



СПЕКТРЫ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА В РЕЖИМЕ НЧ И СВЧ-КОЛЕБАНИЙ

Д.А.Усанов, С.Б.Вениг, С.С.Горбатов, Э.В.Труфакин

Представлены результаты экспериментального исследования влияния на спектр выходного сигнала СВЧ-генератора на диоде Ганна многочастотных НЧ-колебаний, возникающих в цепи питания генератора. Теоретически описаны условия возбуждения таких колебаний в генераторной схеме. Показано, что в условиях воздействия многочастотных НЧ-сигналов на СВЧ-генератор на диоде Ганна модуляция выходного сигнала может быть как преимущественно амплитудной, так и частотной.

Одной из особенностей работы СВЧ-генераторов на диодах Ганна является возбуждение в цепи питания низкочастотных колебаний, обусловленных существованием у этих диодов отрицательного дифференциального сопротивления в широком диапазоне частот [1–6]. Возможность возникновения низкочастотных колебаний в СВЧ-генераторах обычно предотвращается [3, 4], в частности, введением НЧ-фильтра в цепь питания. В то же время, известны работы, в которых показана возможность использования таких низкочастотных колебаний для амплитудной и частотной модуляции выходного сигнала [6, 7], для проведения двухпараметровых измерений с помощью автодинных устройств [8]. Помимо гармонических колебаний в низкочастотных цепях СВЧ-генератора на диоде Ганна могут возникать колебания сложного спектрального состава, вплоть до хаотических [9]. Поэтому представляет интерес исследование особенностей работы таких генераторов в условиях возбуждения как гармонических, так и НЧ-колебаний более сложного спектрального состава.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования особенностей спектра выходного СВЧ-сигнала в генераторе на диоде Ганна при возбуждении многочастотных колебаний в его НЧ-цепях.

Для проведения экспериментальных исследований был использован СВЧ-генератор на диоде Ганна (рис. 1), который представляет собой отрезок прямоугольного металлического волновода (1) с короткозамыкающим поршнем (2), используемым для перестройки частоты генератора. Диод (3) устанавливается в разрыве стержневого держателя (4), являющегося продолжением центрального проводника коаксиала (5). Проводники коаксиальной линии изолированы от волновода диэлектрическими прокладками (6, 7). Напряжение

смещения от источника питания подается на диод через фильтр низкой частоты (8) по центральному проводнику коаксиала, который не только выполняет роль проводника в цепи питания, но и осуществляет связь активного элемента с резонатором. Резонатором является отрезок волновода, заключенный между диодом и короткозамыкающим поршнем. Отрезок волновода, подключенный к держателю с диодом с другой стороны, и следующая за ним волноведущая линия исполняют роль нагрузки.

В ходе эксперимента в цепи питания диода Ганна наблюдались как одночастотные, так и двухчастотные колебания низкой частоты. Установлено, что частоты и амплитуды таких колебаний зависят от положения короткозамыкающего поршня и напряжения смещения. Частота одной из составляющих изменялась в пределах от 0.1 до 2.0 МГц, частота второй – в пределах от 4.0 до 8.0 МГц. При этом соотношение частот не всегда равнялось целому числу. Значение амплитуд составляющих не выходило за диапазон от 0.5 до 2.0 В.

При возбуждении в низкочастотных цепях СВЧ-генератора на диоде Ганна одночастотных колебаний наблюдалось изменение спектра выходного СВЧ-сигнала, характерное для его амплитудной модуляции низкочастотным сигналом. В случае возбуждения двухчастотных НЧ-колебаний спектр выходного сигнала принимал вид, характерный для частотной модуляции при больших значениях индекса модуляции [10] (рис. 2). Величина девиации частоты при этом определялась амплитудой НЧ-колебаний и крутизной зависимости частоты СВЧ-генератора от напряжения на диоде Ганна. Изменение положения короткозамыкающего поршня также влияло на величину девиации частоты. В частности, с увеличением расстояния между плоскостью, в которой расположен диод Ганна, и поршнем величина девиации частоты увеличивалась и достигала значений до 40 МГц. Отметим, что вариации частот и амплитуд НЧ-колебаний в рассматриваемом эксперименте ограничивались значениями эквивалентных параметров конструктивных элементов НЧ- и СВЧ-контуров генератора.

Для расширения представлений о характере наблюдаемых явлений нами был проведен модельный эксперимент, в ходе которого через цепь питания СВЧ-генератора, работающего в одночастотном режиме (режиме подавления низкочастотных колебаний), подавались гармонические сигналы низкой частоты от двух стандартных генераторов сигналов в диапазоне частот $0.01 \dots 2 \cdot 10^6$ Гц.

