



УДК 621.382

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

Анализ генератора на лавинно-пролетном диоде при наличии собственного отраженного от нагрузки сигнала¹

Рассмотрено влияние отраженного от нагрузки сигнала на параметры генератора на лавинно-пролетном диоде. Отмечено существенное изменение основных параметров генератора в зависимости от модуля и от фазы коэффициента отражения.

СВЧ-Генератор, лавинно-пролетный диод, импедансные свойства

Рассогласованная нагрузка – довольно частое явление в практике эксплуатации генераторов в составе любой радиотехнической аппаратуры. Как правило, генератор ставят в идеальные условия включением на его выходе однонаправленного устройства. Именно в этой связи (особенно в СВЧ-диапазоне) параллельно с СВЧ-генераторами получили широкое развитие ферритовые СВЧ-клапаны и циркуляторы, позволяющие обеспечивать генератору те условия, при которых он был отработан [1]. Если в составе устройства, в котором работает генератор, имеет место рассогласованная, но неизменная нагрузка, влияние ее может быть учтено при разработке генератора, и необходимость в вентильном устройстве отпадает (следует отметить, что постоянство параметров нагрузки, как правило, не гарантируется).

Однако в настоящее время уже определилась область радиоэлектроники, для которой варьирование параметрами нагрузки необходимо. Эта область – разработка широкодиапазонных эффективных шумовых источников на основе автогенераторов, вводимых в режим детерминированного хаоса, когда возможность изменения параметров отраженного от нагрузки сигнала создает дополнительную степень свободы, при которой генерируется шум высокого уровня [2]–[7]. Чтобы управлять состоянием детерминированного хаоса, необходимо детально изучить поведение автогенератора при рассогласованной нагрузке.

Настоящая статья посвящена изучению поведения автогенератора СВЧ на лавинно-пролетном

диоде (ЛПД) с учетом дополнительного сигнала, отраженного от неоднородности в выходной передающей линии.

При наличии в генераторе указанного сигнала имеющего определенную фазовую задержку, уравнение для генератора на ЛПД должно быть представлено в следующем виде [4], [8], [9]:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \left(\omega_0^2 - \frac{\omega_1 X}{L} \right) i = k \omega_1^2 i(t - \tau) \exp(-j\omega_1 \tau), \quad (1)$$

где i – СВЧ-ток диода;

$$R = R_{p-n}(I_1, I_0) + R_H; \quad (2)$$

L – индуктивность резонатора; ω_0 – резонансная частота колебательного контура генератора;

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

k – коэффициент отражения от нагрузки; ω_1 – текущая частота; τ – задержка отраженного сигнала, причем R_{p-n} и X_{p-n} – активная и реактивная составляющие импеданса кристалла диода, обусловленные лавинными процессами и пролетным эффектом; I_1 – амплитуда СВЧ-тока диода; I_0 – ток питания диода; $R_H = 4.3$ Ом – сопротивление нагрузки; $X_{C_{dr}} = 0.4$ пФ – емкость пролетной области диода. Решение отыскивается в виде $i_1 = A(t) \cos[\omega_1 t + \varphi(t)]$, где $A(t)$ и $\varphi(t)$ – мед-

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

ленно меняющиеся во времени функции (их изменения за период колебания генератора малы по сравнению со значениями функций).

Подставив выражения для первой и для второй производных от выходного тока по времени в (1), с учетом стационарности режима в виде $\varphi(t - \tau) = \varphi(t)$ на основании тригонометрического преобразования

