

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ АВТОСТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. К. Корнеев, В. Г. Курин

*Институт радиофизики и электроники им А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [mirosh@ire.kharkov.ua](mailto:mirosh@ire.kharkov.ua)*

В открытых резонаторах исследуемых генераторов наряду с модами, имеющими одно синфазное пятно поля, наблюдаются случаи возбуждения высших мод, которые создают несколько пятен поля вдоль движения электронного потока. Электронный поток, пролетающий через такую цепочку вариаций поля, расслаивается по скоростям с образованием множества мод пространственного заряда. Показано, что распад электронного потока на множество одновременно существующих мод пространственного заряда может приводить к повышению стабильности частоты генератора в одних случаях, в других - к возбуждению генератора в многочастотном режиме. Установлена связь стабильности частоты генератора со стабильностью расстройки между скоростью электронов и фазовой скоростью синхронной волны. Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

**Ключевые слова:** электронная перестройка, высшие моды, автостабилизация частоты.

В связи с тем, что у многих типов высоко-частотных генераторов собственная стабильность частоты оказывается недостаточной для практических целей, разрабатывались и разрабатываются специальные методы, направленные на повышение стабильности частоты генерируемых ими колебаний. Из существующих методов повышения стабильности частоты высокочастотных генераторов с длительным взаимодействием можно выделить две основные группы, а именно, параметрическую стабилизацию и стабилизацию автоматической подстройкой частоты. Параметрическая стабилизация осуществляется путем применения внешних по отношению к генераторам устройств, к которым относятся высокочастотные резонаторы и высокостабильные синхронизирующие источники. В обоих случаях повышение стабильности частоты осуществляется путем "затягивания" частоты генератора высокочастотными резонаторами или высокостабильными синхронизирующими источниками. К недостаткам этих способов стабилизации относятся необходимость строгого согласования, строгого подбора связи внешнего устройства с колебательной системой генератора, узкий диапазон затягивания частоты и громоздкость схем реализации, что ограничивает сферу применения указанных способов.

Наиболее широкое применение находит метод автоматической подстройки частоты (АПЧ). С помощью этого метода возможна стабилизация большинства типов генераторов на всех участках сверхвысокочастотного диапазона радиоволн. Длительная стабильность частоты при АПЧ определяется в большой степени эталонами, стабильность которых может быть не хуже  $10^{-9}$ , что существенно превышает возможности параметрической стабилизации, длительная нестабильность которой может достигать  $10^{-5}$ .

Как показывают эксперименты, в генераторах дифракционного излучения возможны фи-

зические механизмы стабилизации частоты, отличающиеся от вышерассмотренных. Известно, что при пролете электронного потока через цепочку резонаторов происходит перераспределение энергии между пучком и полем резонаторов. Частицы, пролетающие в ускоряющем полупериоде, приобретают энергию, которую отдают частицы, пролетающие в тормозящем полупериоде [1, 2]. Аналогичный эффект был обнаружен и в генераторах дифракционного излучения. Причем это происходит, когда в генераторе реализуется возбуждение высших мод, которые создают несколько "пятен" поля в направлении движения электронного потока [3, 4]. Действительно, такая мода, имеющая несколько вариаций ("пятен") поля вдоль движения электронного потока, имеет сходство с цепочкой резонаторов. Было показано [3], что в этих случаях возможна работа генератора при отрицательных расстройках между начальной скоростью электронов и фазовой скоростью синхронной волны  $V_0 < V_{ph}$ . Следовательно, при определенных условиях работа генератора на таких модах может осуществляться в условиях постоянства расстройки  $b = \text{const}$  в некотором диапазоне изменения анодного напряжения, что является одним из необходимых условий стабильности частоты генераторов с длительным взаимодействием.

Нами рассмотрены возможности использования указанного выше физического механизма [1 - 4] для повышения стабильности частоты генераторов дифракционного излучения.

