

**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)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ОБЛАСТЕЙ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ЕГО ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ

Расширение диапазона непрерывной перестройки частоты генераторов, в частности генераторов дифракционного излучения, является важной научной и практической задачей. В исследуемых генераторах расширение диапазона непрерывного генерирования достигалось путем применения плавной комбинированной (электронная + механическая) перестройки. Однако до настоящего времени физические явления, сопровождающие процесс комбинированной перестройки не были подробно изучены. Подробное экспериментальное исследование характера поведения уровня выходной мощности генератора показало, что процесс плавной комбинированной перестройки сопровождается пересечением соседних резонансных областей (резонансов) электродинамической системы генератора. В областях пересечения регулярно (почти периодически) наблюдается явление конструктивной интерференции, которая обнаруживает себя в виде реализаций пиков уровня выходной мощности в зонах комбинированной перестройки. Таким образом, эффекты пересечения резонансов в электродинамической системе исследуемого генератора позволяют не только осуществлять непрерывную перестройку генератора в широком диапазоне частот, но и значительно повышать уровень его выходной мощности. Ил. 5. Библиогр. 9 назв.

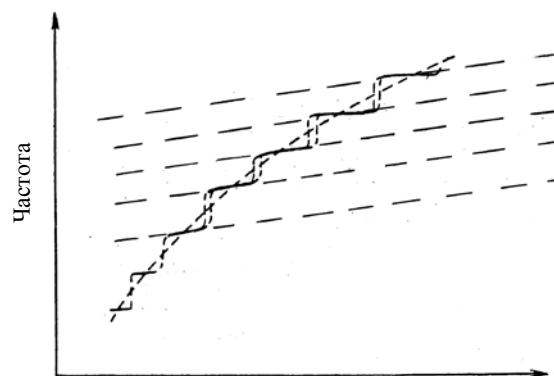
**Ключевые слова:** комбинированная перестройка, явление пересечения резонансных областей, интерференция, пики уровня выходной мощности генератора, стабилизация уровня выходной мощности генератора.

В процессе многочисленных экспериментальных исследований генераторов дифракционного излучения [1, 2] в зонах комбинированных перестроек, каждая из которых представляет собой сочетание электронной и механической перестроек, были обнаружены почти периодически повторяющиеся пики выходной мощности. В минимумах, расположенных между такими пиками, уровень выходной мощности генератора мог падать почти до нуля. Внешне такие зоны комбинированных перестроек генераторов дифракционного излучения совпадают с зонами электронных перестроек резонансных ламп обратной волны (ЛОВ).

На рис. 1 приведена типичная зона электронной перестройки резонансной ЛОВ [3]. Видно, что пики выходной мощности резонансного ЛОВ-генератора в точности соответствуют резонансам (продольным модам) конечной замедляющей системы. Это так называемые однотипные моды, продольный индекс каждой из которых отличается от соседней (ближайшей) на единицу. Однако, во-первых, в открытых резонаторах по хорошо известным причинам спектр мод, в том числе и однотипных, сильно разрежен [1, 4]. Во-вторых, в каждой зоне комбинированной перестройки исследуемый генератор работает на одной резонансной моде типа  $TEM_{20q}$ , причем в процессе комбинированной перестройки величина продольного индекса рабочей моды сохраняется постоянной  $q \equiv \text{const}$ . При этом ширина зоны комбинированной перестройки может достигать величины 50 ГГц и более.

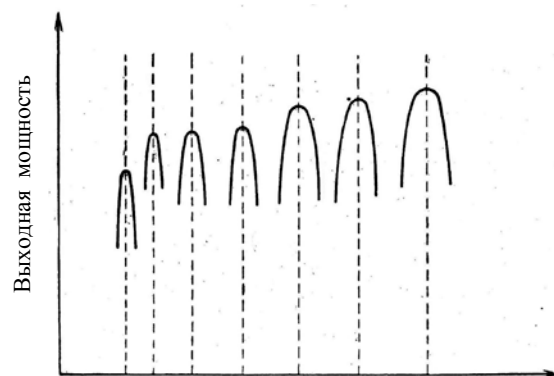
Вообще ширина зоны комбинированной перестройки исследуемого генератора зависит от

величины рабочего тока и может достигать октавы и более.