$$\begin{aligned} & \cos[\omega_1(t - \tau) + \varphi(t - \tau)] = \\ & = \cos[\omega_1 t - \omega_1 \tau + \varphi(t)] = \\ & = \cos\{[\omega_1 t + \varphi(t)] - \omega_1 \tau\} = \\ & = \cos[\omega_1 t + \varphi(t)] \cos(\omega_1 \tau) + \\ & + \sin[\omega_1 t + \varphi(t)] \sin(\omega_1 \tau), \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} & -2\omega_1(dA/dt) \sin[\omega_1 t + \varphi(t)] - \\ & - A(t)(\omega_1^2 + 2\omega_1 d\varphi/dt) \cos[\omega_1 t + \varphi(t)] - \\ & - (R/L) A(t) \omega_1 \sin[\omega_1 t + \varphi(t)] + \\ & + (\omega_0^2 - \omega X/L) A(t) \cos[\omega_1 t + \varphi(t)] - \\ & - k\omega_1^2 A(t) \exp(-j\omega_1 \tau) \cos(\omega_1 \tau) \cos[\omega_1 t + \varphi(t)] - \\ & - k\omega_1^2 A(t) \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) \sin[\omega_1 t + \varphi(t)] = 0. \end{aligned}$$

Тогда при наличии на входе генератора сигнала, отраженного от неоднородности в выходной передающей линии и имеющего определенную фазовую задержку τ , имеем два укороченных уравнения:

$$dA/dt + [R/(2L)] A(t) + (1/2)k\omega_1 A(t) \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) = 0; \quad (3)$$

$$d\varphi/dt + \omega_1/2 - (1/2)\omega_0^2/\omega_1 + X/(2L) + (1/2)k\omega_1 \exp(-j\omega_1 \tau) \cos(\omega_1 \tau) = 0. \quad (4)$$

Уравнение (3) определяет амплитуду A_0 стационарных автоколебаний, уравнение (4) – их частоту. Дополнительное слагаемое, учитывающее наличие отраженного сигнала, присутствует как в первом, так и во втором уравнениях. Поэтому из (3) и (4) следует, что наличие отраженного сигнала влияет как на амплитуду стационарных колебаний, так и на частоту автоколебаний генератора.

Рассмотрим уравнение (3). С учетом стационарности режима (т. е. $dA/dt = 0$) имеем:

$$R/(2L) + (1/2)k\omega_1 \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) = 0. \quad (5)$$

Подставив в (2) выражение для активной части импеданса диода, полученное в результате

аппроксимации точных выражений для импеданса ЛПД [8] дробно-рациональной функцией

$$R_{p-n}(A) = \frac{c_1 + c_2 A^2}{c_3 + c_4 A^2},$$

где c_1, c_2, c_3 и c_4 – коэффициенты аппроксимации, а результат – в (5), получим выражение

$$\frac{c_1 + c_2 A^2}{c_3 + c_4 A^2} + R_H + k\omega_1 L \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) = 0,$$

из которого следует уравнение

$$\begin{aligned} & c_1 + c_2 A^2 + R_H c_3 + c_4 R_H A^2 + \\ & + kc_3 \omega_1 L \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) + \\ & + c_4 A^2 k \omega_1 L \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) = 0. \end{aligned}$$

Отсюда определим амплитуду стационарных автоколебаний при наличии на входе генератора отраженного задержанного сигнала:

$$A_0 = \sqrt{\frac{kc_3 \omega_1 L \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau) + c_1 + R_H c_3}{c_2 + c_4 R_H + c_4 k \omega_1 L \exp(-j\omega_1 \tau) \sin(\omega_1 \tau)}}.$$

Далее представлены результаты исследования СВЧ-генератора на ЛПД при наличии отраженного сигнала. Режим работы генератора характеризуется следующими параметрами: сопротивление нагрузки $R_H = 3$ Ом, индуктивность резонатора $L = 895$ пГн, частота автоколебаний генератора $f_1 = \omega_1/(2\pi) = 11$ ГГц, коэффициент отражения $k = 0.1$, задержка отраженного сигнала $\tau = 40$ пс и ток питания диода $I_0 = 70$ мА. На различных стадиях исследования рассматриваются зависимости амплитуды колебаний от одного из параметров при нескольких значениях другого параметра. При этом остальные параметры сохраняют постоянные значения.

