УДК 621.382

А. В. Демьяненко, И. В. Семерник, Ю. И. Алексеев
Южный федеральный университет (Таганрог)

Анализ параметров генератора на лавинно-пролетном диоде при работе на согласованную нагрузку[1]

Обсуждены результаты решения уравнения автогенератора на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) при работе на согласованную нагрузку. С учетом импедансных свойств ЛПД даются соотношения, определяющие амплитуду и частоту автоколебаний.

СВЧ-генератор, лавинно-пролетный диод, импедансные свойства

Расширение функциональных возможностей твердотельных автогенераторов, в том числе и генераторов на лавинно-пролетном диоде (ЛПД), проявившееся в успешном освоении хаотических режимов их работы как основы создания эффективных шумовых источников [1]–[4], требует от исследователей строгих решений, позволяющих достаточно точно определять основные параметры генераторов в детерминированных режимах. Именно от параметров детерминированных режимов зависят характеристики хаотических режимов, в том числе и параметры шумовых генераторов, получаемых в устройствах, допускающих детерминированный хаос. В этой связи предлагаемая статья, посвященная строгому определению основных параметров генераторов на ЛПД в детерминированном режиме, является актуальной и даже необходимой.

Система уравнений генератора на ЛПД при согласованной нагрузке имеет вид

$$\begin{cases} di_1/dt = i_2; \\ di_2/dt = -\left[\dfrac{R_{p-n}(I_1, I_0) + R_{\text{н}}}{L}\right] i_2 - \\ -\left\{\omega_0^2 - \dfrac{\omega_1\left[X_{p-n}(I_1, I_0) - X_{C_{\text{dr}}}\right]}{L}\right\} i_1, \end{cases} \quad (1)$$

где i_1, I_1, i_2 – СВЧ-ток диода, его амплитуда и производная соответственно; I_0 – ток питания диода; R_{p-n}, X_{p-n} – активная и реактивная составляющие импеданса кристалла диода, обусловленные лавинными процессами и пролетным эффектом соответственно; $R_{\text{н}}$ = 4.3 Ом – сопротивление нагрузки; L – индуктивность резонатора; ω_0 – резонансная частота колебательного контура генератора; ω_1 – текущая частота; $X_{C_{\text{dr}}}$ – реактивное сопротивление пролетной области диода.

Введем обозначения

$$R = R_{p-n}(I_1, I_0) + R_{\text{н}};$$

$$X = X_{p-n}(I_1, I_0) - X_{C_{\text{dr}}}$$

и перепишем исследуемую систему уравнений (1) в следующем виде:

$$d^2 i_1/dt^2 + (R/L)\, di_1/dt + \left(\omega_0^2 - \omega_1 X/L\right) i_1 = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) воспользуемся методом медленно меняющихся амплитуд.

Уравнение генератора в общем случае может быть записано в следующем виде:

$$d^2 i_1/dt^2 + \omega_0^2 i_1 = \phi_1(i_1,\ di_1/dt).$$

Применение упомянутого метода анализа считается обоснованным, если функция $\phi_1(i_1,\ di_1/dt)$ мала по сравнению с остальными слагаемыми уравнения.

[1] Результаты, изложенные в статье, получены в рамках выполнения гранта № 8.2461.2014/К.

В рассматриваемом случае:

$$\phi_1\left(i_1,\ di_1/dt\right)=\left(\omega_1 X/L\right)i_1-\left(R/L\right)di_1/dt.$$

Требование малости $\phi_1\left(i_1,\ di_1/dt\right)$ выполняется, и решение уравнения будет мало отличаться от гармонического [5].

Решение отыскивается в виде

$$i_1=A(t)\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right], \qquad (3)$$

где $A(t)$ и $\varphi(t)$ – амплитуда и фаза тока i_1 в генераторе – медленно меняющиеся во времени функции, т. е. их изменение за период колебания генератора мало по сравнению с амплитудой колебания.