**1. Эксперимент.** Цель эксперимента состояла в определении спектра мод, на котором самовозбуждается генератор на всем диапазоне изменения расстояния  $L$  (см. рис. 1) между зеркалами открытого резонатора. Обычно такой спектр строится (по данным эксперимента) в системе координат  $(L, f)$ . В данном случае, когда речь идет о ста-

бильности частоты генератора, спектр возбуждающихся электронным потоком мод удобно построить в координатах  $C/V, \lambda_0$ , где  $C$  - скорость света;  $V$  - скорость электронов, определяемая из равенства  $V = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_a}$ ;  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве,  $U_a$  - анодное напряжение. Такой спектр для исследуемого генератора приведен на рис. 2.

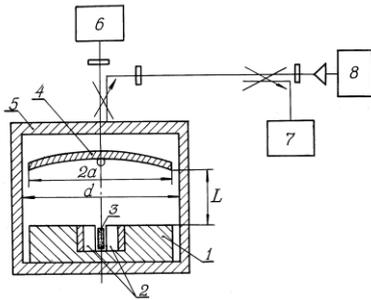


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - нижнее зеркало открытого резонатора; 2 - двойная периодическая структура; 3 - электронный поток; 4 - верхнее зеркало; 5 - корпус генератора; 6 - измеритель выходной мощности; 7 - частотомер; 8 - индикатор сигнала;  $L$  - расстояние между зеркалами открытого резонатора

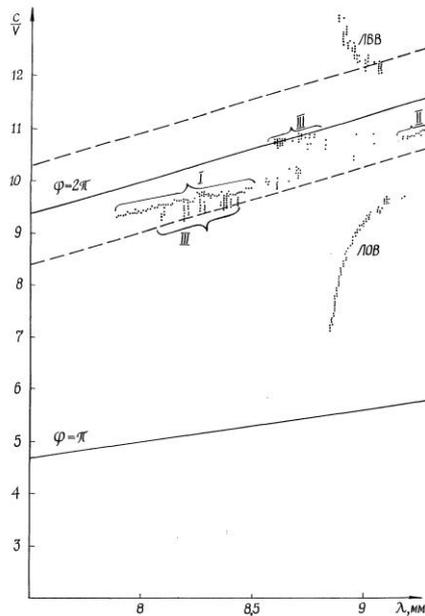


Рис. 2. Области существования режимов быстрых и поверхностных волн в генераторе дифракционного излучения

Пунктирные прямые на рис. 2 представляют собой отражение координатной прямой  $C/V \equiv 1$  относительно линии равных фазовых сдвигов на периодической структуре  $\varphi = \pi$ . Периодическая структура в исследуемом генераторе, как это видно из рис. 1, представляет собой двойную гребенку с периодом  $l = 0,8$  мм.

Пространство, ограниченное пунктирными прямыми, представляет собой область существования режима быстрых волн (дифракционного излучения). Из рис. 2 видно, что генератор дифракционного излучения возбуждается не только в дифракционном режиме, но также в режиме ЛБВ и ЛОВ. Причем режим ЛБВ явно проникает в запретную область, что соответствует случаям работы ЛБВ на объемных волнах. Римскими цифрами I, II обозначены области комбинированной перестройки (согласованного изменения  $L$  и  $U_a$ ) генератора на основной моде типа  $TEM_{00q}$ . Области III соответствуют случаям работы генератора на высших модах. Причем случаи, соответствующие точкам, расположенным выше прямой  $\varphi = 2\pi$ , соответствуют работе генератора в дифракционном режиме с отрицательным расстройством [3].

Из графиков следует, что при повышении анодного напряжения (уменьшении  $C/V$ ) генератор переходит с основной моды (см. область I) на высшие моды (см. область III). Частота генератора при работе на этих модах не зависит от анодного напряжения.

Для более подробного изучения этого эффекта был снят ряд электронных перестроек генератора в области, обозначенной на рис. 2 римской цифрой III (ниже линии равных фазовых углов  $\varphi = 2\pi$ ), на которых хорошо видны случаи перехода исследуемого генератора с основной моды  $\psi_1$  на высшие моды  $\psi_2$  (рис. 3). Как следует из рис. 3, а, частотная характеристика  $\psi_2$  генератора не является прямой линией, что можно было бы ожидать, ориентируясь на рис. 2, а деформируется с образованием экстремума ( $U = 2740$  В), в окрестности которого частота генератора не зависит от анодного напряжения. Причем частотная характеристика не непрерывна, а содержит элементы дискретной структуры.