На рис. 1 приведены зависимости амплитуды автоколебаний от значений времени задержки отраженного сигнала. На рис. 1, а эти зависимости представлены для нескольких значений коэффициента отражения при $R_H = 4.3$ Ом. Из данного рисунка следует, что уже при $k = 0.01$ проявляется влияние отраженного сигнала на режим работы генератора. При увеличении коэффициента отражения сигнала изменение амплитуды автоколебания генератора носит колебательный характер: имеются интервалы значений параметра τ , в которых отчетливо наблюдаются области слабого изменения амплитуды стационарных колебаний, в

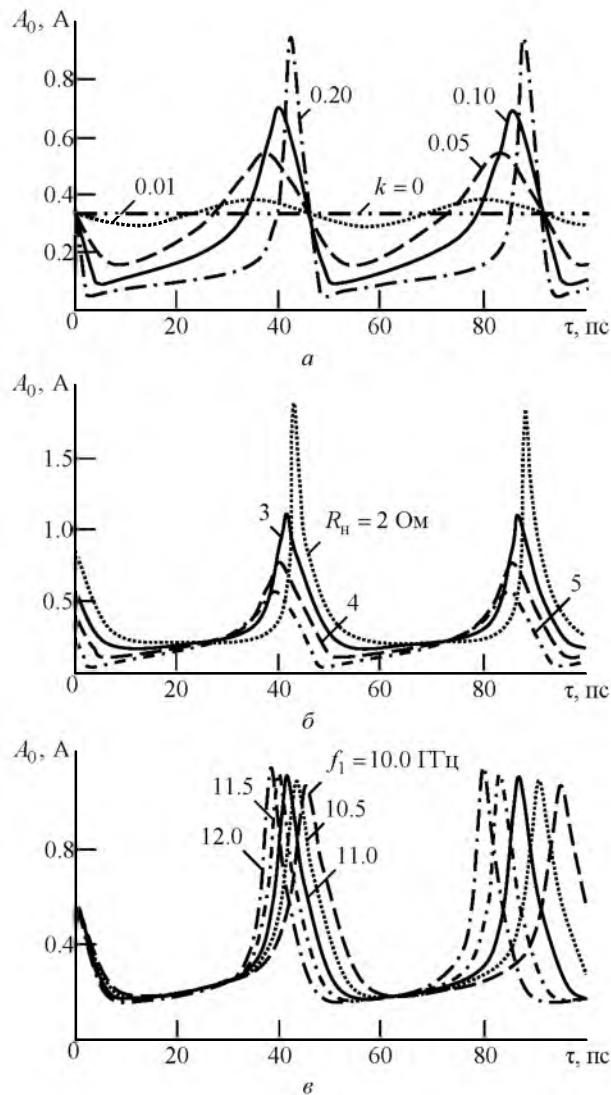


Рис. 1

то время как при других значениях этого параметра амплитуда меняется резко. С ростом коэффициента отражения области слабого изменения амплитуды расширяются, а скорость изменения амплитуды в них уменьшается. При этом области резкого изменения амплитуды автоколебания генератора сужаются с одновременным существенным возрастанием максимального значения амплитуды и скорости ее изменения. При увеличении k пики амплитуды смещаются в сторону больших задержек. Следует заметить, что расстояние между пиками амплитуды при варьировании τ соответствует половине периода автоколебаний генератора без отраженного сигнала.

Из зависимостей на рис. 1, б, построенных для различных сопротивлений нагрузки генератора следует, что с увеличением этого сопротивления максимальные значения амплитуды автоколебаний смещаются в сторону меньших задержек с одновременным существенным уменьшением макси-

мального значения амплитуды, что согласуется как с теоретическими представлениями о работе генератора на основе активного элемента с отрицательным сопротивлением, так и с результатами расчетов параметров генератора без отраженного сигнала: с увеличением сопротивления нагрузки генератора наблюдается снижение амплитуды стационарных автоколебаний.

На рис. 1, в рассматриваемые зависимости приведены для нескольких значений текущей круговой частоты f_1 . Расположение пиков A_0 при изменении τ связано с длительностью периода автоколебаний генератора: во всем диапазоне изменения частоты расстояние между соседними пиками соответствует половине периода колебаний частоты.

