

УДК 621.382.029 64

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ ГЕНЕРАТОРОВ НА ДИОДАХ ГАННА 8-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

И. А. Кравцов, В. М. Малышев, А. В. Мещеряков

Экспериментально исследованы шумовые характеристики генераторов на диодах Ганна (ГДГ) 8-миллиметрового диапазона. Проанализированы зависимости флюктуаций частоты от КСВ и фазы нагрузки. Сопоставление шумовых характеристик ГДГ 8-миллиметрового и 3-сантиметрового диапазонов показало, что при пересчете на одну частоту генерации уровни флюктуаций частоты в них примерно одинаковы, а флюктуации амплитуды в коротковолновых генераторах на 10 дБ ниже.

В качестве малошумящих приборов генераторы на диодах Ганна (ГДГ) широко используются в миллиметровом диапазоне длин волн. В то же время имеющаяся в литературе информация об их шумовых характеристиках очень ограничена. Приведенные в [1–5] спектры флюктуаций амплитуды и частоты отдельных генераторов не дают достаточно полной картины флюктуационного поведения ГДГ миллиметрового диапазона, которая могла бы стать основой для анализа процессов шумообразования в этих приборах. В части работ отсутствуют параметры динамического режима и колебательной системы генераторов. Не приводятся результаты измерений шумов постоянной составляющей тока диода, их корреляции с флюктуациями колебаний, хотя эти данные помогают судить об источниках шума и механизмах их действия в приборе. Поэтому целью данной работы явилось возможно полное экспериментальное исследование динамических и флюктуационных характеристик коротковолновых ГДГ 8-миллиметрового диапазона.

1. Методика измерений. Обследовались диоды Ганна с концентрацией легирующей примеси $n = (4–6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, длиной активного слоя $L = 3–3,3 \text{ мкм}$ и диаметрами поперечного сечения от 90 до 150 мкм. Установленные в резонатор волноводного типа, они генерировали колебания вблизи частоты $f = 36 \text{ ГГц}$.

В генераторах измерялась выходная мощность P , частота f колебаний, постоянная составляющая тока I , внешняя добротность колебательной системы $Q_{\text{вн}}$, а также шумовые характеристики: энергетические спектры флюктуаций частоты $S_f(F)$, амплитуды колебаний $S_\alpha(F)$, тока $S_i(F)$ и коэффициенты корреляции между флюктуациями частоты и тока r_{if} . Измерения проводились в диапазоне частот $F = 20 \text{ Гц} – 600 \text{ кГц}$ при различных напряжениях питания U и в широком диапазоне связей генераторов с нагрузкой. Связь регулировалась изменением фазы ϕ и коэффициента стоячей волны ρ нагрузки. Величина $Q_{\text{вн}}$ определялась по затягиванию частоты [6].

Флюктуации частоты измерялись одноканальным, а флюктуации амплитуды — двухканальным корреляционным методом [7]. В качестве частотного дискриминатора использовался объемный резонатор с нагруженной добротностью $Q \approx 10^4$. Использовавшаяся методика измерения шумов тока описана в [8]. Коэффициенты корреляции измерялись с помощью коррелятора суммарно-разностного типа [7].

Чувствительность экспериментальной установки при измерении

флуктуаций частоты была не хуже $S_{f\min}(F) = 30/F \text{ Гц}^2/\text{Гц}$, флуктуаций амплитуды — $S_{\alpha\min}(F) = 3 \cdot 10^{-13}/F \text{ дБ}/\text{Гц}$, шумов тока — $S_{i\min} = 10^{-19} \text{ А}^2/\text{Гц}$ ($F > 300 \text{ Гц}$). Минимально измеряемый коэффициент корреляции $|r_{if}| = 0,2$ при $F < 1 \text{ кГц}$ и $|r_{if}| = 0,05$ при $F \geq 1 \text{ кГц}$. Относительная погрешность флуктуационных измерений не превышала $\pm 1 \text{ дБ}$ во всем диапазоне частот анализа.