Повышение рабочего тока (рис. 3, б) сопровождается уширением прямолинейного участка (области "абсолютной" стабильности частоты генератора) и частотная характеристика приобретает сходство с отрезками прямых  $f = \text{const}$  при  $C/V \neq \text{const}$  на рис. 2. На рис. 3, в приведена зона электронной перестройки исследуемого генератора, снятая в той же области (III на рис. 2 ниже линии  $\varphi = 2\pi$ ), но при другом расстоянии между зеркалами открытого резонатора ( $L_3 = L_{1,2} + \Delta$ ,  $\Delta \leq 0,05$  мм) и при большем рабочем токе. Здесь в отличие от рис. 3, а, б на частотной характеристике  $\psi_2$  дискретной структуры не наблюдается, и зона электронной пере-

стройки на высшей моде  $\{\psi_2\}$  приобретает вид зоны захвата [5]. Такой эффект, очевидно, можно объяснить уплотнением множества мод пространственного заряда, обусловленным расстройкой электронного потока в процессе его пролета множества вариаций (пятен) поля высшей моды и реализующимся при повышении рабочего тока.

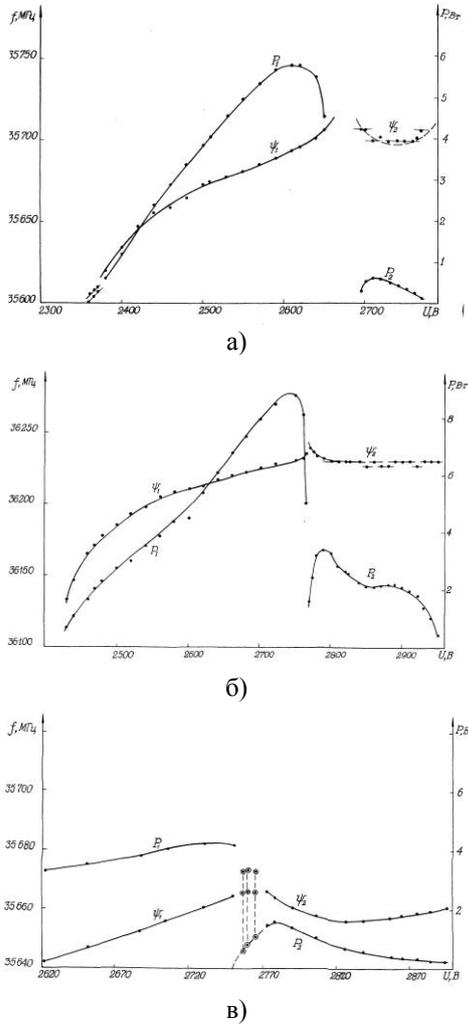


Рис. 3. Зоны электронных перестроек исследуемого генератора ( $\psi_1$  - на основной моде;  $\psi_2$  - на высших модах): а)  $I_p = 50$  мА; б)  $I_p = 70$  мА; в)  $I_p = 90$  мА. В каждой зоне электронной перестройки  $L_n = \text{const}$ , рабочий ток генератора  $I_n = \text{const}$

Непрерывность частотной характеристики (зоны захвата) дает возможность установить связь стабильности частоты генератора со стабильностью относительной величины расстройки между скоростью электронов и фазовой скоростью синхронной волны [6]

