

УДК 537.86/87.530.182

## АВТОКОЛЕБАНИЯ В ЦЕПИ ПИТАНИЯ ГЕНЕРАТОРА НА ЛПД

*В. В. Синуцын, А. С. Тагер*

Предложена динамическая модель, описывающая автоколебания в цепи питания генератора на ЛПД, и приведены результаты численного расчета зависимости формы и частоты НЧ колебаний от параметра цепи питания диода. Найдена область существования режима прерывистой СВЧ генерации.

Изучению низкочастотной неустойчивости в цепи питания лавинно-пролетного диода (ЛПД), которая значительно ухудшает характеристики генератора и может привести к выгоранию диода, посвящено большое число работ, краткий обзор которых приведен в [1]. Однако результаты этих работ, основанные на анализе свойств импеданса диода и СВЧ цепи без учета цепи питания, не позволяют определить форму и частоту низкочастотных колебаний и их связь с параметрами цепи питания диода.

В данной работе предлагается динамическая модель, описывающая автоколебания в цепи питания, и приводятся результаты численного расчета. Эквивалентная схема генератора на низких частотах приведена на рис. 1.

Высокочастотные процессы в ЛПД описываются уравнениями [2]

$$\frac{\tau_b}{2} \frac{dJ_n}{dt} = J_n [\Psi(E) - 1] + I_s,$$

$$S_e \frac{dE}{dt} = I - J_n, \tag{1}$$

$$C \frac{dU}{dt} = I - \frac{\delta}{W} J_n - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t J_n(t') dt',$$

$$I + YU = 0.$$

Здесь обозначения совпадают с [2]. Если диод имеет небольшую степень перекрытия, необходимо учитывать модуляцию емкости диода  $C(U)$ . Систему уравнений (1) можно упростить, полагая  $\Psi(E) = \Psi(E_0) + \Psi'(E_0)\tilde{E} + (1/2)\Psi''(E_0)\tilde{E}^2 + \dots$  и ограничиваясь первыми тремя членами разложения. Если затем положить все переменные величины пропорциональными  $e^{j\omega t}$  и исключить из (1) токи  $J_n$ ,  $I$ , получим уравнения для постоянной и переменной составляющих напряжения

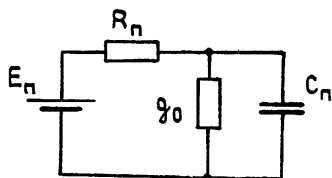


Рис. 1.

на диоде, Первое из них дает следующее выражение для низкочастотной проводимости ЛПД:

$$g_0 = R_0^{-1} + \omega C \sigma(\omega) |u|^2,$$

где  $R_0 = \tau/2C$  — изотермическое дифференциальное сопротивление области пространственного заряда диода,  $\tau$  — время пролета носителей

тока в области пространственного заряда,  $u = \tilde{U}/U_0$  — относительная величина переменной составляющей напряжения,  $U_0$  — постоянная составляющая напряжения на диоде,  $\sigma(\omega) = j[C'(U_{пр}) - 2\beta_n^2(1-s)^m \times \times \sigma_n(\omega)]$  — коэффициент, характеризующий квадратичную нелинейность диода,

$$\sigma_n(\omega) = \left\{ \frac{m}{2M(\omega)} [1 + (M(\omega) - 1)\sqrt{1-s}] + \right. \\ \left. + j\omega\tau(\sqrt{1-s} - 2) \right\} [1 + (M(\omega) - 1)\sqrt{1-s}],$$

$s = (U_{пр} - U_0)/U_{пр}$  — относительная величина автосмещения,  $U_{пр}$  — напряжение пробоя,

$$m = d \ln \Psi(E)/d \ln E,$$

$$M(\omega) = \frac{\delta}{W} + \frac{1 - \exp(-j\omega\tau)}{j\omega\tau} \left( 1 - \frac{\delta}{W} \right).$$

Уравнение для постоянной составляющей напряжения  $U_0$  имеет вид

$$\frac{E_n - U_0}{R_n} = g_0 U_0 + C_n \frac{dU_0}{dt}.$$

Вводя безразмерные величины  $s$  и  $\varepsilon_0 = (E_n - U_{пр})/U_{пр}$  и ограничиваясь в разложении  $\sigma(\omega) = \sigma_0(\omega) + s\sigma_1(\omega) + \dots$  двумя первыми слагаемыми, получим уравнение для безразмерного автосмещения  $s$ :

$$\dot{s} = -\kappa \left[ \left( \frac{\nu}{2} + \operatorname{Re} \sigma_1 |u|^2 \right) s^2 + \right. \\ \left. + \left( 1 + \frac{\nu}{2} + \operatorname{Re} (\sigma_0 - \sigma_1) |u|^2 \right) s + \varepsilon_0 - \nu - \operatorname{Re} \sigma_0 |u|^2 \right], \quad (2)$$

где

$$\kappa^{-1} = \omega R_n C_n, \quad \nu^{-1} = \omega R_0 C,$$

$$\operatorname{Re} \sigma_0 = 2\beta_n^2 \operatorname{Im} \sigma_n(\omega), \quad \operatorname{Re} \sigma_1 = -2m\beta_n^2 \operatorname{Im} \sigma_n(\omega).$$

При  $s \ll 1$   $\sigma_n(\omega) \simeq (m/2)M(\omega) - j\omega\tau M(\omega)$  и можно показать, что в интервале  $\pi/2 < \omega\tau < \pi$  разность  $\operatorname{Re}(\sigma_0 - \sigma_1) > 0$ , т. е. режим генерации с постоянной СВЧ амплитудой является неустойчивым относительно низкочастотных колебаний в цепи питания диода.