2. Результаты измерений. На рис. 1, 2, 4, 5 представлены результаты измерений для малошумящего генератора 1 и наиболее шумящего из обследованных генератора 2. Данные, полученные для других ГДГ, приведены в табл. 1.

Вольт-амперные характеристики, зависимости мощности P и частоты колебания f от напряжения смещения U изображены на рис. 1 (номера кривых соответствуют номерам генераторов). Пороговое напряжение U_t , соответствующее возникновению эффекта Ганна, составляло в обследованных образцах 1,2 — 1,3 В.

На рис. 2 приведены результаты измерения выходной мощности, частоты, тока и уровня флуктуаций частоты S_f ($F = 1 \text{ кГц}$) генератора 1 от фазы ϕ и коэффициента стоячей волны ρ нагрузки. Как видно, изменение фазы нагрузки приводит к изменению амплитуды V (меняется постоянная составляющая тока I и выходная мощность P) и частоты f колебаний (затягивание частоты). Пунктиром на рисунке изображено скачкообразное изменение режима, стрелками — направление изменения фазы. Наблюдаемые гистерезисные явления, вероятно, связаны со сложным характером колебательной системы, имеющей петлевой вид годографа на комплексной плоскости [9]. В качестве примера на рис. За представлен такой годограф адmittанса колебательной системы $Y_k(\omega) = G_k(\omega) + jB_k(\omega)$ и годограф адmittанса диода (линия прибора) — $Y(V) = G(V) - jB(V)$ (кривая 1, $\omega = 2\pi f$). Устойчивому режиму автоколебаний соответствуют точки, в которых угол пересечения годографов α , отсчитываемый от направления $-Y(V)$ по часовой стрелке, меньше π [9]. При монотонном изменении фазы нагрузки ϕ годограф адmittанса $Y_k(\omega)$, пересчитанного к зажимам диода, периодически перемещается на комплексной плоскости относительно линии прибора. С увеличением КСВ нагрузки амплитуда этого перемещения увеличивается и становятся возможными переходы генератора из одного режима стационарных колебаний в другой. Например, если генератор находился в состоянии, характеризуемом точкой A на комплексной плоскости, а годограф $Y_k(\omega)$ принял положение, изображенное на рис. 3б, то генератор переходит в другое устойчивое состояние B . При дальнейшем увеличении фазы нагрузки годограф $Y_k(\omega)$ принимает положение, показанное на рис. 3в, и происходит обратный переход генератора из состояния B в состояние A . Как видно из рис. 2а, областям изменения режимов соответствует возрастание уровней частотного шума на 10—12 дБ. Это также можно объяснить с помощью представлений, развитых в [9]. В соответствии с [9, 10] для частотного шума $S_f(F)$ генератора, вызываемого низкочастотными флуктуациями активной G - и реактивной B -составляющих проводимости диода, полагая их для простоты статистически независимыми, можно записать

$$S_f(F) = \frac{f^2}{4Q_h^2 \sin^2(\theta - \vartheta)} \left[\frac{B^2}{G^2} \frac{S_B(F)}{B^2} \cos^2 \vartheta + \frac{S_G(F)}{G^2} \sin^2 \vartheta \right], \quad (1)$$

где $\vartheta = \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{\partial B}{\partial V} \right) / \left(- \frac{\partial G}{\partial V} \right) \right]$, $\theta = \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{\partial B_k}{\partial \omega} \right) / \left(\frac{\partial G_k}{\partial \omega} \right) \right]$, Q_h — на-
груженная добротность колебательной системы, $S_G(F)/G^2$, $S_B(F)/B^2$ — спектральные плотности относительных флуктуаций активной и реактивной проводимостей диода. Углы ϑ и θ , соответственно, зависят от степени неизохронности генератора, определяемой членом $\partial B / \partial V$, и крутизны фазочастотной характеристики контура. Изменением G - и