$$b = \frac{V_0 - V_{ph}}{V_{ph}}, \quad (1)$$

где  $b$  - расстройка;  $V_0$  - скорость электронов, соответствующая началу генерации. В данном случае  $V_0$  (см. рис. 3, в) определим по величине анодного напряжения  $U = 2895$  В в конце зоны  $\psi_2$ , где генерация начинается почти с нуля, и, следовательно, можно принять  $V_0 \approx V_{ph}$  и  $b \approx 0$ . Действительно, необходимым условием генерации является превышение скорости электронов  $V_0$  и  $V_{ph}$  синхронной компонентой поля резонатора, и случай  $V_0 \approx V_{ph}$  соответствует началу генерации. Фазовая скорость синхронной волны в зоне перестройки находится по формуле  $V_{ph} = fl$ , где  $f$  - частота генератора;  $l$  - период решетки. Определяя таким путем  $V_0$  и  $V_{ph}$  по экспериментальной кривой  $\psi_2$  на рис. 3, в найдем, что величина расстройки на левой ветви  $\psi_2$  от точки срыва генерации ( $U = 2773$  В) до экстремальной точки ( $U = 2830$  В) увеличивается от  $b = 0,1314$  до  $b = 0,1316$ . В то время как величина расстройки на правой ветви  $\psi_2$  от экстремальной точки до затухания генерации уменьшается от  $b = 0,1316$  до  $b \approx 0$ . В окрестности экстремальной точки величина расстройки оказывается стабильной  $b \approx \text{const}$ .

Рассмотрим, как изменяется стабильность частоты генератора при  $b \rightarrow \text{const}$ . Изменение анодного напряжения на  $\Delta U = \pm 25$  В относительно экстремальной точки зоны захвата сопровождается изменением частоты  $\frac{\Delta f}{f_0} = \pm 4,2 \cdot 10^{-5}$ , где  $f_0$  - частота, соответствующая экстремальной точке зоны захвата. При стягивании указанного диапазона к экстремальной точке захвата находим соответственно

$$\Delta U = \pm 10 \text{ В}, \quad \frac{\Delta f}{f_0} = \pm 1,4 \cdot 10^{-5},$$

$$\Delta U_0 = \pm 5 \text{ В}, \quad \frac{\Delta f}{f_0} = \pm 7 \cdot 10^{-7}.$$

Одним из необходимых условий высокой стабильности частоты генератора является стабильность величины расстройки между скоростью электронов и фазовой скоростью синхронной волны. Как следует из рассмотренных экспериментов, для окрестности экстремальной точки зоны захвата (рис. 3, в) и областей стабилизации, наблюдаемых на графиках рис. 3, б, расстройка представима в виде формулы

$$b_2 = \frac{V_0 \pm \delta V_e - V_{ph}}{V_{ph}} = \text{const}, \quad (2)$$

где  $\pm \delta V_e$  - приращения скорости электронов, обусловленные особенностью энергообмена между электронами и полем, реализующимся в случаях возбуждения генератора на высших модах, образующих несколько вариаций (пятен) поля вдоль направления движения электронного потока. Можно сказать, что в этих случаях создается эффект существования вязкой нелинейной среды, которая удерживает величину расстройки постоянной, несмотря на изменения анодного напряжения.

Таким образом, в случаях работы генератора на высших модах путем изменения параметров, в частности, таких, как  $L, I, U$ , можно изменять плотность множества мод пространственного заряда и тем самым реализовать как дискретные (рис. 3, а, б), так и непрерывные (рис. 3, в) зоны захвата частоты генератора.

На графиках рис. 3, в в области спада уровня выходной мощности генератора, работающего на высшей моде  $\psi_2$ , наблюдаются реализации трех случаев двухчастотной генерации при  $U_1 = 2757 \text{ В} = \text{const}$ ,  $U_2 = 2760 \text{ В} = \text{const}$  и  $U_3 = 2765 \text{ В} = \text{const}$  соответственно. Следовательно, в каждом из этих случаев двухчастотная генерация реализуется при  $C/V = \text{const}$ . Однако такой подход к определению  $C/V$  основывается в предположении, что электронный поток является моноскоростным. На самом деле это не так. Пролет электронного потока через цепочку пятен поля высшей моды сопровождается его расщеплением по скоростям [1, 3], а следовательно, и образованием одновременно существующих нескольких мод пространственного заряда. В данном случае, а именно, как это следует из рис. 3, в, в области спада уровня выходной мощности генератора этот эффект проявляется в виде реализаций двухчастотной генерации.

Таким образом, работа генератора дифракционного излучения на высших модах, образующих несколько пятен поля вдоль направления движения электронного потока, обуславливает возможность не только повышения стабильности частоты, но и возможность управления спектром выходного сигнала генератора.

