

УДК 621.385.6

## ФЛУКТУАЦИИ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ЛОВ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

К. А. Горонина

Экспериментально исследованы флуктуации амплитуды излучения ЛОВ. Интенсивность флуктуаций зависит от ускоряющего напряжения  $V_y$ ; в диапазоне генерации интенсивность имеет ряд максимумов и минимумов так же, как и крутизна характеристики амплитуда—ускоряющее напряжение. Спектр флуктуаций измерен в интервале частот  $f = 0,15 \div 2000$  МГц. Спектральная плотность относительных флуктуаций  $S_\alpha$  практически постоянна при  $f < 200$  МГц и в минимумах по  $V_y$  имеет значения  $(3 \div 8) \cdot 10^{-17}$  Гц $^{-1}$ . К концу исследуемого интервала частот минимальные  $S_\alpha$  спадают в 1,2—1,5 раза, максимальные — в 5—6 раз. Экспериментальные результаты обсуждаются с целью выяснения причин флуктуаций.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию спектра амплитудных флуктуаций ЛОВ коротковолновой части миллиметрового диапазона в интервале частот 0,15—2000 МГц и является продолжением работы [1], в которой проведены аналогичные исследования флуктуаций частоты. Результаты обеих работ обсуждаются совместно с целью выяснения причин флуктуаций.

**Метод измерения и аппаратура.** Измерение флуктуаций амплитуды основано на спектральном анализе шумового напряжения на детекторе, который облучается СВЧ излучением исследуемого генератора. При этом к напряжению  $v_\alpha(t)$ , которое пропорционально исследуемым флуктуациям амплитуды, прибавляется собственный шум детектора  $v_d(t)$ .



Рис. 1. а) Схема, позволяющая измерить флуктуации генератора только в сумме с собственными шумами детектора;  
б) схема с интерферометром Цендера—Маха, в которой компенсируются флуктуации генератора и тем самым выделяются шумы детектора.

Добавочный шум при измерениях исключается на низких частотах с помощью известных компенсационных схем; на частотах порядка 1 ГГц для этой цели производятся два измерения: по простейшей схеме (рис. 1а) и по схеме с интерферометром Цендера—Маха (рис. 1б). Непосредственно измеряются среднеквадратичные напряжения на детекторе  $v_\alpha(f)$  и  $v_1(f)$  в схемах рис. 1а и 1б соответственно. На частотах  $f = 1$  и 2 ГГц использовались специально изготовленные вольтметры, на более низких частотах измерения выполнены стандартными селективными вольтметрами. При всех измерениях СВЧ мощность на детекторе устанавливалась аттенуатором одной и той же величины, что контролировалось по постоянному току детектора. Для определения спек-

тральной плотности амплитудных флуктуаций  $S_\alpha$  измерения производились при настройке интерферометра на интерференционный максимум, порядок интерференционного максимума подбирался достаточно большим, чтобы обеспечивалась компенсация амплитудных флуктуаций на частоте измерений  $f$  [2, 3]. Если интерферометр настроен на склоны интерференционного максимума и порядок максимума таков, что компенсации флуктуаций СВЧ излучения не происходит, то по измерениям на двух склонах  $v_2(f)$  и  $v_3(f)$  можно определить спектральную плотность частотных флуктуаций  $S_v$  [1] и совместную спектральную плотность  $S_{av}(f)$ , характеризующую корреляцию флуктуаций частоты и амплитуды. Исходные положения для вывода соотношений между измеряемыми плотностями имеются в [4]. Приведем здесь рабочие формулы без вывода:

$$v_d^2(f) = [v_1^2(f) - v_a^2(f) \cos^2 \pi f \tau] (1 - \cos^2 \pi f \tau)^{-1}; \quad (1)$$

$$S_\alpha(f) = k^2 (\Delta f)^{-1} [v_a^2(f) - v_d^2(f)]; \quad (2)$$

$$S_{av}(f) = \frac{k^2}{4\pi f \tau} \frac{2\pi f \tau}{\sin 2\pi f \tau} [v_3^2(f) - v_2^2(f)]. \quad (3)$$

Здесь  $v_d^2(f)/\Delta f$  — спектральная плотность собственных шумов диода,  $\tau$  — временная задержка в интерферометре,  $k$  — калибровочный множитель, который зависит от рабочей точки и параметров цепи детектора [1].