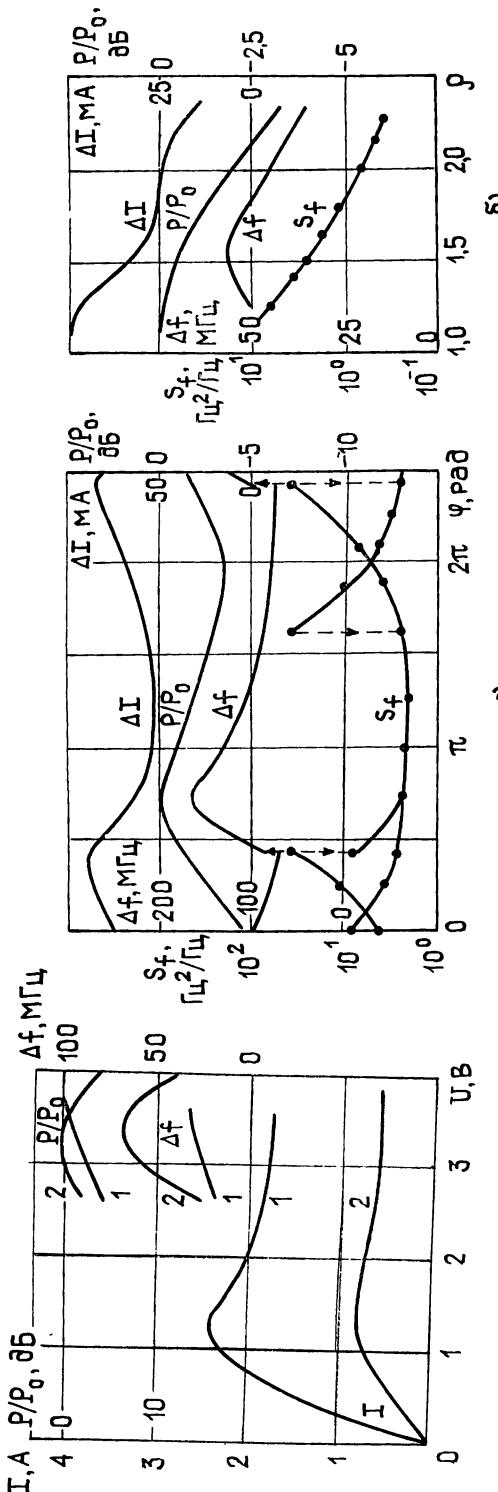


FIG. 1.

FIG. 2.

a)

b)

B -диода при изменении фазы нагрузки в первом приближении можно пренебречь. Это следует из слабого изменения выходной мощности генератора P (не более 3 дБ), а следовательно, и амплитуды колебаний V , с ростом φ (рис. 2а). Как видно из рис. За, углы θ , ϑ и α связаны простым соотношением $\theta - \vartheta = \pi - \alpha$, т. е. $\sin(\theta - \vartheta) = \sin \alpha$. При подходе к точке скачкообразного изменения режима колебаний угол α приближается к нулю (рис. 3б) или к π (рис. 3в). В обоих случаях знаменатель (1) резко уменьшается, а уровень частотного шума возрастает, что и наблюдалось экспериментально.