Напряжение на замедляющей системе

а)



Напряжение на замедляющей системе

б)

Рис. 1. Электронная перестройка (а) и области генерации резонансной ЛОВ (б)

К настоящему времени известен, пожалуй, единственный эффект, который позволяет просто объяснить столь необычно широкую полосу перестройки исследуемого генератора – это эффект пересечения резонансных областей (резонансов), имеющий место в некоторых типах электромагнитных резонаторов [5]. Однако в рассматриваемом эксперименте находится один (открытый) резонатор, правда перестраиваемый не только электронным, но и механическим способом. Оказывается, в таком резонаторе также возможны случаи реализации пересечения соседних резонансных областей, обусловленные конечной шириной реальных резонансов.

Один из таких случаев показан на рис. 2. Здесь показана реальная ширина (по напряжению) одного из резонансов генератора, полученная экспериментально [6], и его смещенная копия. Такие смещенные копии реализуются в результате малого смещения резонансного максимума путем механической подстройки. В связи с тем, что зона комбинированной перестройки представляет собой процесс согласованного изменения анодного напряжения и расстояния  $L$  между зеркалами открытого резонатора ( $q \equiv \text{const}$ ), то этот (плавный) процесс всегда сопровождается существованием как минимум пары пересекающихся резонансов, как это показано на рис. 2. Очевидно, что область пересечения можно рассматривать в виде области, где осуществляется сложение сигналов.

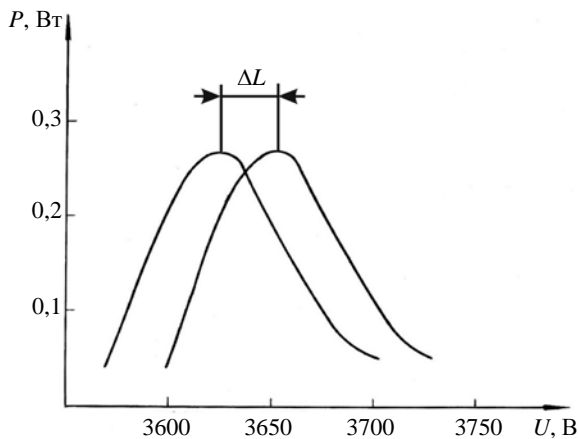


Рис. 2. Пересечения соседних резонансных областей (резонансов) открытого резонатора генератора реализуются при изменении расстояния между зеркалами резонатора на малые величины  $\Delta L < 0,05$  мм

Известно, что суммарную энергию таких сигналов можно представить в виде [7]

$$E_{\Sigma} = \int_{t1}^{t2} [S_1(t) + S_2(t)]^2 dt = E_1 + E_2 + 2E_{1,2}, \quad (1)$$

где  $E_{1,2}$  представляет собой так называемую взаимную энергию

$$E_{1,2} = \int_{t1}^{t2} S_1(t)S_2(t)dt. \quad (2)$$

Из сравнения этих формул следует, что такое сложение сигналов имеет явное сходство с интерференцией. Действительно, в случаях, когда взаимная энергия равна нулю, поле в резонаторе усредняется, соответственно, усредняется освещенность поля в пространстве взаимодействия электронного потока с этим полем, что, соответственно, будет приводить к падению уровня выходной мощности генератора. Случаям, когда взаимная энергия оказывается максимальной, наоборот, будут отвечать пики выходной мощности исследуемого генератора.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение существования эффектов пересечения соседних резонансных областей в открытых резонаторах генераторов дифракционного излучения и их влияния на выходную мощность.

**Эксперимент.** Схема эксперимента приведена на рис. 3. Прежде всего обратим внимание на способ вывода энергии из объема открытого резонатора исследуемых генераторов [8].

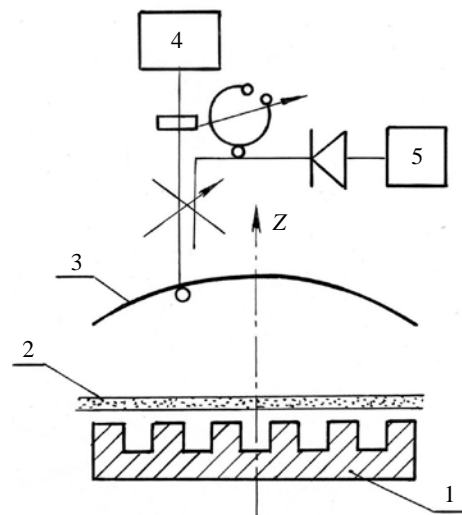


Рис. 3. Схематический чертеж эксперимента: 1 – дифракционная решетка; 2 – электронный поток; 3 – сферическое зеркало открытого резонатора; 4 – измеритель мощности; 5 – индикатор сигнала