Найдем первую и вторую производные СВЧ-тока диода (3):

$$\begin{aligned}\frac{di_1}{dt}&=\frac{dA}{dt}\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-A(t)\left(\omega_1+\frac{d\varphi}{dt}\right)\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right];\end{aligned} \qquad (4)$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 i_1}{dt^2}&=\frac{dA}{dt}\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]\left(2\omega_1+\frac{d\varphi}{dt}\right)+\\&+\frac{d^2A}{dt^2}\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-A(t)\omega_1^2\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-2A(t)\frac{d\varphi}{dt}\omega_1\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-A(t)\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-A(t)\frac{d^2\varphi}{dt^2}\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right].\end{aligned} \qquad (5)$$

В (4) пренебрежем слагаемыми, содержащими dA/dt и $d\varphi/dt$, а в (5) – слагаемыми второго порядка малости, содержащими вторые производные медленно меняющихся функций $A(t)$ и $\varphi(t)$, квадрат первой производной $d\varphi/dt$, а также произведение $(dA/dt)(d\varphi/dt)$:

$$\begin{cases}\dfrac{di_1}{dt}\approx -A(t)\omega_1\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right];\\ \dfrac{d^2 i_1}{dt^2}\approx -2\omega_1\dfrac{dA}{dt}\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\ -A(t)\left(\omega_1^2+2\omega_1\dfrac{d\varphi}{dt}\right)\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right].\end{cases} \qquad (6)$$

Подставив выражения (6) в уравнение (2), получим:

$$\begin{aligned}&2\omega_1\left(dA/dt\right)\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-A(t)\left[\omega_1^2+2\omega_1\left(d\varphi/dt\right)\right]\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]-\\&-\left(R/L\right)A(t)\omega_1\sin\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]+\\&+\left(\omega_0^2-\omega_1 X/L\right)A(t)\cos\left[\omega_1 t+\varphi(t)\right]=0,\end{aligned}$$

откуда имеем два уравнения:

$$dA/dt+\left[R/(2L)\right]A=0;$$

$$d\varphi/dt+(1/2)\left(\omega_1-\omega_0^2/\omega_1\right)+X/(2L)=0.$$

Выражение для импеданса диода запишем в следующем виде [6], [7]:

$$\begin{aligned}Z_{p-n}&=\frac{1}{\omega_1 C_{\mathrm{dr}}}\frac{\beta_{\text{л}}^2\phi(E_1)}{\beta_{\text{л}}^2\phi(E_1)-1}\frac{1-\cos\theta_{\mathrm{dr}}}{\theta_{\mathrm{dr}}}+\\&+j\frac{1}{\omega_1 C_{\mathrm{dr}}}\left\{\frac{\beta_{\text{л}}^2\phi(E_1)}{\beta_{\text{л}}^2\phi(E_1)-1}\frac{\sin\theta_{\mathrm{dr}}}{\theta_{\mathrm{dr}}}-\right.\\&\left.-1+\frac{l_{\mathrm{a}}}{\left[\beta_{\text{л}}^2\phi(E_1)-1\right](W-l_{\mathrm{a}})}\right\},\end{aligned} \qquad (7)$$

где $\beta_{\text{л}}=\Omega_{\text{л}}/\omega_1$;

$$\phi(E_1)=\frac{2\mathrm{I}_1(bE_1)}{(bE_1)\mathrm{I}_0(bE_1)}$$

– функция, определяющая амплитудные свойства импеданса [7]; θ_{dr} – угол пролета области дрейфа носителем заряда на центральной частоте; W – ширина запорного слоя; l_{a} – ширина слоя умножения, причем $\Omega_{\text{л}}$ – лавинная частота; I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; b – параметр аппроксимации коэффициента лавинного умножения; E_1 – амплитуда переменной составляющей напряженности электрического поля.

Лавинная частота определяется как [8]

$$\Omega_{\text{л}}=\sqrt{2I_0\alpha' l_{\mathrm{a}}/(S\varepsilon\tau_{\mathrm{a}})},$$

где α' – производная коэффициента ионизации при напряженности электрического поля E_{dc}; S – площадь поперечного сечения p–n-перехода; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; $\tau_{\mathrm{a}}=l_{\mathrm{a}}/v_s$ – время пролета носителем заряда эквивалентного слоя умножения, причем v_s – скорость носителей заряда.