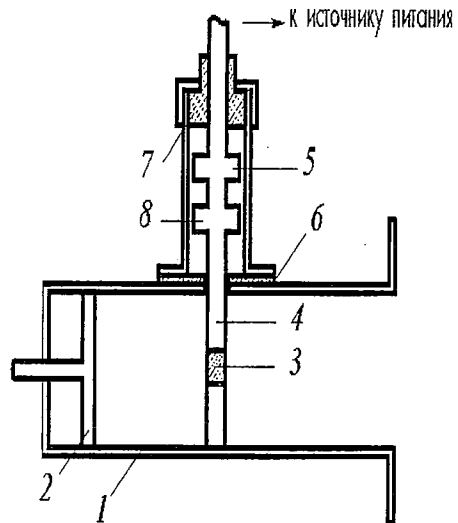


Рис. 1. Конструкция СВЧ-генератора на диоде Ганна: 1 – отрезок прямоугольного металлического волновода, 2 – короткозамыкающий поршень, 3 – диод Ганна, 4 – стержневой держатель, 5 – коаксиальная линия, 6, 7 – диэлектрические прокладки, 8 – фильтр НЧ

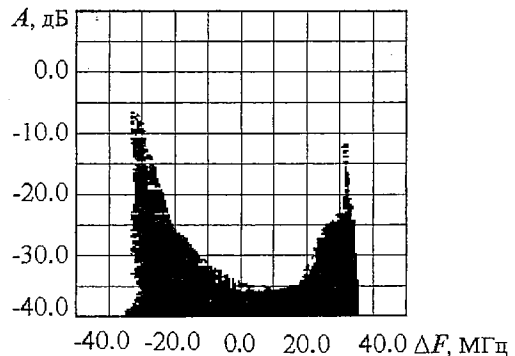


Рис. 2. Спектр частотно модулированного выходного СВЧ-сигнала

Как и ожидалось, в зависимости от напряжения питания на диоде Ганна при подаче внешних гармонических сигналов наблюдались как преимущественно амплитудная, так и частотная модуляции выходного СВЧ-сигнала с большим индексом модуляции. Подобный характер изменения преимущественного типа модуляции наблюдался как для внешних сигналов с одинаковыми частотами и разными амплитудами, так и в случае одинаковых амплитуд и различных частот. Было обнаружено, что при воздействии на СВЧ-генератор двух внешних НЧ-сигналов как с одинаковыми амплитудами и различными частотами, так и с одинаковыми частотами и различными амплитудами, существуют области параметров внешних сигналов, в которых при их изменении тип модуляции выходного СВЧ-сигнала не меняется. На рис. 3 на плоскости параметров внешних сигналов «частота – разность амплитуд» и «амплитуда – разность частот» показаны области преимущественного существования частотной 1 или амплитудной модуляции 2. В областях 3 при изменении параметров внешних сигналов тип модуляции выходного сигнала СВЧ изменяется.

При анализе характера изменения спектра выходного сигнала в зависимости от разности частот внешних НЧ-сигналов было обнаружено, что величина девиации частоты, которая определяет ширину спектра, может изменяться во времени, то есть при воздействии двух внешних сигналов происходит модуляция не только частоты СВЧ-сигнала, но и величины девиации частоты. Для малых значений разности частот внешних сигналов (до 24 Гц) возможно изменение во времени величины девиации с частотой, равной разности частот подаваемых внешних сигналов (рис. 4).

Следует отметить, что различные типы модуляции выходного сигнала при различных настройках СВЧ-генератора наблюдались и при подаче только одного внешнего низкочастотного сигнала, однако при этом преимущественно частотная модуляция наблюдалась в более узком диапазоне изменения параметров генератора, чем при воздействии двух внешних сигналов.

