

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.64

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ
ГЕНЕРАТОРА СВЧ С ВНЕШНЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А.О. АШАМИС, Ю.А. КИСЛЫЙ, А.М. БРИГИДИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 21 декабря 2009*

Предложена новая модель автогенератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью (ВДОС), в которой в отличие от существующих аналогичных устройств цепь ВДОС выполнена в виде мостового устройства, что существенно упростило конструкцию генератора и позволило увеличить диапазон перестройки частоты.

Ключевые слова: автогенератор СВЧ, цепь внешней дополнительной обратной связи, конструкция, новая модель, квадратурный мост, комплексная проводимость, самосинхронизация, перестройка частоты, уравнения установления амплитуды и фазы, затягивание частоты, комплексная частота.

Введение

Генератор СВЧ, структурная схема которого изображена на рис. 1, впервые рассматривается в работах [1–4].

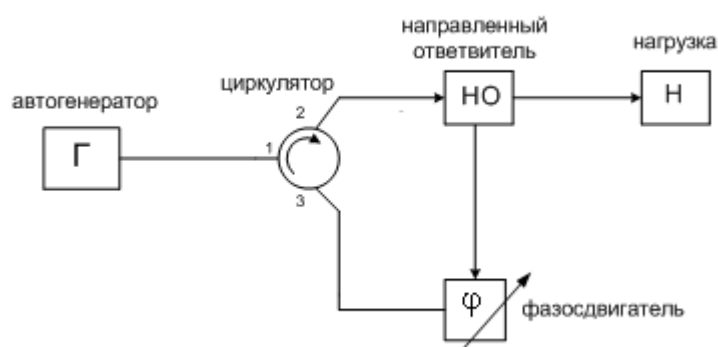


Рис. 1 Структурная схема генератора СВЧ с ВДОС

Здесь часть генерируемой мощности через циркулятор и направленный ответвитель подается на автогенератор в качестве синхросигнала. Такое устройство в одних работах [5] получило название самосинхронизированного генератора, в других [6] — генератора с автосинхронизацией. В дальнейшем, например, в монографии [7], за ним закрепился термин "генератор СВЧ с внешней дополнительной обратной связью (ВДОС)". Благодаря разделению путей прямого и обратного прохождения сигнала, предложенная схема генератора СВЧ с ВДОС предоставляет большую свободу выбора схемных элементов для получения линии импедансов требуемой формы.

Многофункциональность генератора СВЧ с ВДОС является существенным преимуществом по сравнению с обычными диодными СВЧ-генераторами, что позволяет с его помощью

решать практические задачи от электронной перестройки частоты и генерации радиосигналов с угловой модуляцией до стабилизации частоты и использования его в системах автоматической подстройки частоты.

Однако широкому использованию генератора СВЧ с ВДОС на практике, по нашему представлению, помешали следующие причины: во-первых, это устройство характеризуется конструктивной громоздкостью, дороговизной, наличием большого числа соединений, сосредоточенных в петле обратной связи; и, во-вторых, из-за небольшой величины ответвляемой мощности имеет незначительный диапазон перестройки частоты.

В настоящей работе изучается более совершенный в конструктивном отношении генератор СВЧ с ВДОС, анализируются некоторые теоретические и экспериментальные вопросы. В частности, рассматриваются уравнения установления амплитуды и фазы высокочастотного (ВЧ) напряжения в предлагаемой модели генератора СВЧ с ВДОС, производится количественное сравнение теории с экспериментом.

Теоретический анализ

Рассмотрим структурную схему устройства управления частотой автогенератора СВЧ с ВДОС, представленную на рис. 2.

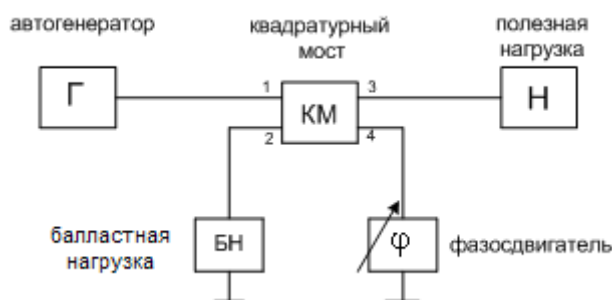


Рис. 2 Структурная схема устройства управления частотой автогенератора СВЧ

Задачей данной конструкции генератора СВЧ с ВДОС является увеличение диапазона перестройки частоты и упрощения конструкции устройства. Это достигается тем, что между автогенератором СВЧ и полезной нагрузкой включено мостовое устройство типа квадратурного моста, к противоположным плечам 2 и 4 которого соответственно подключены балластная нагрузка и электронный фазовозвращатель отражательного вида.

Принцип действия устройства управления частотой автогенератора СВЧ заключается в следующем. Мощность колебаний автогенератора СВЧ в квадратурном мосте делится поровну и подводится к полезной нагрузке к короткозамкнутому плечу моста 4. Отраженная мощность возвращается к плечам 1 и 2 квадратурного моста в равной пропорции. Одна часть расходуется в балластной нагрузке, другая в качестве синхронизирующего сигнала поступает на вход (выход) генератора.