**Экспериментальные результаты.** Измерения показали, что интенсивность амплитудных флуктуаций, так же как и частотных, зависит от высокого напряжения питания ЛОВ, ускоряющего электроны. В диапазоне генерации имеется ряд максимумов и минимумов интенсивности, их расположение связано с так называемой изрезанностью характеристики ЛОВ, порожденной паразитными отражениями. Положение максимумов мощности совпадает с минимумами флуктуаций. На рис. 2 приведена зависимость  $S_\alpha$  от ускоряющего напряжения  $V_y$ . Здесь же изображена зависимость от  $V_y$  величины  $k_A^2$ , где  $k_A$  — относительная крутизна амплитудной характеристики,  $k_A = (dA/dV_y)A^{-1}$ . Небольшое смещение максимумов двух графиков по горизонтальной оси, по-видимому, вызвано случайными изменениями условий работы ЛОВ (например, температуры охлаждающей воды) за промежутки времени между измерениями  $S_\alpha$  и  $k_A$ . С учетом этого обстоятельства можно сказать, что оба графика совпадают. Обратим внимание на разные начала координат по вертикальной оси: нуль  $k_A$  совмещен с минимальным значением  $S_{\alpha \min}$ . Минимум  $S_\alpha$  наблюдается как в максимуме, так и в минимуме мощности, т. е. в точках, где  $k_A = 0$ .

Из совпадения кривых для  $S_\alpha - S_{\alpha \min}$  и  $k_A^2$  следует соотношение

$$G = [S_\alpha(f) - S_{\alpha \min}(f)] \left( \frac{dA}{dV_y} \right)^{-2} A^2 \approx 10^{-12}, B^2/\Gamma\Omega. \quad (4)$$

Величины  $G$  в (4) для разных экземпляров ЛОВ не одинаковы, наблюдались  $G = 10^{-12} \div 10^{-13} B^2/\Gamma\Omega$ . В то же время для каждого экземпляра ЛОВ величина  $G$  в (4) равна аналогичному отношению для частотных флуктуаций [1]:

$$G = S_v(dv/dV_y)^{-2}, \quad (5)$$

где  $dv/dV_y$  — крутизна частотной характеристики генератора  $v(V_y)$ .

Графики рис. 2 и соотношение (4) получены на основе измерений на частоте  $f = 6,9 \text{ МГц}$ , но такая же зависимость  $S_\alpha$  от  $V_y$  имеет место на всех частотах  $f < 200 \text{ МГц}$  и отношение (4) одинаково для тех же

частот. На частотах выше 200 МГц начинается спад  $S_{\alpha}(f)$  с ростом  $f$ . Зависимость от  $f$  показана на рис. 3. До  $f=2$  ГГц максимальные  $S_{\alpha}$  уменьшаются в 5—6 раз, а минимальные — только в 1,2—1,5 раза, следовательно, между  $S_{\alpha}$  и крутизной амплитудной характеристики на частотах  $f > 200$  МГц соотношение (4) не выполняется.

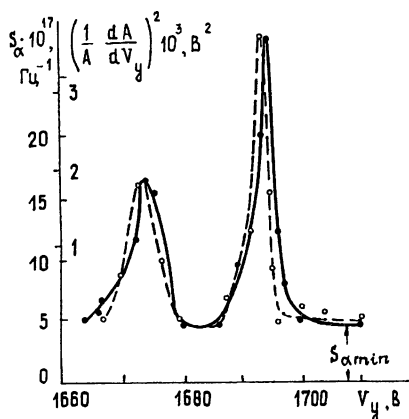


Рис. 2.

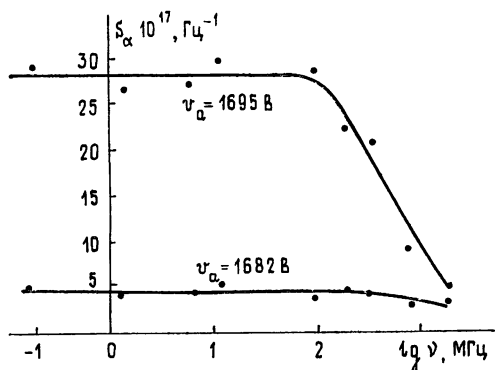


Рис. 3.

Рис. 2. Зависимость от ускоряющего напряжения  $V_y$  спектральной плотности амплитудных флуктуаций  $S_{\alpha}$  и относительной крутизны амплитудной характеристики (темные точки —  $S_{\alpha}$ , светлые точки —  $[(1/A)(dA/dV_y)]^2$ ).

Рис. 3. Спектр амплитудных флуктуаций при двух напряжениях  $V_y$ , соответствующих минимуму и максимуму флуктуаций.

Важной для практики характеристикой стабильности ЛОВ является величина  $S_{\alpha \min}$ , так как в большинстве случаев работают в максимумах мощности, где флуктуации минимальны. Величина  $S_{\alpha \min}$  для разных минимумов по диапазону ЛОВ лежит в интервале  $(3 \div 8) \cdot 10^{-17} \Gamma_c^{-1}$ . Соответствующее отношение мощности шума в одной боковой полосе шириной 1 Гц к средней мощности равно  $(-168 \div -164) \text{ дБ}/\Gamma_c$ .

