



УДК 621.385.6

Д. М. Беневоленский, С. М. Мовнин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Генерация СВЧ-колебаний в релятивистском электронном потоке

*Рассматриваются возможность возбуждения СВЧ-колебаний в группирователе релятивистского электронного потока с поворотным магнитным полем, конструкции резонаторов для генератора с самовозбуждением и методы повышения эффективности группирования.*

### Релятивистский электронный поток, поворотное магнитное поле, генерация колебаний

В связи с успехами в технике сильноточных ускорителей появилась реальная возможность существенного повышения выходной мощности приборов СВЧ. Для преобразования энергии пучка в СВЧ-энергию в большинстве случаев необходимы группировка пучка и последующий отбор энергии от электронных сгустков. Одним из наиболее распространенных методов группирования является клистронный метод [1].

Однако в релятивистской области эффективность клистронного группирования снижается, поскольку изменение энергии электронов при модуляции связано в основном с изменением их массы, но не скорости [1], [2].

Альтернативой клистронному группированию в релятивистской области является группирование в поворотном магнитном поле (ПМП), где промодулированные по энергиям релятивистские электроны движутся по окружностям разных радиусов и сходятся в сгусток на выходе из поворотного кольца [2].

На рис. 1 схематично изображен группирователь с ПМП, представляющий собой отрезок пролетной трубы 3, свернутой в виток спирали. Магнитное поле направлено перпендикулярно к плоскости витка. В начале трубы расположен объемный резонатор 2, обеспечивающий модуляцию релятивистских электронов 1 по энергиям. Отбор энергии от сгруппированных электронов 4 осуществляется системой отбора 5 из нескольких объемных резонаторов, размещенных на выходе поворотного кольца.

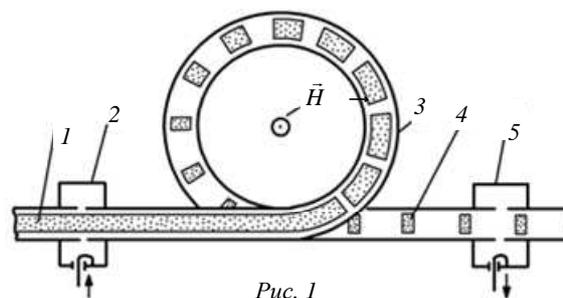


Рис. 1

Для решения некоторых технических задач требуется использование не усилителя, а генератора большой мощности. В связи с этим представляет интерес рассмотрение возможности отказа от внешнего СВЧ-генератора и использования энергии электронного потока для возбуждения в нем СВЧ-колебаний. Схема генератора на релятивистском пучке с ПМП предлагается в настоящей статье.

Принцип ПМП, при котором электроны летят по круговым орбитам, дает удачную возможность реализации конструктивно простой положительной обратной связи, так как сгруппированные электроны на выходе витка спирали и немодулированные электроны на его входе движутся в непосредственной близости друг от друга. Предлагается обеспечить обратную связь, связав потоки электронов на входе и выходе группирователя с ПМП единой электродинамической системой относительно малой протяженности. Тем самым часть СВЧ-мощности с выхода группирователя будет передана на его вход.

Самовозбуждение подобной системы определяется выполнением условий баланса амплитуд и баланса фаз. Если обозначить амплитуды СВЧ-напряжений в электродинамической системе, взаимодействующих с электронным потоком на входе и выходе витка спирали, через  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ , то условие баланса амплитуд запишется в виде

$$KU_{m2} = 2I_0M_2R_2KJ_1(X) \geq U_{m1}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – постоянная составляющая тока пучка;  $M_2$  – коэффициент взаимодействия электронов с полем электродинамической системы на выходе витка;  $R_2$  – сопротивление электродинамической системы сгруппированному потоку (на выходе витка);  $K$  – коэффициент передачи напряжения в электродинамической системе от выхода ко входу;  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Расчет параметра группирования  $X$  в поворотном магнитном поле (в кинематическом приближении) приводит к выражению

$$X = v\zeta_0,$$

где  $v = \frac{M_1 U_{m1}}{2 U_0} \frac{2(\gamma_0 - 1)}{\gamma_0}$ ;  $\zeta_0 = \frac{\omega}{v_0} 2\pi r_0$ , т. е.

$$X = 2\pi \frac{\omega}{v_0} r_0 \frac{U_{m1}}{U_0} M_1 \frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0}. \quad (2)$$

Здесь  $M_1$  – коэффициент взаимодействия электронов с полем электродинамической системы на входе в виток;  $U_0$  – постоянное ускоряющее напряжение;  $v_0$  – постоянная составляющая скорости электронов;  $r_0$  – радиус витка спирали;  $\omega$  – круговая частота сигнала;  $\gamma_0$  – релятивистский фактор, равный отношению полной энергии электрона к его энергии покоя.