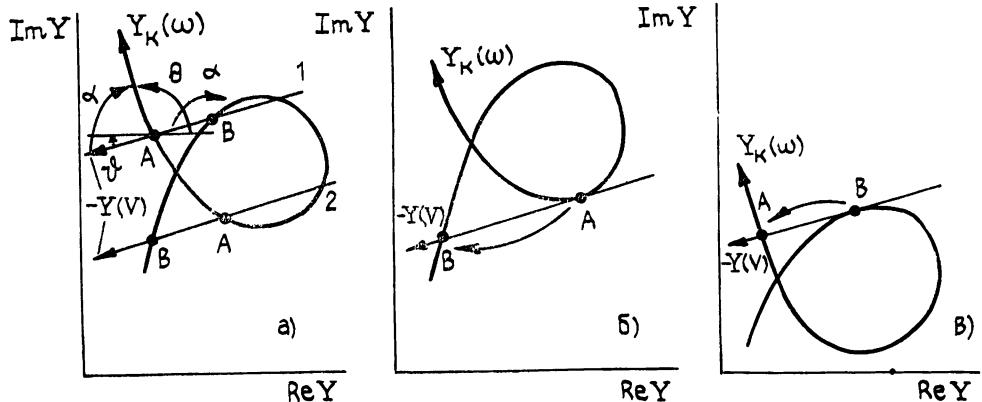


Рис. 3.

Как видно из рис. 2б, увеличение КСВ нагрузки приводит к уменьшению выходной мощности генераторов и возрастанию амплитуды переменного напряжения на диоде, о чем свидетельствует падение постоянной составляющей тока I . С увеличением значения ρ от 1,2 до 2 выходная мощность падает на 2–3 дБ при уменьшении уровня флюктуаций частоты примерно на 10 дБ. Столь значительное уменьшение шума не может быть связано только с увеличением внешней добротности генератора. Увеличение амплитуды колебаний приводит к изменению таких параметров в (1), как активная G - и реактивная B -проводимость диода, угол α , а также, по-видимому, к изменению величины относительных флюктуаций S_G/G^2 и S_B/B^2 . Поэтому обсуждение зависимости $S_f(\rho)$ требует проведения конкретного расчета динамических и флюктуационных характеристик ГДГ. Тем не менее, изображенные на рис. 2 характеристики представляют практический интерес, показывая возможность оптимизации энергетических и шумовых параметров генераторов Ганна.

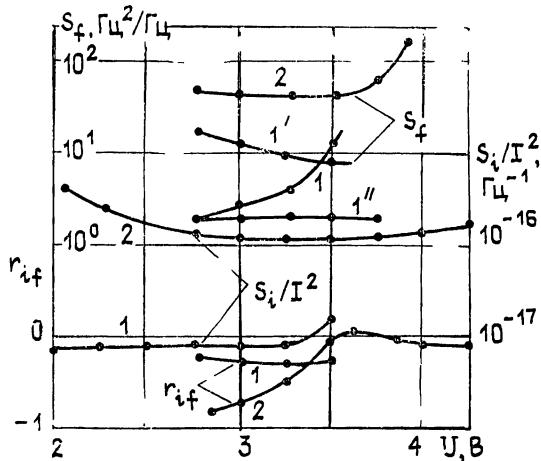


Рис. 4.

На рис. 4 приведены зависимости уровней флюктуаций частоты S_f ($F=1 \text{ кГц}$, $\rho=1,2$) от напряжения смещения U при различных настройках по фазе нагрузки. Как видно, перестраивая фазу, можно получить зависимости $S_f(U)$ различного вида (см. кривые 1, 1', 1''). Характер кривой $S_f(U)$ зависит от того, в каком из двух возможных стационарных состояний находится генератор. Увеличение напряжения смещения приводит к изменению G - и B -диода. Пусть это изменение происходит таким образом, что линия прибора перемещается из положения 2 в положение 1 на рис. 3а. Частота колебаний при этом возрастает, что соответствует кривой 1 на рис. 1. Тогда если генератор находится в состоянии B (рис. 3а), то уровень частотных флюктуаций возрастает (кривая 1, рис. 4) с увеличением U , так как $\sin \alpha$ в (1) уменьшается. Если генератор находится в состоянии A , то величина S_f уменьшается (кривая 1'), поскольку $\sin \alpha$ в этом случае возрастает с увеличением напряжения смещения U (рис. 3а).