Отверстие связи выполнено смещенным относительно оси  $Z$  симметрии открытого резонатора. В этом случае энергия отбирается не с центральной части центрального пятна поля рабочей моды  $TEM_{20q}$ , а с его периферии. Такое расположение отверстия связи сводит к минимуму влия-

ние отражений от элементов волноводного тракта на уровень выходной мощности генератора в зоне перестройки. При такой схеме измерений, следовательно, основными возмущающими факторами будут не отражения от нагрузки, а эффекты, обусловленные возмущением поля открытого резонатора пересечениями резонансных областей. Эксперимент проводился в широком диапазоне частот, а именно 100...200 ГГц. Такую широкую полосу частот оказалось возможным перекрыть всего лишь двумя генераторами.

На рис. 4 приведена зона комбинированной перестройки генератора, занимающая диапазон частот  $f \cong 100...130$  ГГц. На этих графиках зона комбинированной перестройки описывается двумя зависимостями, а именно характером изменения уровня выходной мощности генератора от частоты  $P = \Phi(f)$  и частотной дисперсионной характеристикой  $f = \Phi(L)$ .

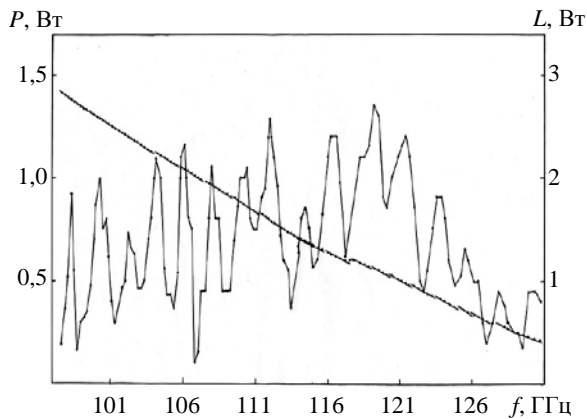


Рис. 4. Зона комбинированной перестройки частоты исследуемого генератора с дифракционной решеткой периодом  $l = 0,3$  мм

Заметим, что обе функции неявно зависят от анодного напряжения и обе функции снимались синхронно, т. е. в каждой рабочей точке генератора производилось измерение уровня выходной мощности, частоты и величины приращения  $\Delta L$  расстояния между зеркалами открытого резонатора. Вид частотной характеристики показывает, что во всей зоне комбинированной перестройки генератор работает на одной и той же резонансной моде. Для данной конструкции генератора такой рабочей модой является мода  $TEM_{20q}$  [1].

Теперь обратим внимание на тонкую структуру частотной характеристики. Видно, что во всем диапазоне комбинированной перестройки, особенно в ее высокочастотной части, наблюдаются эффекты ее фрагментирования. Хорошо известно, что эффекты такого фрагментирования,

как правило, обуславливаются некоторыми возмущениями собственного электромагнитного поля контура или резонатора [9]. В нашем случае такие возмущения, очевидно, обусловлены эффектами пересечения соседних резонансных областей, которые реализуются в процессе комбинированной перестройки исследуемого генератора.

На рис. 5 приведена зона комбинированной перестройки генератора, занимающая диапазон  $f \cong 130...200$  ГГц, т. е. уже захватывающая низкочастотную часть терагерцевого диапазона.