Сравнив результаты решения укороченных уравнений, представленные в настоящей статье, с результатами численных исследований модели генератора на ЛПД при работе на несогласованную нагрузку [2], [4], можно сделать вывод, что области многочастотной генерации и динамического хаоса расположены на интервалах значений параметра τ , в пределах которых амплитуда автоколебаний генератора A_0 меньше соответствующего значения при согласованном режиме работы. Кроме того, при значениях модуля коэффициента отражения $k > 0.05$ возникают области синхронизации автоколебаний генератора собственным отраженным сигналом при значениях τ , соответствующих положению пиков A_0 на рис. 1. При $k > 0.05$ области синхронизации автоколебаний генератора отсутствуют, однако мощности отраженного сигнала достаточно для того, чтобы существенно повлиять на динамику работы генератора на ЛПД и перевести систему в режимы многочастотной генерации и динамического хаоса.

На рис. 2 приведены зависимости амплитуды колебаний от коэффициента отражения сигнала k . В целом можно отметить, что колебательный процесс в генераторе имеет место при малых значениях коэффициента отражения, а с его возрастанием собственные колебания генератора практически полностью подавляются, что согласуется с результатами численных исследований модели генератора на ЛПД при работе на несогласованную нагрузку [2], [4].

Кривые на рис. 2, а демонстрируют различный характер зависимости амплитуды от коэффициента отражения для разных значений времени задержки отраженного сигнала τ . При задержке отраженного сигнала, составляющей не более