Для выяснения условий возникновения многочастотной НЧ-генерации в СВЧ-генераторе на диоде Ганна использовалась его эквивалентная схема, представленная на рис. 5. При составлении эквивалентной схемы СВЧ-генератора предполагалось, что источник напряжения через цепь питания связан с диодом

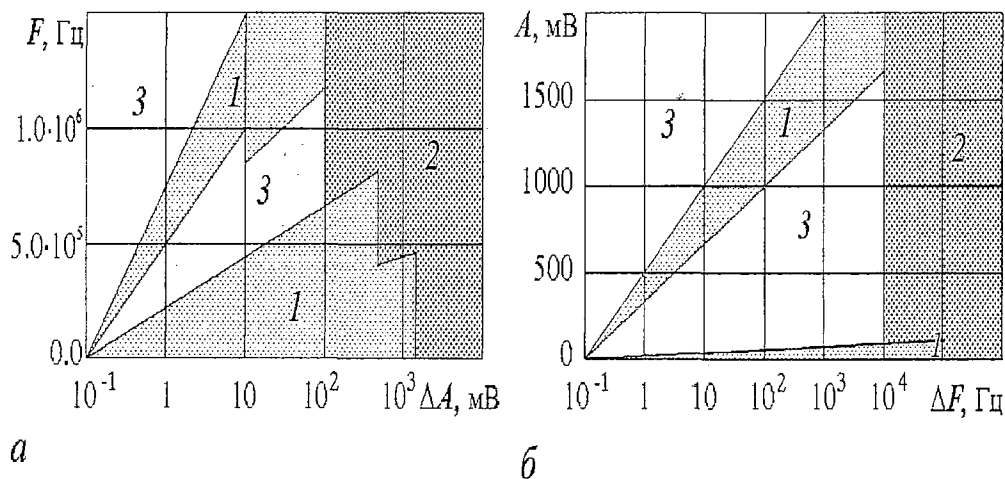


Рис. 3. Области существования частотной и амплитудной модуляции выходного СВЧ-сигнала на плоскости параметров внешних НЧ-сигналов: частота – разность амплитуд (а) и амплитуда – разность частот (б)

Ганна и элементом связи, который, в свою очередь, обеспечивает связь с резонансным контуром и нагрузкой. Цепь питания включает в себя фильтр НЧ. Диод Ганна представлен в виде эквивалентной схемы, содержащей параллельно соединенные нелинейные проводимость и реактивность диодной структуры с подключенными соответствующим образом пассивными и реактивными элементами корпуса и крепления. Элемент связи, в зависимости от настройки генератора может иметь как емкостный, так и индуктивный характер, а его связь с резонансным контуром и нагрузкой осуществляется через разделительные емкости. Нелинейная проводимость диода определяется из выражения для его вольтамперной характеристики $i(U)$ [11]

$$i(U) = enS\{\mu(U + D)/l + V_s[(U + D)/V_p]^4\}/\{1 + [(U + D)/V_p]^4\},$$

где e – заряд электрона, n – концентрация электронов, S – площадь структуры, l – длина структуры, μ – подвижность носителей заряда, V_s – скорость носителей заряда, V_p , D – коэффициенты с размерностью напряжения.

Система дифференциальных уравнений для напряжений и токов в рассматриваемой эквивалентной схеме, составленная методом переменных состояния и представляющая собой математическую модель генератора на диоде Ганна, имеет в этом случае следующий вид:

$$dU/d\tau = 1/(\omega C_j)[i_s - i(U)]; \quad dU_s/d\tau = 1/(\omega C_s)(J_0 - i_s);$$

$$dU_{\text{бн}}/d\tau = 1/(\omega C_{\text{бн}})[(E_0 - U_{\text{бн}})/R_{\text{см}} - J_0];$$

$$di_s/d\tau = 1/(\omega L_s)(U_s - U - i_s R_s); \quad di_c/d\tau = 1/(\omega L_c)(U_{\text{бн}} - U_s); \quad di_k/d\tau = V;$$