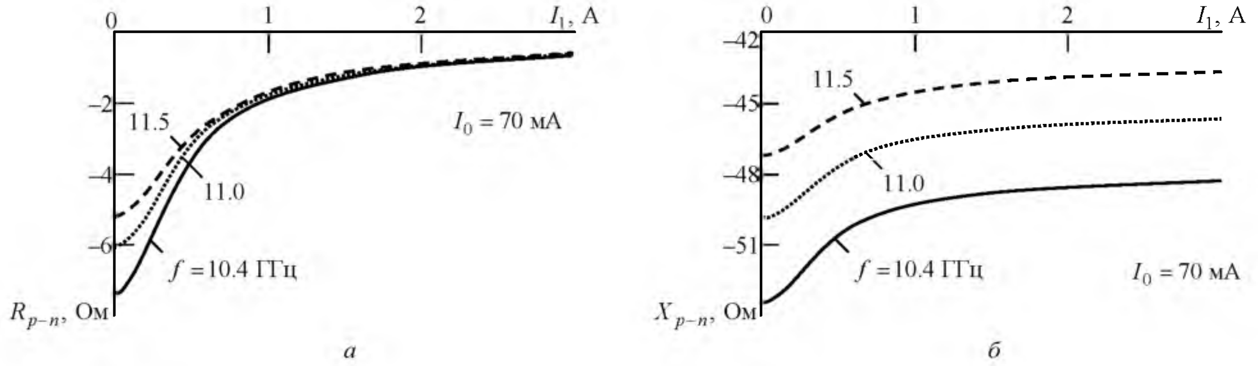


Рис. 1

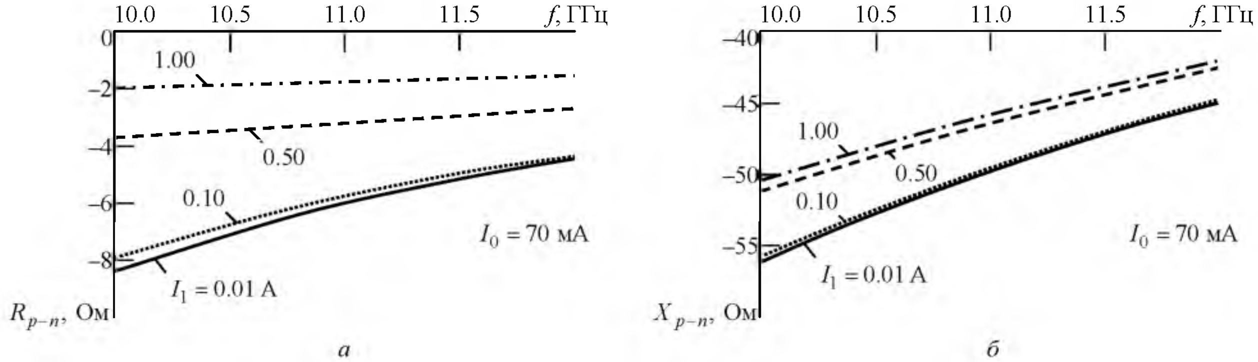


Рис. 2

Разделив в (7) действительную и мнимую части, получим выражения для активной и реактивной составляющих импеданса:

$$
\begin{cases}
R_{p-n} = \dfrac{1}{\omega C_{\rm dr}} \dfrac{\beta_{\text{л}}^2 \phi(E_1)}{\beta_{\text{л}}^2 \phi(E_1) - 1} \dfrac{1-\cos\theta_{\rm dr}}{\theta_{\rm dr}}; \\
X_{p-n} = \dfrac{1}{\omega C_{\rm dr}} \left\{ \dfrac{\beta_{\text{л}}^2 \phi(E_1)}{\beta_{\text{л}}^2 \phi(E_1) - 1} \dfrac{\sin\theta_{\rm dr}}{\theta_{\rm dr}} - 1 + \right. \\
\qquad \left. + \dfrac{l_{\rm a}}{\left[\beta_{\text{л}}^2 \phi(E_1) - 1\right](W - l_{\rm a})} \right\}.
\end{cases} \qquad (8)
$$