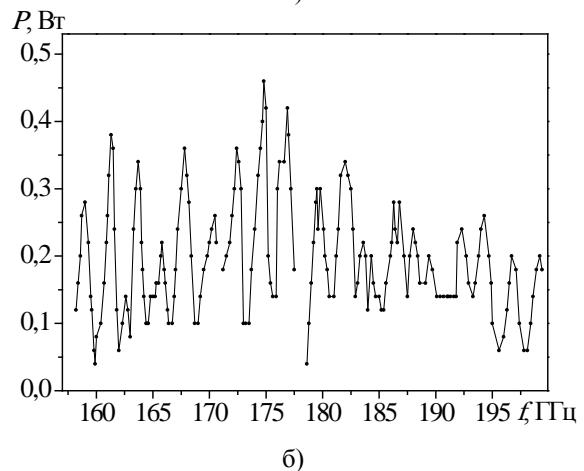
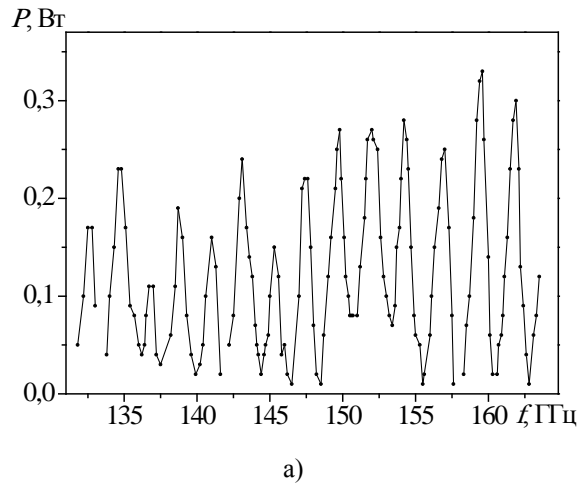


Рис. 5. Зоны комбинированной перестройки исследуемого генератора с дифракционной решеткой периодом  $l = 0,17$  мм: а) – низковольтная часть (от  $U_a = 1,5$  кВ до  $U_a = 2,2$  кВ); б) – высоковольтная часть (от  $U_a = 2,2$  кВ до  $U_a = 3,4$  кВ)

Графики, приведенные на рис. 5, а, соответствуют низковольтной части зоны комбинированной перестройки (от  $U_a = 1,5$  кВ до  $U_a = 2,2$  кВ), а рис. 5, б, соответственно, – ее высоковольтной части (от  $U_a = 2,2$  кВ до  $U_a = 3,4$  кВ). Из анализа графиков рис. 4 и 5 следует, что для исследуемых генераторов в широком диапазоне частот характер следования пиков уровня мощности в зонах комбинированной перестройки не изменяется,

причем средний период следования пиков уровня выходной мощности оказался равен  $\Delta f_{cp} \cong 2,1$  ГГц в обоих случаях (рис. 4 и 5). Это указывает на связь характера следования пиков уровня выходной мощности исследуемых генераторов с интерференцией, обусловленной эффектами пересечения соседних резонансных областей, реализующихся в процессе комбинированной перестройки.

Исключение представляет собой полоска частот, наблюдаемая на графиках рис. 5, б, занимающая диапазон  $\approx 190...192$  ГГц. Ожидаемый здесь пик (или min) уровня выходной мощности оказался подавленным, а уровень выходной мощности – стабильным. В рассматриваемом эксперименте эффект стабилизации уровня выходной мощности генератора, вероятнее всего, обусловлен пересечением более двух резонансных областей. В этом случае интерференция в процессе комбинированной перестройки может существенно усреднять интенсивность поля в пространстве взаимодействия электронного потока с полем открытого резонатора, осуществляя таким образом стабильность уровня выходной мощности исследуемого генератора.

**Выводы.** Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что в открытых резонаторах генераторов дифракционного излучения имеют место эффекты пересечения соседних резонансных областей, что весьма существенно уширяет области существования непрерывной генерации. Например, в данном эксперименте область непрерывного генерирования достигала полосы частот  $\Delta f \cong 70$  ГГц, захватывая при этом низкочастотную часть терагерцевого диапазона. Реализация таких широких зон комбинированной перестройки сопровождается образованием пиков уровня выходной мощности генератора, следующих почти периодически, со средним периодом по шкале частот равным  $\Delta f_{cp} \cong 2,1$  ГГц. В связи с тем, что процесс комбинированной перестройки сопровождается интерференцией, следует ожидать, что уровень выходной мощности в пиках может в разы превосходить уровни выходной мощности единичных (не пересекающихся) резонансов открытого резонатора генератора. Пересечение более чем двух резонансных областей сопровождается уменьшением уровня выходной мощности генератора. Однако при этом оказывается возможной стабилизация уровней выходной мощности генератора в отдельных полосках зон комбинированной перестройки. Учет рассмотренных явлений приобретает особое значение для разработки генераторов терагерцевого диапазона, а также генераторов с высокой стабильностью уровня выходной мощности в полосках зон комбинированных перестроек.