Уровни относительных шумов тока ГДГ (рис. 4) на частоте $F=1 \text{ кГц}$ слабо зависят от напряжения смещения и практически одинаковы в режиме генерации и в предпороговом режиме. Изменение фазы нагрузки может приводить к изменению уровня $S_i(F)/I^2$ на 3—4 дБ, что, по-видимому, связано с автодетектированием флюктуаций амплитуды.

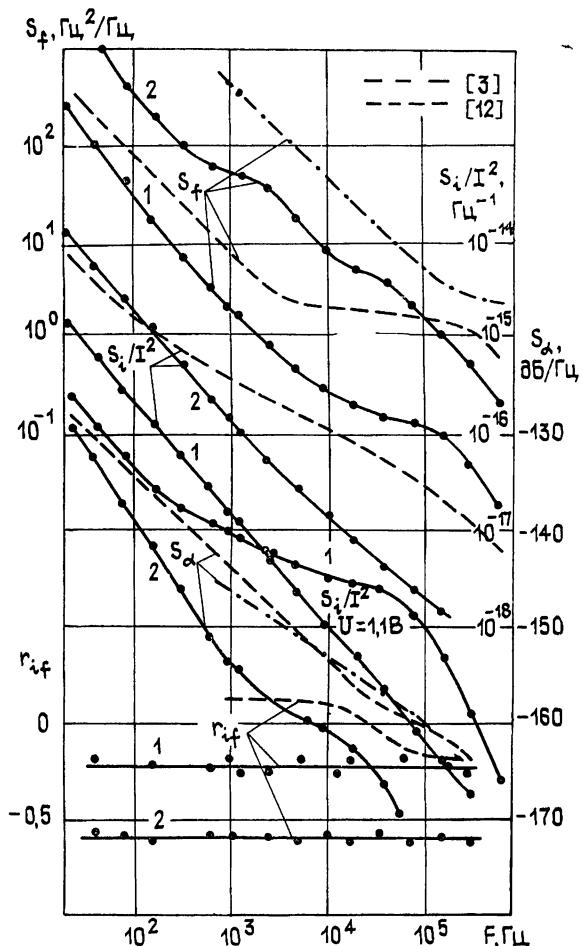


Рис. 5.

Энергетические спектры флюктуаций частоты $S_f(F)$ генераторов на диодах 1, 2 представлены на рис. 5 сплошными линиями (фаза нагрузки соответствует минимуму S_f , $\rho=1,2$). Они содержат фликкер-

ные и генерационно-рекомбинационные ($\Gamma\bar{P}$) составляющие. Последние проявляются на частотах анализа $F \geq 10^3$ – 10^4 Гц. Здесь же изображен спектр флуктуаций амплитуды $S_\alpha(F)$ генератора 2. В остальных ГДГ уровень S_α лежит ниже чувствительности измерительной установки. В энергетических спектрах шумов тока $S_i(F)/I^2$ в рабочем режиме ($U=3,5$ В) преобладают фликкерные составляющие (рис. 5). Вид этих спектров заметно отличается как от спектров флуктуаций амплитуды и частоты колебания, так и от спектров шумов тока, измеренных в допороговом режиме ($U \leq U_t$). Для примера на рис. 5 изображен спектр шумов тока образца 1 при $U=1,1$ В.

На рис. 4 и 5 представлены также результаты измерения коэффициента корреляции между флуктуациями частоты и тока r_{if} в генераторах 1 и 2. Коэффициент корреляции слабо зависит от частоты анализа (рис. 5), но может сильно меняться в зависимости от напряжения смещения (от $-0,7$ до $+0,1$ в генераторе 2, рис. 4).