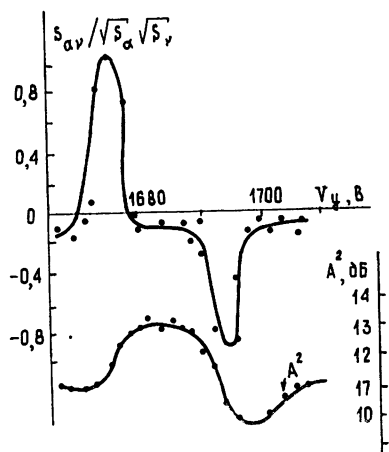


Рис. 4. Зависимость от ускоряющего напряжения  $V_y$  относительной величины  $S_{\alpha v} / \sqrt{S_{\alpha} S_v}$ , характеризующей корреляцию флуктуаций амплитуды и частоты.

На рис. 4 изображена зависимость от  $V_y$  величины  $S_{\alpha v} / \sqrt{S_{\alpha} S_v}$  — относительной совместной спектральной плотности. Здесь же показана зависимость мощности генерации от  $V_y$ . По обе стороны от максимума мощности эта величина имеет максимальное и минимальное значения, близкие соответственно к +1 и —1. Смена знака  $S_{\alpha v}$  не происходит в экстремумах мощности, в максимумах мощности  $S_{\alpha v}$  — отрицательна.

Графики на рис. 2, 4 показывают интервал по  $V_y$ , содержащий один максимум мощности. Измерения проведены для нескольких интервалов такого рода (в начале, в середине и в конце диапазона генератора), и всюду наблюдались отмеченные выше закономерности.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрим полученные результаты с целью выяснения причин флуктуаций. Так как спектральные плотности амплитудных и частотных флуктуаций постоянны в широком интервале частот, то их причины должны быть естественными (не техническими). Амплитуда и частота генерации зависят от двух параметров, подверженных естественным флуктуациям: силы тока и скорости электронов.

Флуктуации скорости электронов эквивалентны флуктуациям ускоряющего напряжения, поэтому квазистатистический отклик генератора на случайные колебания скорости характеризуется колебаниями амплитуды  $A(t)$  и частоты  $\nu(t)$ , пропорциональными крутизне характеристик соответственно амплитуда — напряжение  $dA/dV_y$  и частота — напряжение  $d\nu/dV_y$ , причем  $A(t)$  и  $\nu(t)$ , порожденные одной причиной, коррелированы. Функция корреляции  $A(t)$  и  $\nu(t)$  имеет положительный знак на тех участках, где  $(dA/dV_y) > 0$ , и отрицательный на остальных участках, так как  $(d\nu/dV_y) > 0$  во всем диапазоне. Исходя из сказанного, с учетом экспериментальных данных, приходим к следующим выводам о причинах флуктуаций.

1. В согласии с экспериментальным соотношением (5) причиной наблюдаемых флуктуаций частоты являются флуктуации скорости электронов, эквивалентные флуктуациям напряжения со спектральной плотностью  $G = 10^{-12} \div 10^{-13} B^2/\Gamma\mu$ .

2. Амплитудные флуктуации на тех участках диапазона, где велика крутизна  $dA/dV_y$ , объясняются той же причиной, что и флуктуации частоты. Это заключение подтверждается тем, что в (4) и (5) отношения  $G$  одинаковы по величине, а также характером корреляции на указанных участках диапазона (рис. 4).

3. Там, где крутизна  $dA/dV_y$  близка к нулю, вклад флуктуаций амплитуды, обязанных флуктуациям скорости, мал и проявляются дополнительные причины нестабильности, их вклад характеризуется величиной  $S_{\alpha \min}$ .

4. При нулевой крутизне  $dA/dV_y$  получена величина  $S_{\alpha\nu}$ , не равная нулю. Это говорит о существовании флуктуаций частоты, порождаемых теми же дополнительными причинами, которым обязаны флуктуации амплитуды. Спектральная плотность дополнительных флуктуаций частоты (обозначим ее  $S_{\nu}^*$ ) достаточно мала, в противном случае нарушение соотношения (5) из-за добавления  $S_{\nu}^*$  обнаружилось бы на опыте. При нашей точности измерений добавление

$$S_{\nu}^* \leq 10 \Gamma\mu \quad (6)$$

не обнаруживается.