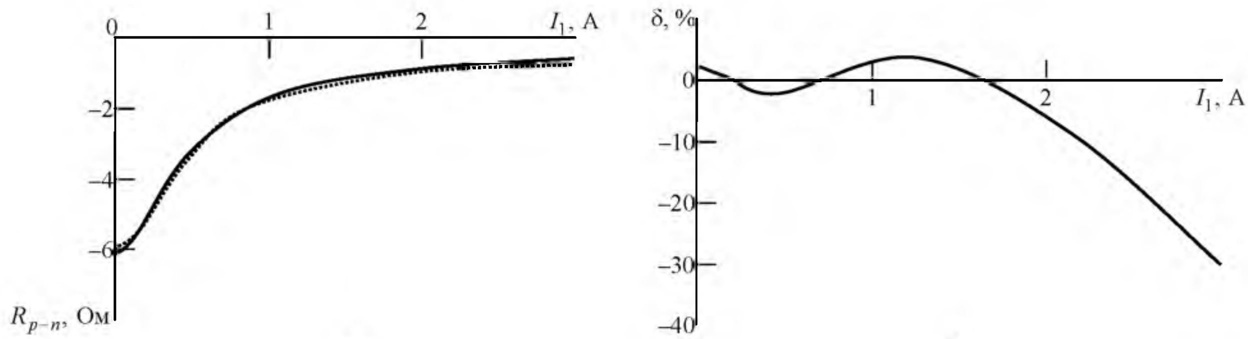
В приведенных далее результатах подразумевается использование ЛПД типа 3А707В, работающего, согласно техническим условиям, в диапазоне частот 10.4…11.7 ГГц. Кристалл диода изготовлен из арсенида галлия, в связи с чем использованы следующие электрофизические параметры этого материала: $\varepsilon = 12$; $S \approx 11.7 \cdot 10^{-9}$ м^2; $v_s = 9 \cdot 10^4$ м/с; $\theta_{\rm dr} = 0.744\pi$; $l_{\rm a} \approx 0.2W$; $W = 3.84 \cdot 10^{-6}$ м. Напряженность электрического поля при рабочем напряжении $U_{\rm dc}$ определим по выражению $E_{\rm dc} = 2U_{\rm dc}/W$. Тогда при $U_{\rm dc} = 60$ В $E_{\rm dc} = 3.125 \cdot 10^7$ В/м. Емкость пролетной области $C_{\rm dr} = 0.4$ пФ.

С учетом указанных параметров получены зависимости импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока для трех значений частоты СВЧ-тока диода $f_1 = \omega_1/(2\pi)$ (рис. 1) при токе питания 70 мА.

На рис. 2 приведены зависимости активной и реактивной частей импеданса ЛПД от частоты СВЧ-тока при токе питания диода 70 мА для нескольких значений амплитуды СВЧ-тока.

Из рис. 1, *а* и 2, *а* следует, что активная часть импеданса ЛПД существенно зависит от амплитуды СВЧ-тока и в гораздо меньшей степени – от его частоты. Таким образом, для упрощения расчетов существует возможность пренебречь частотной зависимостью активной части импеданса диода и учитывать только влияние амплитуды СВЧ-тока. Напротив, реактивная часть импеданса ЛПД существенно зависит и от амплитуды, и от частоты СВЧ-тока (рис. 1, *б* и 2, *б*), поэтому в аппроксимирующих выражениях необходимо учитывать влияние обоих параметров.

Аппроксимация выражений для расчета импеданса диода. Выражения для определения амплитудной зависимости импеданса ЛПД (8) весьма громоздки и в силу этого не удобны для практического применения. В определенном интервале изменения амплитуды колебаний генератора амплитудная зависимость импеданса может быть аппроксимирована полиномом, степень которого



а *б*

Рис. 3

зависит от диапазона изменения амплитуды СВЧ-тока. При использовании полиномиальной аппроксимации коэффициенты полинома имеют конкретное физическое значение. Однако при достаточно широком интервале изменения амплитуды колебаний генератора, в котором должны быть справедливы приближенные выражения для импеданса диода, необходимо применение дробно-рациональной аппроксимации.