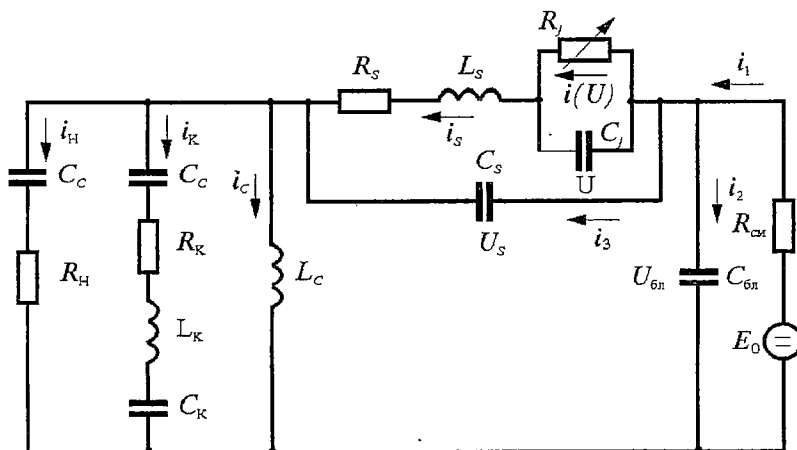


Рис. 5. Эквивалентная схема СВЧ-генератора на диоде Ганна

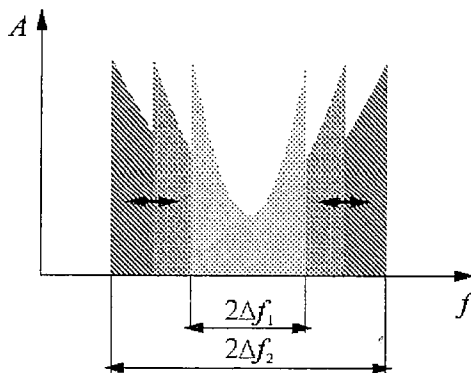


Рис. 4. Качественный вид спектра выходного СВЧ-сигнала при значениях разности частот одинаковых по амплитуде внешних НЧ-сигналов менее 24 Гц

$$dV/d\tau = 1/(\omega L_K)[(1/\omega)I_0 - \omega L_K i_K - 1/(\omega L_S)i_S - R_K V];$$

$$di_H/d\tau = 1/(\omega R_H)[dE/d\tau + i_S/C_S - i_H/C_C + J_0],$$

где $J_0 = i_C + i_K + i_H$, $\tau = \omega t$.

При проведении расчета по этим уравнениям методом Рунге – Кутты четвертого порядка значения элементов эквивалентной схемы определялись по экспериментальным и справочным данным. Были выбраны следующие значения: $E_0 = 3 \div 10$ В, $R_{cm} = 2 \div 10$ Ом, $C_{bn} = 10^{-12} \div 10^{-6}$ Ф, $R_S = 0.5 \div 2$ Ом, $L_S = 5 \cdot 10^{-10}$ Гн, $C_S = 2 \cdot 10^{-11}$ Ф, $L_K = 10^{-9}$ Гн, $C_K = 10^{-11}$ Ф, $R_H = R_K = 50$ Ом, $L_C = (1 \div 3)10^{-9}$ Гн, $C_C = (2 \div 10)10^{-12}$ Ф. Емкость структуры была положена равной «холодной» емкости, $(6 \div 10)10^{-13}$ Ф. В ходе компьютерного эксперимента исследовалась зависимость режима колебаний в цепи питания генератора от величины постоянного смещения и значений параметров элементов эквивалентной схемы.

На рис. 6 представлены зависимости от времени напряжения на нагрузке для различных значений напряжения питания диода Ганна E_0 , из которых следует, что при напряжениях, близких к пороговому, в НЧ-цепи могут возбуждаться двухчастотные колебания низкой частоты, составляющие спектра которых не связаны целочисленными соотношениями. С ростом напряжения питания

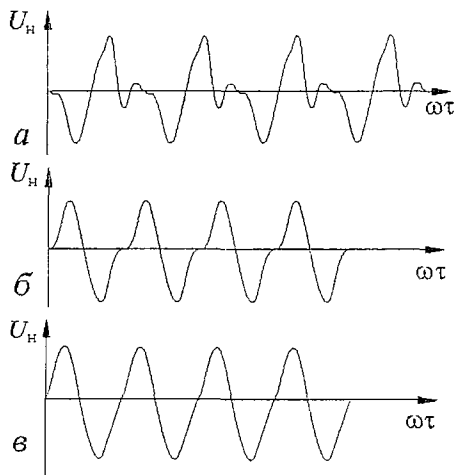


Рис. 6. Зависимость напряжения в нагрузке от времени для различных напряжений питания диода Ганна E_0 : 4.7 В (а); 6 В (б); 8 В (в)

амплитуда более высокочастотной составляющей уменьшается и при $E_0 > 8$ В колебания становятся одночастотными. Проведенное компьютерное моделирование подтвердило возможность возбуждения в цепи питания СВЧ-генератора на диоде Ганна двухчастотных низкочастотных колебаний, составляющие спектра которых не всегда связаны целочисленными соотношениями.

Таким образом, показано, что наличие в цепи смещения СВЧ-генератора на диоде Ганна низкочастотных колебаний может приводить преимущественно либо к частотной, либо к амплитудной модуляции выходного СВЧ-сигнала. В случае частотной модуляции выходного сигнала величина девиация частоты может достигать значений до 40 МГц.

