. — 310 с.
2. *Кац А. М., Ильина Е. М., Манькин И. А.* Нелинейные явления в СВЧ-приборах О-типа с длительным взаимодействием. — М.: Сов. радио, 1975. — 296 с.

Generator with distributed rezonator

K. V. Trotsyuk, V. B. Profe, A. I. Astaikin, A. P. Martynov
Russian Federal Nuclear Centre — Russian Scientific — Research Institute of Experimental Phisics
(RFNC—RSRIEP)

Using the approximate theory of interaction between the electron flow and runing electromagnetic wave in large signals regime by the method of approaches succesive are carried out calculation of a main energetic characteristics of generator with rezonator as part of helix slow-wave system. Physical peculiazities of interaction elektrons with field of passing electromagnetic wave arl discussed. Dependences of main integral output characteristics of generator about electrodynamic system geometry and beam characteristics are obtained. The means of their essential improvement are found out.