В широком диапазоне значений амплитуд СВЧ-тока приближение зависимости активной части импеданса ЛПД от амплитуды этого тока можно осуществить с помощью дробно-рациональной функции

$$R_{p-n}(I_1)=\frac{c_1+c_2I_1^2}{c_3+c_4I_1^2},$$

где c_1, c_2, c_3 и c_4 – коэффициенты аппроксимации. При $I_0 = 70$ мА и $f = 10.4$ ГГц значения коэффициентов:

$$c_1=-3.669;\ c_2=-1.793;\ c_3=0.514;\ c_4=2.488.$$

На рис. 3, *а* приведены исходная зависимость активной части импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока (пунктирная линия) и ее аппроксимация (сплошная линия), полученные в указанных условиях. На рис. 3, *б* показана относительная погрешность аппроксимации зависимости активной части импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока. Из рис. 3, *б* следует, что относительная погрешность аппроксимации при амплитуде СВЧ-тока менее 2 А не превышает 8 %, а при амплитуде СВЧ-тока менее 0.5 А – не превышает 3.5 %.

Аппроксимация активной части импеданса ЛПД с учетом частотной зависимости. Для более точной аппроксимации зависимости активной части импеданса ЛПД необходимо учитывать и ее частотную зависимость. Для этого аппроксимирующее выражение необходимо изменить следующим образом:

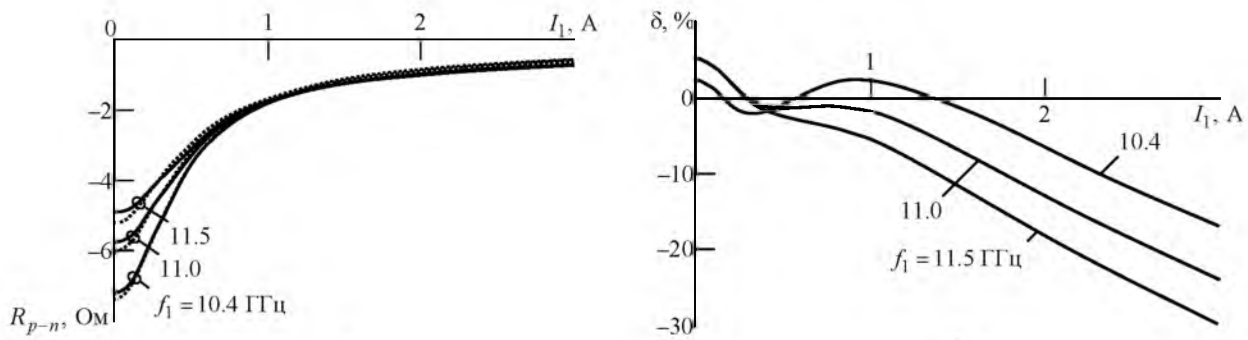
$$R_{p-n}(I_1)=\frac{c_1+c_2I_1^2}{c_3+c_4I_1^2+c_5I_1^3+(1-c_6\omega)}. \tag{9}$$

При $I_0 = 70$ мА коэффициенты аппроксимации имеют следующие значения:

$$c_1=8.633;\ c_2=12.496;\ c_3=3.0545;$$

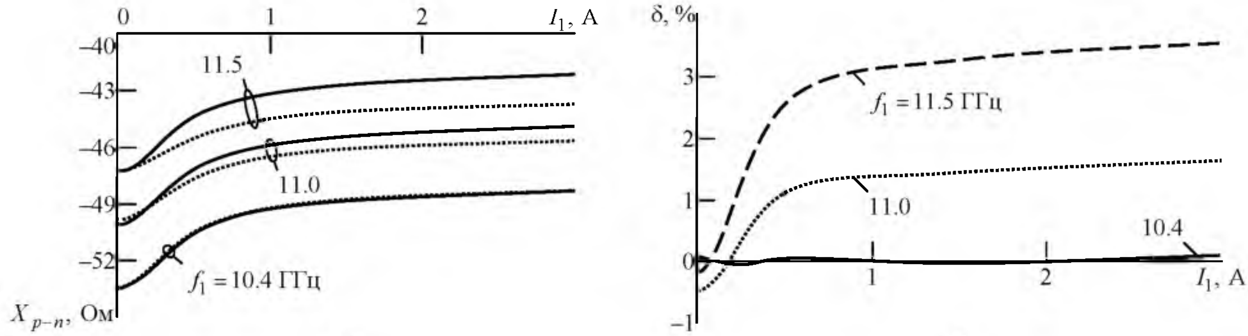
$$c_4=-6.477;\ c_5=-3.754;\ c_6=8.04\cdot10^{-11}.$$