Библиографический список

1. Tsai W.C., Rosenbaum F.I. Bias circuit oscillations in Gunn devices // IEEE Trans. Electron. Dev. 1969. Vol. ED-16, № 2. P. 196.
2. Мальшиев В.А., Роздобудько В.В., Головкин А.С. Автомодулированные СВЧ-колебания на диоде Ганна // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. Т. 20, № 10. С. 85.
3. Романюк В.А., Шарифов Т.М. Паразитные колебания в СВЧ генераторах на активных двухполосниках // Радиотехника. 1977. Т. 32, № 5. С. 57.

4. Романюк В.А., Шарифов Г.М. Подавление паразитных НЧ колебаний в генераторах Ганна // Радиотехника. 1977. Т. 32, № 12. С.74.
5. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Скрипаль А.В. Особенности низкочастотной генерации в диодах Ганна // Изв. вузов Радиоэлектроника. 1981. Т 24, № 10. С. 67.
6. Острейковский А.М. Особенности низкочастотной неустойчивости генераторов Ганна // Радиотехника. 1989. № 6. С. 19.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. 376 с.
8. Усанов Д.А., Авдеев А.А. Использование эффекта автодинного детектирования в генераторах на диодах Ганна для двухпараметрового измерения диэлектриков // Дефектоскопия. 1995. № 4. С. 42.
9. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Горбатов С.С., Труфакин Э.В. Хаотические колебания в СВЧ- и НЧ-цепях генератора на диоде Ганна // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7, № 4. С. 20.
10. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.
11. Murayama K., Ohmi T. Static negative resistance in highly doped Gunn diodes and application to switching and amplification // Japan. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12, № 12. P. 1931.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 5.03.01

OUTPUT SIGNAL SPECTRA OF THE GUNN-DIODE OSCILLATOR AT THE MODE OF LF AND MICROWAVE OSCILLATION

D.A.Usanov, S.B.Wenig, S.S.Gorbatov, E.V.Trufakin

Results of experimental research of multifrequency LF oscillation (arising in the microwave Gunn oscillator feed circuit) influence on output signal spectrum of the Gunn oscillator are presented. Conditions of such oscillation excitation in the circuit of the oscillator are described theoretically. It was shown that the Gunn-oscillator output signal may be both predominantly amplitude-modulated and frequency-modulated.



Усанов Дмитрий Александрович – родился в г. Менделеевске (1943), окончил Саратовский государственный университет (1965), куда после нескольких лет службы на предприятии электронной промышленности поступил на работу и где работает заведующим кафедрой физики твердого тела по настоящее время. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области физики полупроводников и диэлектриков (1972) и доктора физико-математических наук в области радиофизика, включая квантовую радиофизику (1989). Профессор СГУ, академик МАН ВШ, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – твердотельная СВЧ-электроника, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике СВЧ. Автор многих статей, патентов и изобретений по

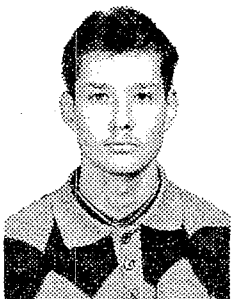
указанным выше направлениям. E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru



Вениг Сергей Борисович – родился в Саратове (1957), окончил Саратовский государственный университет (1979). После окончания работал инженером ОКБ ПО «Тантал». С 1981 года, после перевода в очную аспирантуру, работает в СГУ. Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «радиофизика, включая квантовую радиофизику» (1988) и доктора физико-математических наук по специальностям «радиофизика» и «физика полупроводников и диэлектриков» (1999). Доцент кафедры физики твердого тела СГУ. Область научных интересов, по направлениям которой опубликовано более 60 научных работ, – физика полупроводников, твердотельная электроника и радиофизика. E-mail: WenigSB@info.sgu.ru



Горбатов Сергей Сергеевич – родился в г. Энгельсе Саратовской области (1946), окончил Саратовский государственный университет (1973). После окончания СГУ работал на предприятиях электронной промышленности и в НИИ механики и физики при СГУ. В настоящее время обучается в докторантуре СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ в области радиофизики (1991). Область научных интересов – теория колебаний и волн, радиофизика, нелинейная динамика и полупроводниковая электроника СВЧ. Автор многочисленных статей по направлениям, указанным выше.



Труфакин Эдуард Владимирович – родился в г. Бельцы (1975), окончил Саратовский государственный университет (1998). Аспирант кафедры физики твердого тела СГУ. Область научных интересов – твердотельная электроника и нелинейная динамика.