3. Сопоставление с шумовыми характеристиками ГДГ сантиметрового диапазона. Сначала сравним полученные результаты с имеющимися в литературе данными о шумах ГДГ 8-миллиметрового диапазона. На рис. 5 штрихпунктиром представлены шумовые характеристики ГДГ, работающего на первой гармонике на частоте $f = 40$ ГГц [3]. Как видно, уровень частотного шума в этом приборе превосходит наблюдавшиеся нами на 5–10 дБ. Из них 5–6 дБ можно связать с различием частоты f , мощности P и добротности колебательных систем Q_h генераторов в соответствии с (1). Уровень S_f , измеренный в [2] ($f = 28$ ГГц, $P = 185$ мВт, $Q_{bh} = 330$), практически совпадает с данными по генератору 1. Флуктуации амплитуды ГДГ наблюдались в [3] на уровне шумов измерительной аппаратуры. Поэтому штрихпунктир на рис. 5 является верхней оценкой $S_\alpha(F)$, которая не более чем на 10 дБ превосходит амплитудный шум в генераторе 2. Таким образом, обследованные нами генераторы по уровню флуктуаций колебания являются типичными и близки к описанным в литературе. Отсутствие данных о шумах тока в ГДГ миллиметрового диапазона и их корреляционных связях с флуктуациями колебания не позволяет дополнить сравнение.

Полученные в работе результаты интересно сопоставить с подробно исследованными шумовыми характеристиками ГДГ 3-сантиметрового диапазона. На рис. 5 пунктиром представлены типичные характеристики одного из обследованных в [11] генераторов ($f = 10$ ГГц, $P = 40$ мВт, $Q_{bh} = 190$). Спектр флуктуаций частоты $S_f(F)$ пересчитан на частоту $f = 36$ ГГц в соответствии с (1). Как видно, уровни S_f в приборах сантиметрового и 8-миллиметрового диапазонов при таком пересчете примерно одинаковы. Флуктуации амплитуды S_α в коротковолновых ГДГ относительно низки. Их величина в наиболее шумящем генераторе 2 не превышает уровня S_α в лучшем из описанных в [10, 12] генераторов сантиметрового диапазона и примерно на 10 дБ ($F \geq 1$ кГц) меньше, чем в [11] (пунктир на рис. 5).

Шумы тока диодов сантиметрового диапазона в допороговом режиме и в режиме генерации превосходят на частотах $F \geq 1$ кГц уровень S_i/I^2 в обследованных приборах не менее чем на 5–10 дБ (рис. 5). Если в соответствии с [13, 14] полагать, что уровень флуктуаций тока характеризует интенсивности источников шума, действующих в ГДГ, то из проведенного сравнения следует, что степень воздействия этих источников на амплитуду колебаний в генераторах двух диапазонов примерно одинакова. В то же время их влияние на частоту коротковолновых ГДГ значительно сильнее.

Спектры флуктуаций колебания $S_\alpha(F)$, $S_f(F)$ и тока $S_i(F)/I^2$ заметно различаются в генераторах обоих диапазонов. Это находит свое отражение в малом коэффициенте корреляции r_{if} (рис. 5). Однако если в ГДГ сантиметрового диапазона фликкерные составляющие выражены сильнее в спектрах $S_\alpha(F)$ и $S_f(F)$, то в более коротковолновых генераторах фликкерные флуктуации преобладают в шумах

тока $S_i(F)/I^2$. Во флюктуациях амплитуды $S_\alpha(F)$ и частоты $S_f(F)$ более заметны ГР составляющие.

Для ГДГ 3-сантиметрового диапазона в [13, 14] экспериментально показано, что существует соответствие между шумами тока диода в предпороговом режиме и уровнем флюктуаций частоты. Несмотря на указанные выше различия аналогичное соответствие имеет место и в обследованных генераторах 8-миллиметрового диапазона. Как видно из табл. 1 и рис. 4, 5, в генераторах с меньшим уровнем шумов тока в предпороговом режиме и в режиме генерации флюктуации частоты ниже.