На рис. 4, *а* приведен результат сравнения исходной зависимости (пунктирные линии) и аппроксимации (сплошные линии) активной части импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока для трех частот СВЧ-тока рабочего диапазона диода при токе питания 70 мА. На рис. 4, *б* приведена относительная погрешность аппроксимации амплитудной зависимо-



а *б*

Рис. 4



а *б*

Рис. 5

сти активной части импеданса ЛПД с учетом частотной зависимости для этих же трех частот. Из рис. 4 следует, что относительная погрешность аппроксимации амплитудной зависимости активной части импеданса ЛПД при учете частотной зависимости не превышает 18 % при амплитуде СВЧ-тока менее 2 А и 5 % при амплитуде СВЧ-тока менее 0.5 А.

Аппроксимация реактивной части импеданса. Зависимость реактивной части импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока и частоты также аппроксимирована дробно-рациональной функцией:

$$X_{p-n}(I_1,\ \omega_1) = \frac{d_1 + d_2 I_1^2 + d_3 I_1^3}{d_4 + d_5 I_1^2 + d_6 I_1^3} + d_7\omega_1 + d_8, \quad (10)$$

где d_i, $i = \overline{1,\ 8}$ – коэффициенты аппроксимации.

На рис. 5, *а* приведены исходные (пунктирные линии) и аппроксимированные (сплошные линии) зависимости реактивной части импеданса ЛПД от амплитуды СВЧ-тока для трех частот рабочего диапазона диода при $I_0 = 70$ мА. Относительная погрешность аппроксимации показана на рис. 5, *б*. Эта погрешность не превосходит нескольких процентов для $I_1 < 3$ А.

Определение параметров генератора при работе на согласованную нагрузку проведем на основании амплитудного и фазового уравнений:

$$dA/dt + [R/(2L)]A = 0; \quad (11)$$

$$d\varphi/dt + (1/2)\left(\omega_1 - \omega_0^2/\omega_1\right) + X/(2L) = 0. \quad (12)$$

Уравнение (11) определяет амплитуду стационарных автоколебаний A_0, которая, как следует из уравнения, не зависит от реактивной проводимости. Такое положение справедливо, если в пределах изменения частоты ω_1, вызванного изменением реактивной проводимости, величины R_{p-n} и $R_{\text{н}}$ не зависят от частоты. Это условие на практике выполняется в большинстве случаев, поэтому при расчетах диодных генераторов обычно пренебрегают частотной зависимостью активной части импеданса [9]. Уравнение (12) определяет частоту стационарных автоколебаний.

В стационарном режиме $dA/dt = 0$ и $d\varphi/dt = 0$. Тогда из (11) имеем: $R_{p-n}(A_0) + R_{\text{к}} + R_{\text{н}} = 0$, где $R_{\text{к}}$ – сопротивление потерь контура генератора.

Это выражение отражает баланс амплитуд.

Если потери в контуре незначительны, то можно полагать $R_{\text{н}} + R_{\text{к}} \approx R_{\text{н}}$ и

$$R_{p-n}^{*}(A_0) = -R_{\text{н}}, \quad (13)$$

где R_{p-n}^{*} – активная составляющая импеданса в стационарном режиме.

Подставив в (13) выражение для активной части импеданса диода (9), получим:

$$-R_{\text{н}} = \left(c_1 + c_2 A_0^2\right) / \left(c_3 + c_4 A_0^2\right);$$

$$-R_{\text{н}} c_3 - R_{\text{н}} c_4 A_0^2 = c_1 + c_2 A_0^2.$$

Отсюда:

$$A_0 = \sqrt{-\frac{R_{\text{н}} c_3 + c_1}{R_{\text{н}} c_4 + c_2}}.$$

Зависимость амплитуды колебаний от сопротивления нагрузки при $I_0 = 70$ мА приведена на рис. 6.