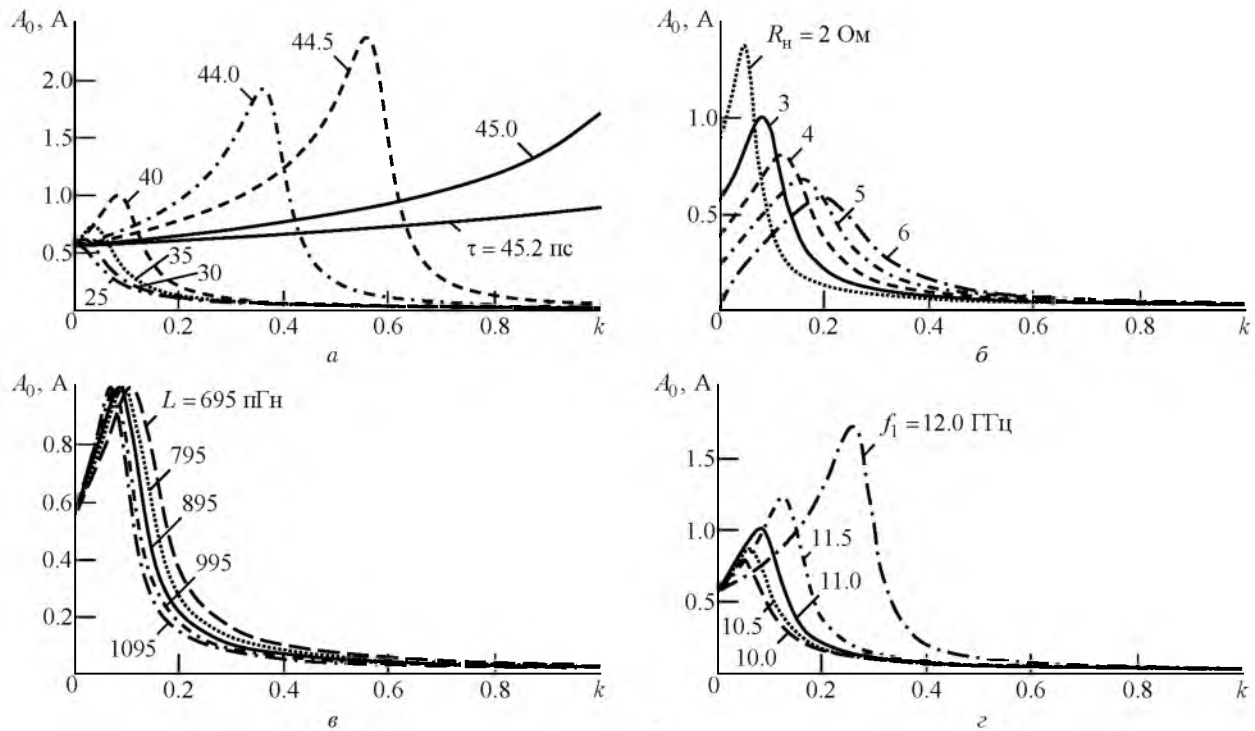


Рис. 2

четверти периода автоколебаний генератора (кривая для $\tau = 25$ пс) наблюдается монотонное уменьшение амплитуды A_0 с увеличением модуля коэффициента отражения. Однако при приближении τ к значениям, соответствующим расположению максимумов зависимости A_0 от задержки отраженного сигнала (см. рис. 1, а), наблюдается отчетливый максимум зависимости $A_0(k)$, который смещается в область больших k при приближении к значениям τ , соответствующим расположению пиков амплитуды автоколебаний генератора. Следует отметить, что при значениях τ , соответствующих максимумам зависимости $A_0(\tau)$, максимальные значения зависимостей $A_0(k)$ смещаются за пределы диапазона $0 < k < 1$, которым ограничен диапазон возможных значений модуля коэффициента отражения при пассивной нагрузке генератора.

На рис. 2, б приведены зависимости амплитуды стационарных автоколебаний при наличии отраженного сигнала для нескольких значений сопротивления нагрузки генератора. При увеличении сопротивления нагрузки максимальные значения амплитуды стационарных автоколебаний уменьшаются, что согласуется с теоретическими представлениями о работе генератора на основе активного элемента с отрицательным сопротивлением. При этом позиция пика смещается сторону больших значений коэффициента отражения. Из

анализа рис. 2, б следует, что варьированием коэффициента отражения можно настроить генератор на оптимальный режим работы, характеризующийся существенным увеличением амплитуды автоколебаний по сравнению с режимом работы генератора на ЛПД на согласованную нагрузку.

Зависимости амплитуды стационарных автоколебаний при наличии задержанного сигнала от коэффициента отражения k , полученные для набора значений индуктивности резонатора (см. рис. 2, в), показывают наличие характерных для каждого значения индуктивности значений этого коэффициента, обеспечивающих максимальную амплитуду колебаний. С ростом индуктивности данные значения снижаются.

На рис. 2, г показаны зависимости амплитуды стационарных автоколебаний при наличии отраженного сигнала от коэффициента отражения для нескольких значений частоты автоколебаний. С ростом частоты отмечаются одновременный рост коэффициента отражения, соответствующего локальному максимуму амплитуды, и увеличение этого максимума.

Результаты исследования зависимости режима автогенератора от сопротивления нагрузки при наличии отраженного сигнала представлены в виде кривых на рис. 3.

Зависимости на рис. 3, а построены для нескольких значений коэффициента отражения. Оптимальное значение сопротивления нагрузки воз-