Таблица 1

$U=3,5$ В, $F=1$ кГц

Номер диода	1	2	3	4
P , мВ	27	20	25	28
$Q_{\text{вн}}$	175	184	116	135
S_i/I^2 , Гц $^{-1}$	$1,35 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-16}$	$1,2 \cdot 10^{-17}$	$3,2 \cdot 10^{-17}$
S_α , дБ/Гц	$\ll -155$	-154	$\ll -155$	$\ll -155$
S_f , Гц $^2/\text{Гц}$	2	50	4	25
r_{if}	-0,23	-0,6	-0,2	-0,25

Таким образом, проведенное обследование ГДГ 8-миллиметрового диапазона показало, что их динамические и шумовые характеристики могут быть качественно объяснены на основании представлений, развитых в [9, 10]. В первую очередь, это зависимости уровня флюктуаций частоты от КСВ и фазы нагрузки. Информация об этих характеристиках представляет практический интерес при конструировании малошумящих генераторов.

Сопоставление уровней и вида спектров флюктуаций амплитуды, частоты и тока в ГДГ 8-миллиметрового и 3-сантиметрового диапазонов выявило их существенное различие. При пересчете на одну частоту генерации уровни флюктуаций частоты S_f в ГДГ двух диапазонов примерно одинаковы, в то время как флюктуации амплитуды S_α и тока S_i/I^2 в генераторах 8-миллиметрового диапазона на 10—15 дБ ниже.

Несмотря на указанные различия, а также малый коэффициент корреляции r_{if} в генераторах 8-миллиметрового диапазона, так же как и в длинноволновых ГДГ, существует соответствие между уровнями флюктуаций частоты и тока. В генераторах на диодах с меньшим уровнем токовых шумов флюктуации частоты ниже.

Авторы благодарят В. Г. Усыченко за полезное обсуждение полученных в работе результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Singh D N // IEEE Trans 1976 V. ED-23. № 12 P. 1350.
2. Ruttan T. G. // IEEE Trans. 1974 V MTT-22. № 2. P. 142.
3. Eddison I. G. // J. Inst. Electron. Radio Eng. 1985 V 55. № 5. P. 177.
4. Kupo H L. // Microwave J. 1981 V 24. № 6 P 21.
5. Tully J. W., Weller K P., Benko E. // IEEE Trans 1978 V. ED-25. № 1. P. 64.
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ — М. Высшая школа, 1972. С. 89.
7. Корнилов С. А // Обзоры по электронной технике Сер. Электроника СВЧ. 1977. № 8(471), 57 с
8. А. с. 1255954 СССР Лосев В. Л., Киреев О. А., Малышев В. М., Румянцев С. Л., Мещеряков А. В — Опубл в Б. И. 1986 № 33 С. 177.
9. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ.— М. Мир, 1979 С 241
10. Ohoto M. // IEEE Trans. 1972 V MTT-20. № 7 P. 425.

11. Мещеряков А. В. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1983. № 4. С. 25
12. Gneerlich H. R, Ondria J. // IEEE Trans. 1977 V. MTT-25. № 12 P. 977.
13. Лосев В. Л., Киреев О. А., Малышев В. М., Мещеряков А. В. // Электронная техника Сер. Электроника СВЧ. 1983. № 11. С 34
14. Мещеряков А. В., Румянцев С. А., Усыченко В. Г // Тезисы докл. Всесоюзной конференции «Электроника СВЧ» — Минск, 1983 С 43.

Ленинградский политехнический
институт

Поступила в редакцию
3 августа 1987 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LOW FREQUENCY NOISE IN K_A -BAND GUNN OSCILLATORS

I A. Kravtsov, V M. Malyshev, A. V. Meshcheryakov

Noise characteristics of K_A -band Gunn oscillators have been examined. Dependencies of the frequency noise upon SWR and load phase have been analysed. A comparison of the noise characteristics of K_A -band and X-band oscillators has shown that their frequency noise being reduced to common frequency is approximately equal. The amplitude noise is 10 dB lower in K_A -band oscillators.