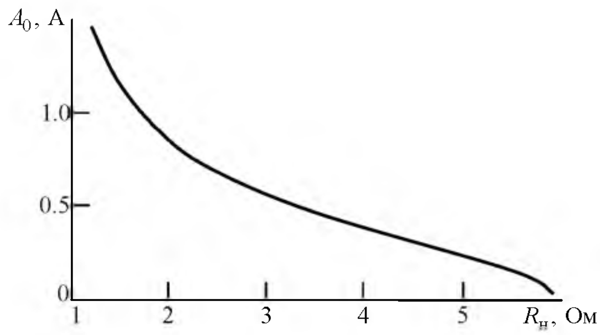


Рис. 6

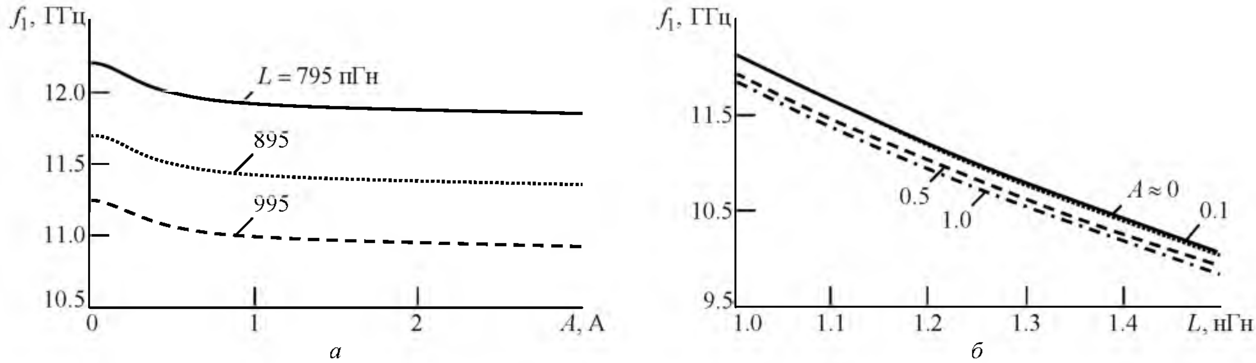


Рис. 7

Перейдем к анализу фазового уравнения (12). В условиях стационарности (10) получает вид

$$\omega_1 - \omega_0^2/\omega_1 + \frac{1}{L}\left(\frac{d_1 + d_2A^2 + d_3A^3}{d_4 + d_5A^2 + d_6A^3} + d_7\omega_1 + d_8 - X_{C_{\mathrm{dr}}}\right) = 0.$$

Введем обозначение для совокупности составляющих реактивной части импеданса диода, не зависящих от частоты колебания генератора:

$$X(A) = \frac{d_1 + d_2A^2 + d_3A^3}{d_4 + d_5A^2 + d_6A^3} + d_8.$$

После ряда преобразований получим уравнение для определения частоты колебания генератора:

$$\left(1 + \frac{d_7}{L}\right)\omega_1^2 + \left[\frac{X(A) - X_{C_{\mathrm{dr}}}}{L}\right]\omega_1 - \omega_0^2 = 0.$$

Решив полученное квадратное уравнение относительно круговой частоты ω_1 и перейдя к линейной частоте, получим выражение для частоты колебания генератора в стационарном режиме:

$$f_1 = \frac{1}{4\pi(1 + d_7/L)}\left\{-\left[X(A_0) - X_{C_{\mathrm{dr}}}\right]/L + \sqrt{\left[X(A_0) - X_{C_{\mathrm{dr}}}\right]^2/L + 4(1 + d_7/L)\omega_0^2}\right\}.$$

Зависимости частоты автоколебаний генератора от амплитуды выходного тока для некоторых значений индуктивности резонатора приведены на рис. 7, *а*. На рис. 7, *б* представлены зависимости частоты автоколебаний от индуктивности резонатора для некоторых значений амплитуды.