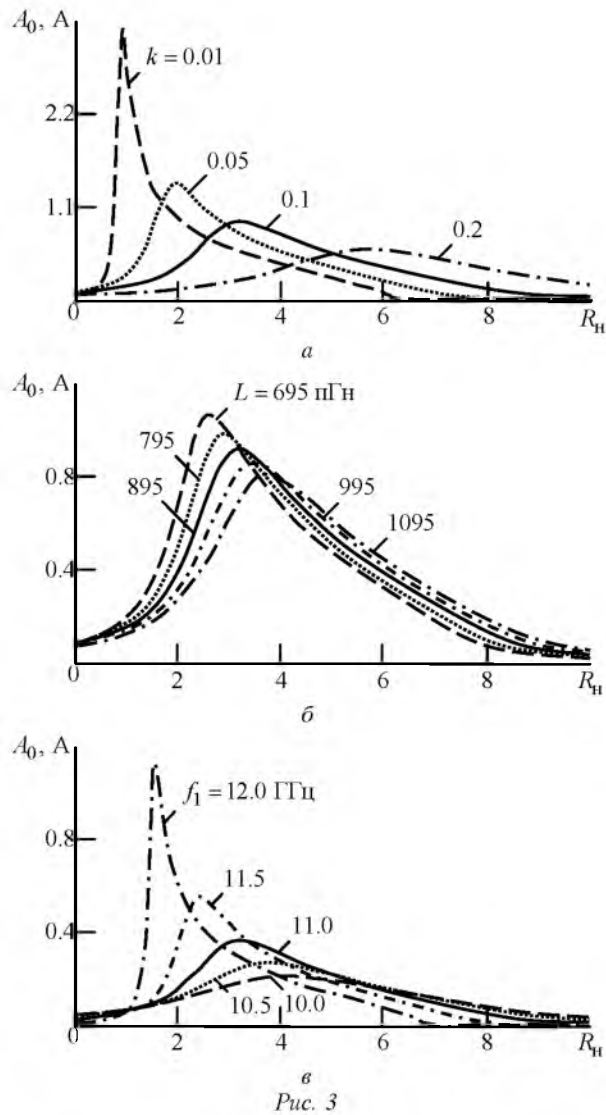


Рис. 3

растает с ростом коэффициента отражения, однако с одновременным снижением максимального значения амплитуды и уменьшением степени ее зависимости от изменения сопротивления. Из этих зависимостей следует, что изменением параметра согласования генератора с нагрузкой можно настроить генератор на оптимальный режим без точной подстройки сопротивления нагрузки.

На рис. 3, б приведены зависимости амплитуды автоколебаний от сопротивления нагрузки генератора для нескольких значений индуктивности резонатора. Изменение этой индуктивности приводит к незначительному смещению пика амплитуды автоколебаний. С ростом индуктивности наблюдается некоторое уменьшение максимального значения A_0 .

На рис. 3, в показаны зависимости амплитуды автоколебаний от сопротивления нагрузки генератора для нескольких значений частоты автоколебаний. Увеличение частоты приводит к смеще-