В момент возникновения колебаний  $X \ll 1$ , поэтому  $2J_1(X) \approx X$ . Тогда, как это следует из (1), колебания возникнут при выполнении равенства

$$I_0M_2R_2KX = U_{m1}. \quad (3)$$

Это выражение является по существу записью условия возбуждения колебательной системы с обратной связью, которое заключается в равенстве единице произведения коэффициента усиления и коэффициента обратной связи. Подставив (2) в (3), определим выражение для пускового тока

$$I_{0\text{пуск}} = \frac{U_{m1}}{M_2R_2KX} = \frac{\gamma_0 U_0}{2\pi M_1M_2R_2K(\gamma_0 - 1) \frac{\omega}{v_0} r_0}. \quad (4)$$

Условие баланса фаз может быть записано в виде

$$2\pi \frac{\omega}{v_0} r_0 = 2\pi(n + 1/4) + \Delta\varphi; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

где  $\Delta\varphi$  – разность фаз между сигналами на выходе и входе витка спирали.

Условие (5) соответствует тому, что центр электронного уплотнения проходит пространство взаимодействия в электродинамической системе на выходе витка в момент максимального тормозящего напряжения.

Для осуществления положительной обратной связи между пучком на выходе и входе витка спирали группирователя предлагается использовать систему в виде резонатора с зазорами, расположенными в его центре и на краю.

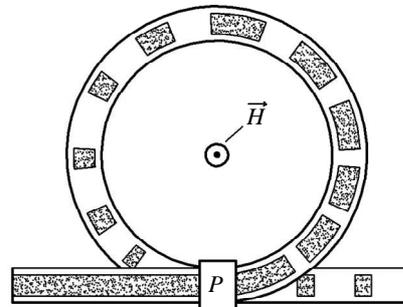


Рис. 2

На рис. 2 представлено схематическое изображение СВЧ-генератора с ПМП. Положительная обратная связь осуществляется с помощью СВЧ-резонатора, который одновременно является модулирующим резонатором для электронного потока. Особенность его состоит в том, что он содержит два параллельно расположенных СВЧ-зазора, один из которых представляет собой разрыв в начале, а другой – в конце пролетной трубы. В результате резонатор пронизывается как лучом на входе в виток, так и сгруппированным лучом на выходе из витка, что при выполнении условий (4) и (5) приведет к самовозбуждению резонатора. Тем самым осуществляется внутренняя связь по электронному потоку.

Нарастание колебаний, возникших в резонаторе, ограничивается механизмом группирования, при котором отношение амплитуды первой гармоники электронного тока к постоянной составляющей не превышает 1.16.

Для повышения эффективности работы генератора между группирователем с самовозбуждением и системой отбора следует установить до-

полнительные группирующие витки с ПМП. Тем самым будет реализован принцип каскадного группирования, который приведет к увеличению амплитуды первой гармоники тока. Результаты расчетов каскадного группирования в генераторе с ПМП приведены на рис. 3, 4.

Каскадное группирование в генераторе с ПМП начнется при параметре группирования на первом каскаде  $X_{12} \approx 1.8 \dots 2.0$ , т. е. возникает необходимость догруппировки «двугорбых» электронных уплотнений, образовавшихся за счет перегона электронов. На рис. 3 показаны зависимости относительной амплитуды первой гармоники тока на входе в систему отбора от парциальных параметров группирования для двухкаскадного генератора. Значения параметров группирования:  $X_{12} = 1.84$ ;  $1 - X_{13} = 2$ ;  $2 - X_{13} = 2.3$ ;  $3 - X_{13} = 2.5$ ;  $4 - X_{13} = 3$ . На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для трехкаскадного генератора. Здесь  $X_{12} = 1.84$ ;  $X_{13} = 2$ ;  $X_{14} = 2.2$ ;  $1 - X_{23} = 1$ ,  $X_{24} = 1.2$ ;  $2 - X_{23} = 1.3$ ,  $X_{24} = 1.4$ .