Для выявления характера неустойчивости обратимся к уравнению, описывающему СВЧ колебания. Полагая, что частота  $\Omega$  колебаний в цепи питания (частота автомодуляции) значительно меньше частоты СВЧ генерации  $\omega$ , уравнение для переменной составляющей напряжения  $u = ae^{j\omega t}$ , полученное из (1), можно записать в виде уравнения для медленно меняющейся комплексной амплитуды  $a = A(t)e^{j\varphi(t)}$ :

$$\dot{a} = a(\gamma - \alpha s - \rho |a|^2), \quad (3)$$

где  $\operatorname{Re} \gamma = -\operatorname{Re}[j\beta_n^2 M(\omega)]$  — линейный инкремент СВЧ колебаний,

$$\alpha \approx j(C'(U_{пр}) - m \beta_x^2 M(\omega)),$$

$$\rho \approx jC''(U_{пр}) + 2m(m-1)C'(U_{пр})/M(\omega).$$

Совместное решение уравнений (2) и (3) показывает, что при достаточно большой амплитуде СВЧ колебаний и положительном автосмещении ( $\text{Re } \alpha > 0$ ) даже при отсутствии в цепи питания добротных

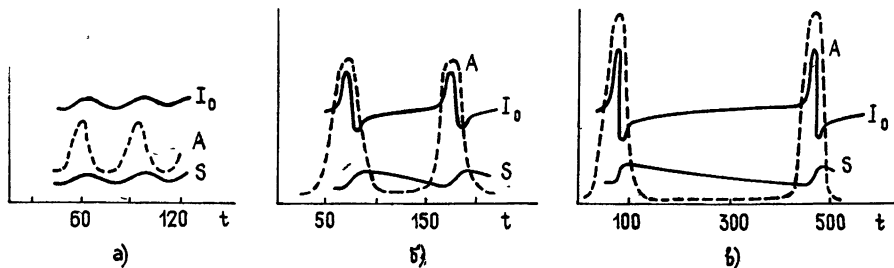


Рис. 2.

резонансов в этой цепи возбуждаются низкочастотные автоколебания, модулирующие колебания СВЧ. Существенно, что автомодуляция СВЧ колебаний возникает и в том случае, когда цепь питания является простой  $RC$ -цепью, подобной изображенной на рис. 1. Форма и частота низкочастотных колебаний напряжения на диоде зависят от постоянной времени цепи питания  $\tau_{п} = (\omega \kappa)^{-1}$ . При малых  $\tau_{п}$ , когда  $\nu/\kappa = R_{п}C_{п}/R_0C \approx 1$ , форма автомодуляционных колебаний близка к синусоидальной (рис. 2а). С увеличением  $\tau_{п}$ , когда  $\nu/\kappa \gg 1$ , колебания принимают релаксационный характер, а их частота уменьшается (рис. 2б). При больших значениях  $\tau_{п}$ , соответствующих  $\kappa = 2,5 \cdot 10^{-3}$ , может возникнуть режим прерывистой СВЧ генерации («пиковый» режим, рис. 2в).

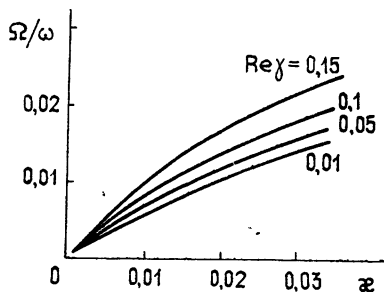


Рис. 3.

Зависимость частоты автомодуляции от параметров цепи питания показана на рис. 3. Видно, что частота несколько отличается от величины, обратной постоянной времени цепи питания  $\tau_{п}$ , причем это расхождение возрастает с уменьшением инкремента СВЧ колебаний и постоянной времени цепи питания.

Авторы благодарят Е. И. Голанта за полезные обсуждения в ходе работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brackett C. A.— Bell. Syst. Techn. J., 1973, 52, p. 271.
2. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ.— М.: Сов. радио, 1968, с. 125.

Поступила в редакцию  
4 июня 1981 г.

#### AUTOOSCILLATIONS IN THE SUPPLY CIRCUIT OF AVALANCHE TRANSIT-DIODE GENERATOR

V. V. Sinitsyn, A. S. Tager

A dynamic model is suggested which describes autooscillations in the supply circuit of the avalanche transit diode (ATD) generator. Calculation results are given for the dependence of the form and frequency of LF oscillations on the parameters of the diode supply circuit. A region has been found of the regime existence of VHF squегging oscillation.