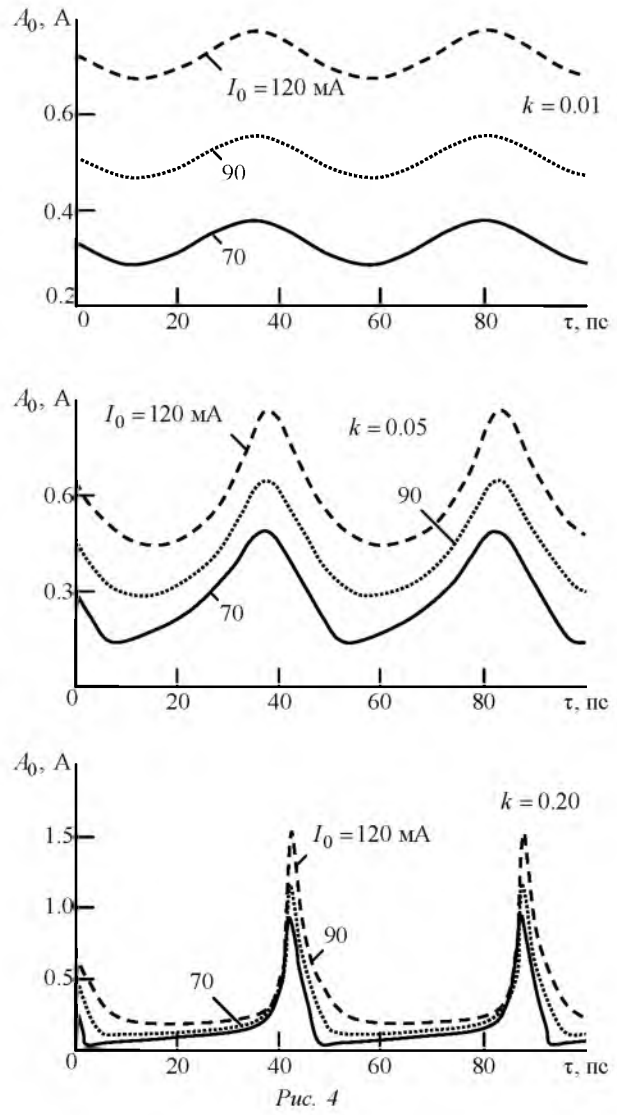


Рис. 4

нию пика амплитуды A_0 в сторону меньших значений сопротивления нагрузки, к увеличению данного пика, а также к повышению зависимости амплитуды от этого сопротивления.

Из анализа рис. 3, б и в видно, что генерации колебаний различных длин волн в пределах рабочего диапазона частот соответствуют различные значения сопротивления нагрузки, оптимальные в смысле достижения максимума амплитуды колебаний.

Проследим изменение стационарного состояния при наличии отраженного сигнала для различных токов питания ЛПД.

Результаты исследования влияния на режим автогенератора тока питания ЛПД сведены на рис. 4. Представлены зависимости амплитуды колебаний от времени задержки отраженного сигнала при различных значениях тока питания ЛПД I_0 и коэффициента отражения. Остальные параметры сохраняют постоянные значения. Как и следовало ожидать, увеличение тока питания ЛПД

приводит к увеличению амплитуды СВЧ-тока A_0 . При малых значениях коэффициента отражения амплитуда увеличивается равномерно во всем интервале изменения задержки τ , исследованном в эксперименте. Однако с увеличением значения k с ростом тока питания наблюдается увеличение в основном только максимальных значений амплитуды при сохранении и даже некотором снижении ее средних и малых значений. Наиболее заметно снижение минимальных значений проявляется при большом коэффициенте отражения и наименьшем в эксперименте тока питания ЛПД (см. зависимости для $k = 0.2$, $I_0 = 70$ мА).

Таким образом, при коэффициенте отражения, меньшем 0.05, наибольшее влияние на генерируемый сигнал оказывает ток питания диода, в то время как при работе генератора на существенно несогласованную нагрузку (значения модуля коэффициента отражения порядка 0.2) наибольшее влияние на режим работы генератора оказывает отраженный сигнал.

Для определения частоты колебаний стационарного режима генератора на ЛПД рассмотрим уравнение (4), которое после ряда преобразований с учетом условия стационарности режима примет вид

$$\omega_1^2 - \omega_0^2 + (X/L)\omega_1 + k\omega_1^2 \cos(\omega_1\tau) \exp(-j\omega_1\tau) = 0. \quad (6)$$

Подстановка в (6) выражения для реактивной части импеданса диода, полученного в результате аппроксимации точных выражений для импеданса ЛПД [8] дробно-рациональной функцией

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

(d_i , $i = \overline{1, 8}$ – коэффициенты аппроксимации) дает

$$\left[1 + k \cos(\omega_1\tau) \exp(-j\omega_1\tau)\right] \omega_1^2 + [X(A)/L] \omega_1 + (d_7/L) \omega_1^2 - \omega_0^2 = 0,$$

где

$$X(A) = \frac{d_1 + d_2 A^2 + d_3 A^3}{d_4 + d_5 A^2 + d_6 A^3} + d_8.$$

Сгруппировав члены по степеням ω_1 и проведя ряд преобразований, приходим к следующей форме этого выражения:

$$\begin{aligned} & \left[1 + k \cos(\omega_1\tau) \exp(-j\omega_1\tau) + d_7/L\right] \times \\ & \times \left[(\omega_1 - \omega_0)^2 - \omega_0^2 + 2(\omega_1 - \omega_0)\omega_0 + 2\omega_0^2\right] + \\ & + [X(A)/L](\omega_1 - \omega_0) + [X(A)/L]\omega_0 - \omega_0^2 = 0. \end{aligned}$$