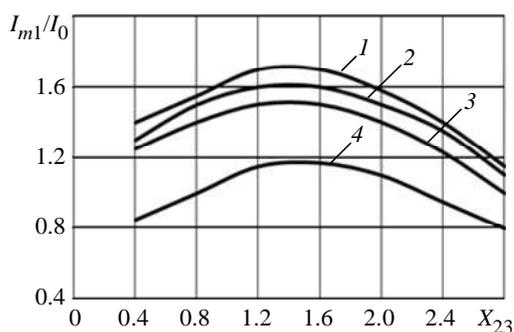


Рис. 3

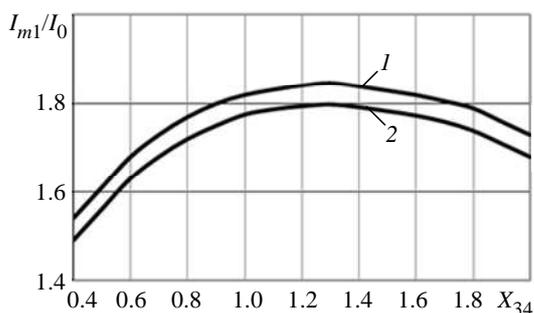


Рис. 4

Из графиков видно, что амплитуда первой гармоники тока может быть увеличена системой догруппировки до 1.6–1.8. Далее представлены разработанные конструкции резонаторов для возбуждения колебаний в группирователе с ПМП.

На рис. 5 (*a* – вид спереди; *b* – вид справа в разрезе) показана конструкция резонатора в виде радиальной линии, закороченной на конце, с па-

раллельно расположенными зазорами, в центре – для входного пучка поворотного кольца, на краю резонатора – для пучка на выходе группирующего кольца. При такой конструкции сопротивление резонатора для бокового зазора существенно меньше, чем для центрального зазора, и достаточно велико значение коэффициента передачи.

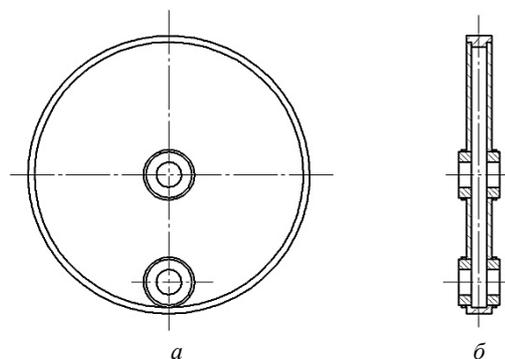


Рис. 5

На рис. 6 (*a* – вид спереди в разрезе; *b* – вид сверху в разрезе) изображен резонатор в виде короткозамкнутого отрезка прямоугольной линии, нагруженной на емкость. Отличительной особенностью данного резонатора является наличие двух последовательных (относительно пучка) зазоров, что позволяет при изменении геометрии резонатора и зазоров эффективно менять коэффициент связи электронного потока с резонатором и тем самым обеспечивать необходимое напряжение на зазорах.

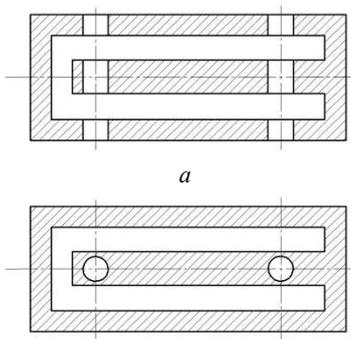


Рис. 6

Макет резонатора в виде радиальной линии для волны типа  $E_{020}$  при резонансной частоте 3000 МГц был изготовлен и испытан. Экспериментальное обследование макета дало следующие результаты: собственная добротность  $Q_0 = 300$ , характеристическое сопротивление резонатора для первого (центрального) зазора  $\rho_1 = 23$  Ом, для второго зазора  $\rho_2 = 1.5$  Ом. Эти значения соответствуют входным сопротивлениям  $R_1 = 6900$  Ом и  $R_2 = 450$  Ом. Перепад сопротивлений составляет

≈15 раз, что указывает на возможность использования данной конструкции для генератора с ПМП.

Результаты расчетов процессов группирования в релятивистских электронных потоках, движущихся в поворотном магнитном поле, условий

самовозбуждения и результаты обследования предлагаемых конструкций резонаторов указывают на реальную возможность создания мощного релятивистского генератора СВЧ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацман Ю. А. Приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1983.
2. Релятивистские приборы СВЧ с клистронным типом группирования / Д. М. Беневоленский, Г. П. Го-

голев, С. М. Мовнин, Г. С. Хижа. СПб.: Энергоатомиздат, 1998.

---

D. M. Benevolensky, S. M. Movnin  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

### MICROWAVE GENERATION IN A RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

*Possibility of excitation of microwave oscillations in the relativistic electron beam buncher in a rotating magnetic field and the structure of resonators for self-excited generator and methods to increase the efficiency of the bunching are considered.*

**Relativistic electron beam, rotating magnetic field, oscillations generation**

---