Тепловые флуктуации скорости недостаточны, чтобы объяснить полученную на опыте величину  $G$  (5). Вклад тепловых флуктуаций оценивался по уравнениям Левиллина—Петерсона с заменой ускоряющей системы катод—сетка—анод эквивалентными диодами; получена величина  $G_T = 10^{-15} B^2/\Gamma\mu$ , что на три порядка меньше экспериментальной величины  $G_{\alpha} = 10^{-12} B^2/\Gamma\mu$ .

Рассмотрим роль квазистатистических флуктуаций силы тока. Спектральные плотности порождаемых током флуктуаций амплитуды и частоты будем отмечать штрихами; они выражаются через спектральную плотность флуктуаций тока  $S_I$  и крутизны характеристик амплитуда—сила тока  $dA/dI$  и частота — сила тока  $d\nu/dI$ :

$$S'_\alpha(f) = [(dA/dI)/A]^2 S_I, \quad S'_\nu = (d\nu/dI)^2 S_I. \quad (7)$$

Причем в (7) под  $I$  нужно понимать часть анодного тока  $I = \eta I_a$ ,  $\eta < 1$ , которая эффективно взаимодействует с полем СВЧ. На опыте измерены  $dA/dI_a$  и  $d\nu/dI_a$ , по  $\eta$  — неизвестная нам величина. Чтобы обойти эту трудность, воспользуемся равенством отношений

$$[(dA/dI)/A] (d\nu/dI)^{-1} = [(dA/dI_a)/A] (d\nu/dI_a)^{-1} = q. \quad (8)$$

По результатам измерений крутизны характеристик получено для нескольких максимумов мощности

$$q^2 = (0,3 \div 0,7) \cdot 10^{-18}, \quad \Gamma \mu^{-2}. \quad (9)$$

Из (7) — (9) имеем

$$S'_\alpha/S'_\nu = q^2 = (0,3 \div 0,7) \cdot 10^{-18}, \quad \Gamma \mu^{-2}, \quad (10)$$

в то время как отношение экспериментальной величины  $S_{\alpha \min}$  к  $S'_\nu$  имеет большую величину:

$$S_{\alpha \min}/S'_\nu > (3 \div 8) \cdot 10^{-18}, \quad \Gamma \mu^{-2}. \quad (11)$$

(Здесь использована величина верхней границы  $S'_\nu$ , равная  $S'_\nu^*$  (6).)

Из (10) и (11) следует, что  $S_{\alpha \min} > S'_\alpha$ , т. е. квазистатическими флуктуациями тока нельзя объяснить наблюдаемую величину  $S_{\alpha \min}$ . К этому же выводу можно прийти, исходя из измерений совместной спектральной плотности  $S_{\alpha\nu}$ . Кроме того, измерения во многих максимумах показали, что отношение  $S_\alpha/(dA/dI_a)$ , которое должно быть равно  $S_I/\eta^2$ , если  $S_\alpha$  порождается флуктуациями силы тока, неодинаково во всех максимумах. В некоторых парах соседних максимумов, в которых  $V_y$  и  $I_a$  различаются на 2—4% и естественно считать  $S_I$  и  $\eta$  одинаковыми, отношения  $S_\alpha/(dA/dI_a)^2$  отличаются в 1,5—2 раза. Таким образом, для объяснения наблюдаемых флуктуаций ЛОВ недостаточно принять во внимание квазистатический отклик генератора на флуктуации параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горонина К. А., Кукин Л. М., Лубяко Л. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 8, с. 953.
2. Дрягин Ю. А., Кукин Л. М., Лубяко Л. В. — Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 8, с. 1779.
3. Горонина К. А., Кукин Л. М., Лубяко Л. В. — Радиотехника и электроника, 1981, 26, № 3, с. 658.
4. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. — М.: Наука, 1968.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
15 октября 1981 г.,  
в окончательном варианте  
15 сентября 1982 г.

#### AMPLITUDE FLUCTUATIONS OF BWO OPERATING IN THE SHORT WAVE PART OF THE MILLIMETER RANGE

*K. A. Goronina*

Amplitude fluctuations of the BWO's radiation is experimentally investigated. The fluctuation intensity depends on the accelerating voltage  $V_y$ ; in the generation range the intensity has a number of maxima and minima as well as steepness of the amplitude-accelerating voltage characteristic. The spectrum of fluctuations is measured in the frequency interval of  $f=0.15 \div 2000$  MHz. The spectral density of relative fluctuations  $S_\alpha$  is practically constant for  $f < 200$  MHz and in minima over  $V_y$  has values  $(3 \div 8) \cdot 10^{-17}$  Hz $^{-1}$ . By the end of the frequency interval investigated the minimal  $S_\alpha$  are dropped by 1.2—1.5 times, the maximal ones — by 5—6 times. Experimental results are discussed to classify the reasons of fluctuations.