Введя обозначение $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$, получим уравнение

$$\begin{aligned} & \phi(\Delta\omega) = \\ & = \left[1 + k \cos(\Delta\omega\tau + \omega_0\tau) \exp(-j\Delta\omega\tau - j\omega_0\tau) + d_7/L\right] \times \\ & \times (\Delta\omega + \omega_0)^2 + [X(A)/L]\Delta\omega + [X(A)/L]\omega_0 - \omega_0^2 = 0. \end{aligned}$$

Решим это уравнение графически, используя методику, опробованную для анализа динамики полупроводниковых лазеров при наличии отраженного луча [10]. Построим зависимость $\phi(\Delta f)$ ($\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$) (рис. 5) для набора значений коэффициента отражения при $\tau = 300$ пс. Точки пересечения кривых с осью абсцисс являются стационарными решениями укороченного уравнения, определяющего частоту стационарных автоколебаний.

При малой задержке отраженного сигнала (не более периода автоколебаний генератора) имеется только одно решение. При этом увеличение модуля коэффициента отражения приводит к уменьшению расстройки между текущей частотой и резонансной частотой колебательного контура генератора. При большей задержке отраженного сигнала (более 1.5...2 периодов частоты автоколебаний генератора, т. е. более 150...200 пс) увеличение коэффициента отражения приводит к появлению дополнительных мод, количество которых зависит от значений модуля коэффициента отражения и задержки отраженного сигнала (см. рис. 5), т. е. в данном случае можно говорить о мультистабильности динамической системы.

Таким образом, анализ динамики генератора на ЛПД при работе на несогласованную нагрузку позволяет сделать вывод о существенном влиянии параметров нагрузки (сопротивления нагрузки, модуля коэффициента отражения и его фазы) на

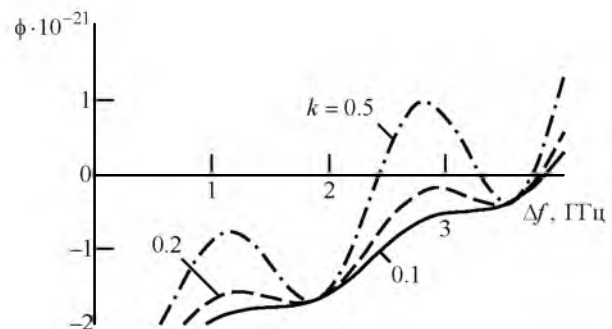


Рис. 5

режим работы генератора. При этом следует отметить, что расстройкой генератора с нагрузкой можно добиться не только перевода системы в режимы генерации многочастотных колебаний и динамического хаоса благодаря появлению дополнительной

степени свободы динамической системы, но и самосинхронизации генератора отраженным сигналом при существенном увеличении амплитуды СВЧ-колебания по сравнению с режимом работы генератора на полностью согласованную нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Методы расчета. Алгоритмы. Технологии изготовления // Ю. А. Иларионов, А. С. Раевский, С. Б. Раевский, А. Ю. Седаков. М.: Радиотехника, 2013. 752 с.
2. Семерник И. В., Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Исследование СВЧ-генератора на лавинно-пролетном диоде при работе на рассогласованную нагрузку // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 6. С. 76–80.
3. 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.
4. Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В., Семерник И. В. Исследование хаотических состояний автоколебательных систем. Генератор на лавинно-пролетном диоде. Saarbrücken, Deutschland.: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2013. 133 с.
5. 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.
6. Демьяненко А. В. Исследование шумовых параметров генератора на лавинно-пролетном диоде в режиме хаотической генерации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 5. С. 110–113.
7. 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.
8. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. 480 с.
9. Семерник И. В., Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Модель для теоретического анализа режимов работы генератора на лавинно-пролетном диоде с учетом собственного отраженного сигнала // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 329–331.
10. Uchida A. Optical communication with chaotic lasers. Applications of nonlinear dynamics and synchronization. 2012. Wiley-VCH Verlag&Co. KGaA, Germany. 664 p.

I. V. Semernick, Yu. I. Alekseev, A. V. Dem'yanenko
Southern federal university

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.