Полученные зависимости с учетом оценок погрешностей аппроксимаций позволяют сделать вывод о том, что предложенные в работе аппроксимации импеданса ЛПД удовлетворительны, а расчеты основных параметров генератора на ЛПД достаточно близки к соответствующим параметрам генератора, реализуемого на конкретном диоде 3А707В [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяненко А. В., Семерник И. В., Алексеев Ю. И. Экспериментальное исследование динамики развития хаотических колебаний в генераторе на лавинно-пролетном диоде в присутствии собственного отраженного сигнала // Нелинейный мир. 2014. Т. 12, № 1. С. 25–28.
2. Демьяненко А. В. Исследование шумовых параметров генератора на лавинно-пролетном диоде в режиме хаотической генерации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 5. С. 110–113.
3. Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В., Семерник И. В. Исследование ганновского генератора в детерминированном и хаотическом режимах // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 39–41.
4. Семерник И. В., Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Исследование возможности возбуждения хаотических колебаний в генераторе на лавинно-пролетном диоде путем введения неоднородности в выходную линию передачи // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 337–339.
5. Капранов М. В., Кулешов В. Н., Уткин Г. М. Теория колебаний в радиотехнике: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1984. 320 с.
6. Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В., Семерник И. В. Исследование хаотических состояний автоколебательных систем. Генератор на лавинно-пролетном диоде. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Acad. Publ. GmbH & Co. KG, 2013. 133 с.
7. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. 480 с.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 455 с.
9. Давыдова Н. С., Данюшевский А. В. Диодные генераторы и усилители СВЧ. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
10. Демьяненко А. В. Анализ работы генератора на лавинно-пролетном диоде под воздействием оптического излучения // Изв. Южного федер. ун-та. Технические науки. 2013. № 11 (148). С. 165–175.

A. V. Demyanenko, I. V. Semernick, Yu. I. Alekseev
Southern federal university (Taganrog)

IMPATT oscillator's parameters analysis under operation with a matched load

The results of self-oscillator based on the IMPATT diode equation solution under operation with a matched load are discussed. With a glance of impedance features of IMPATT diode the relationships that define amplitude and frequency of oscillations are given.

Microwave oscillator, IMPATT diode, impedance features

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2014 г.

УДК 621.382

И. В. Семерник, Ю. И. Алексеев, А. В. Демьяненко
Южный федеральный университет (Таганрог)

Исследование динамики развития хаотической генерации в детерминированной автоколебательной системе на лавинно-пролетном диоде[1]

Обсуждаются теоретические и экспериментальные результаты исследования возможности получения хаотической генерации в детерминированной системе – автогенераторе на лавинно-пролетном диоде.

Динамический хаос, СВЧ-генератор, лавинно-пролетный диод, хаотические колебания

Динамический хаос в активных СВЧ-системах представляет значительный интерес и обладает большими потенциальными возможностями в сфере прикладных исследований и разработок. Источники хаотических колебаний создаются на основе различных нелинейных элементов. Однако в диапазоне частот выше нескольких гигагерц аналогов генераторам хаотических колебаний на основе СВЧ-диодов с отрицательным сопротивлением [1]–[5] пока не существует. Устройства на основе высокочастотных транзисторов и интегральных схем способны работать в частотном диапазоне вплоть до нескольких гигагерц, но выходная мощность таких приборов, как правило, мала, а КПД не превышает несколько процентов.

Хаотическая генерация в детерминированных автоколебательных системах в СВЧ-диапазоне на основе твердотельных активных элементов с отрицательным сопротивлением открывает возможность получения шумовых источников на основе достаточно простых конструктивных решений, с одной стороны, при высоких уровнях выходной мощности – с другой.

В настоящее время признано [2]–[4], что существенно более мощные шумовые источники получаются на основе автогенераторов на лавинно-пролетных диодах (ЛПД), переведенных специальными приемами в режим динамического хаоса. Это позволяет иметь шумовые генераторы, выходная мощность которых на 3–4 порядка превышает мощность генераторов шума, полученных традиционным путем [3]–[6]. Однако разработка подобных устройств требует наличия достоверной теоретической модели генератора хаотических колебаний на ЛПД, достаточно точно отображающей процессы, происходящие в анализируемой системе.

В настоящей статье на основе предложенной модели проведен численный анализ регенеративной автоколебательной системы – генератора на ЛПД, на выходе которого присутствует неоднородность, вызывающая появление в системе собственного сигнала с некоторой фазовой задержкой [7]. На основании разработанной модели выполнен и экспериментально исследован шумовой генератор, в котором стимулирование хаотической генерации осуществляется искусственным

[1] Результаты, изложенные в статье, получены в рамках выполнения гранта № 8.2461.2014/K.