## Библиографический список

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника / В. П. Шестопалов. – Х.: Изд-во Харьков. ун-та, 1976. – 232 с.
2. А. с. (СССР) Генератор дифракционного излучения / И. М. Балаклицкий, В. Г. Курин, Б. К. Скрынник и др. – № 1422792; заявл. 03.04.70; опубл. 1972, Бюл. № 12. – С. 187–188.
3. Червяков Ю. Г. Лампы обратной волны типа О малой мощности / Ю. Г. Червяков, Н. П. Кузьмичев. – М.: Сов. радио, 1966. – 54 с.
4. Шестопалов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники: в 2 т. Т. 2 / В. П. Шестопалов. – К.: Наук. думка, 1985. – 244 с.
5. Захаров А. В. Перестраиваемые емкостями микроволновые резонаторы с пересекающимися резонансными областями / А. В. Захаров // Радиотехника и электрон. – 2012. – 57, № 1. – С. 109–113.
6. Курин В. Г. Экспериментальное исследование междутиповых колебаний / В. Г. Курин, Б. К. Скрынник, В. П. Шестопалов // Докл. АН СССР. – 1991. – 317, № 1. – С. 93–95.
7. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М.: Высш. школа, 1983. – 531 с.
8. Курин В. Г. Оптимизация связи генератора дифракционного излучения с нагрузкой / В. Г. Курин, Б. К. Скрынник, В. П. Шестопалов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1976. – 19, № 1. – С. 128–134.
9. Самойло К. А. Определение мгновенного значения фазы сопротивления катушки в параллельном колебательном контуре методом фазовой плоскости / К. А. Самойло, Н. В. Таланина // Изв. вузов. Радиотехника. – 1958. – № 3. – С. 362–372.

*Рукопись поступила 21.01.2013 г.*

V. G. Kurin

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESONANCE REGION CROSSING EFFECT OF OPEN RESONATOR ON OUTPUT POWER LEVELS OF DIFFRACTION RADIATION OSCILLATOR

Extending the range of continuous frequency tuning of oscillators, including the diffraction radiation oscillators, is an important scientific and practical problem. In the studied oscillators extension of continuous generation range is achieved by the combined (electronic + mechanical) frequency tuning. However, to date the physical phenomena accompanying the process of combined frequency tuning have not been studied in detail. A detailed experimental study of the behavior of the output power level of the oscillator showed that the process of combined frequency tuning was accompanied by crossing of adjacent resonance areas (resonances) of the oscillator electrodynamic system. In the crossing range the phenomenon of constructive interference is observed regularly (almost periodically), which reveals itself in the form of implementation of peak of output power level in the areas of combined adjustment. Thus, the effects of resonances crossing in the electrodynamic system of the test oscillator can not only continuously tune the oscillator in a wide frequency range, but also significantly increase the level of output power.

**Key words:** combined tuning, phenomenon of resonance crossing areas, interference, peaks of the output power level of the oscillator, stabilization of the output power level of the oscillator.

В. Г. Курин

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ВПЛИВУ ПЕРЕТИНУ РЕЗОНАНСНИХ  
ОБЛАСТЕЙ ВІДКРИТОГО РЕЗОНАТОРУ  
ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦІЙНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РІВЕНЬ ЙОГО  
ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Розширення діапазону безперервної перебудови частоти генераторів, зокрема, генераторів дифракційного випромінювання, є важливою науковою і практичною задачею. У досліджуваних генераторах розширення діапазону безперервного генерування досягалося шляхом застосування плавної комбінованої (електронна + механічна) перебудови. Однак, до теперішнього часу фізичні явища, що супроводжу-

ють процес комбінованої перебудови, не були детально вивчені. Детальне експериментальне дослідження характеру поведінки рівня вихідної потужності генератора показало, що процес плавної комбінованої перебудови супроводжується перетинанням сусідніх резонансних областей (резонансів) електродинамічної системи генератора. В областях перетинання регулярно (майже періодично) спостерігається явище конструктивної інтерференції, яка виявляє себе у вигляді реалізацій піків рівня вихідної потужності в зонах комбінованої перебудови. Таким чином, ефекти перетину резонансів в електродинамічній системі досліджуваного генератора дозволяють не тільки здійснювати безперервну перебудову генератора в широкому діапазоні частот, але і значно підвищувати рівень вихідної потужності.

**Ключові слова:** комбіноване перестроювання, явище перетину резонансних областей, інтерференція, піки рівня вихідної потужності генератора, стабілізація рівня вихідної потужності генератора.