**Выводы.** Проведенное рассмотрение опытных данных показывает, что в генераторах дифракционного излучения существует собственный физический механизм, обуславливающий явление автостабилизации частоты. Преимущество такой стабилизации очевидно. Для ее применения нет необходимости применения добавочных устройств, например таких, как внешние высокодобротные резонаторы, высокостабильные синхронизирующие источники, системы АПЧ, что существенно

упрощает схемы стабилизации и соответственно уменьшает затраты на их реализацию. К недостаткам такой стабилизации следует отнести то, что она возможна в случаях работы генератора на высших модах, имеющих множество вариаций поля в пространстве взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем открытого резонатора. Дело в том, что при работе генератора на высших модах, как это хорошо видно на рис. 3, уровень выходной мощности существенно ниже, чем при работе генератора на основной моде. Повышение уровня выходной мощности стабилизируемого генератора можно достигать путем возбуждения в его резонансной системе гибридной моды, состоящей из основной и соответствующей высшей моды. Выявление таких возможностей требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Авторы выражают благодарность Г. А. Новицкой и Л. Ю. Ващенко за помощь, оказанную при оформлении работы. Работа выполнена при содействии фонда НТЦУ проект №1770.

1. Казанский А. Н., Кислицев А. В., Лебедев А. Н. Атомная энергия. - 1971. - 30, №1. - 27 с.
2. Насонов Н. Н., Шендерович А. М. Самоускорение пучка электронов, пролетающего через волновод с продольно намагниченным ферритом // Изв. вузов. Радиофизика. - 1974. - 17, №8. - С.909-913.
3. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д. и др. Об одной особенности преобразования энергии в генераторах дифракционного излучения - лазерах на свободных электронах // Докл. АН СССР. - 1983. - 268, №4. - С.853-856.
4. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д., Скрынник Б. К. Особенности работы ГДИ на высших модах открытого резонатора // Журн. техн. физики. - 1982. - 52, вып.3. - С.525-526.
5. Бозатырев Ю. К. О захватывании пространственной структуры поля волновых автоколебательных систем // Радиотехника и электроника. - 1975. - 20, №10. - С.2200-2202.
6. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В. П. Шестопалова - Киев: Наук. думка, 1991. - 302 с.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FREQUANAY SELF-STABILIZATION PHENOMENON IN DIFFRACTION RADIATION OSCILLATORS

V. K. Korneenkov, V. G. Kurin

In the open resonators of the explored generators along with modes having one synphase spot of the field, there are observed the occurrence of excitation of higher modes which create a few sport of the field along movement of electronic beam. Electronic beam flying through such chainlet of variations of the field exfoliates on speeds with formation of set of modes of space-charge. It is shown, that disintegration of electronic beam on the set simultaneously of existent modes of space-charge can result in the increase of stability of frequency of generator in one case, in other - to excitation of generator in the multifrequency mode. Communication of stability of frequency of generator with stability of disordering between velocity of electrons and phase velocity of synchronous wave is set.

**Key words:** electronic tuning, higher order modes self-stabilization frequency.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ЯВИЩА АВТОСТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ  
У ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦІЙНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

**В. К. Корнеєнков, В. Г. Курін**

У відкритих резонаторах генераторів, що досліджувались, водночас з модами, що мають одну синфазну пляму поля, спостерігаються випадки збудження вищих мод, які створюють декілька плям поля уздовж руху електронного

потіку. Електронний потік, що пролітає через такий ланцюжок варіацій поля, розшаровується по швидкостях з утворенням множини мод просторового заряду. Показано, що розпад електронного потоку на множини одночасно присутніх мод просторового заряду може приводити до підвищення стабільності частоти генератора в одних випадках, в інших - до збудження генератора в багаточастотному режимі. Встановлений зв'язок стабільності частоти генератора із стабільністю розладу між швидкістю електронів і фазовою швидкістю синхронної хвилі.

**Ключові слова:** електронна перебудова, вищі типи коливань, автоматична стабілізація частоти.

*Рукопись поступила 15 января 2007 г.*