Таким образом, благодаря режиму стоячих волн в плече 1 квадратурного моста при изменении фазы в короткозамкнутом отрезке волновода (плечо 4) происходит изменение мощности на входе (выходе) автогенератора, что приводит к дополнительному изменению частоты, так как генератор СВЧ в данном случае работает в режиме самосинхронизации.

Чтобы определить зависимость частоты от величины модуля и фазы коэффициента отражения в генераторе с ВДОС (рис. 2) необходимо найти дифференциальные укороченные амплитудные и фазовые уравнения, описывающие работу данного устройства.

Анализ работы схемы проведем на основе квазилинейного метода, суть которого состоит в медленности изменения амплитуды, т.е. относительные изменения амплитуды за период колебания малы по сравнению с единицей:

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{dt} T_0 \ll 1 \quad (1)$$

Как известно, в автономном генераторе стационарные колебания обеспечиваются балансом амплитуд и фаз напряжений и токов в колебательной системе, в результате чего на выходе генератора возникает мгновенное напряжение, описываемое выражением:

$$u = U_0 \cos(\omega_z - \varphi_0) \quad (2)$$

где U_0 , φ_0 — стационарные амплитуда и фаза колебания, соответственно; ω_z — генерируемая частота.

Простые и пригодные для инженерных расчетов соотношения, характеризующие процесс самосинхронизации, можно получить, рассматривая влияние сигнала, созданного в петле обратной связи, на автогенератор как результат воздействия волны напряжения, отраженной от нагрузки. Такая трактовка очень наглядна, поскольку явления при самосинхронизации становятся эквивалентными явлению затягивания частоты. Рассматривая процессы, происходящие в генераторе с ВДОС, изменением электронной проводимости генератора Y_a под действием сигнала, сформированного цепью обратной связи, будем пренебрегать и, кроме того, ограничимся случаем малого сигнала, поступающего на вход генератора: $U_c' \ll U_z$, где U_c' — амплитуда напряжения, сформированного цепью обратной связи и пересчитанная к колебательной системе генератора, а U_z — амплитуда напряжения, вырабатываемого генератором. Тогда в рамках принятых допущений воздействие сигнала ВДОС можно представить как результат подключения к резонаторной системе генератора проводимости, сформированной цепью ВДОС:

$$\dot{Y}_{\text{вдоос}} = \frac{Y_0(1 - K^2 + j2K \sin \psi)}{\alpha_z^2(1 + K^2 + 2K \cos \psi)}, \quad (3)$$

где $Y_0 = 1/z_0$ — волновая проводимость линии; $K = U_c'/U_z = (P_c/P_1)^{1/2}$ — модуль коэффициента отражения; ψ — фаза коэффициента отражения; α_z — коэффициент трансформации выходного устройства генератора.

На основании структурной схемы устройства (рис. 2) и приведенных рассуждений составим эквивалентную схему генератора СВЧ с ВДОС (рис. 3).

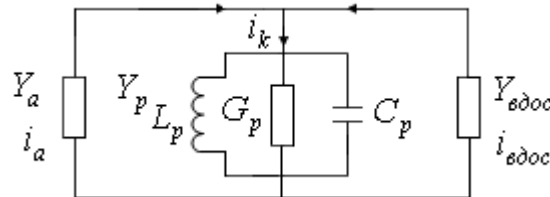


Рис. 3 Эквивалентная схема генератора с ВДОС

Так как квадратурный мост обеспечивает развязку токов i_a , $i_{\text{вдоос}}$, то их можно считать независимыми друг от друга, а направление токов принять таким, как показано на схеме. Тогда в соответствии с первым законом Кирхгофа для схемы (рис.3) справедливо равенство:

$$i_a + i_k + i_{\text{вдоос}} = 0 \quad (4)$$

или

$$U\dot{Y}_k + U\dot{Y}_a + U\dot{Y}_{\text{вдоос}} = 0,$$

что, в конечном счете, приводит к соотношению

$$\dot{Y}_k + \dot{Y}_a + \dot{Y}_{\text{вдоос}} = 0, \quad (5)$$

которое может быть записано в виде двух уравнений:

$$G_k + G_a + G_{\text{вдос}} = 0, \quad (6)$$

$$B_k + B_a + B_{\text{вдос}} = 0. \quad (7)$$

Соотношение (6) объединяет активные проводимости активного элемента генератора, петли ВДОС и резонаторной системы и отражает условие баланса мощностей в автономном генераторе. Отрицательные проводимости G_a , $G_{\text{вдос}}$ компенсируют потери в резонаторе. Уравнение (7) есть сумма реактивных проводимостей схемы, и оно является условием резонанса в системе.

Для вывода уравнений установления амплитуды и фазы высокочастотной составляющей напряжения автономного генератора, охваченного внешней дополнительной обратной связью, рассмотрим комплексные проводимости, образующие генератор СВЧ с ВДОС. Для большинства СВЧ-приборов свойственно запаздывание первой гармоники высокочастотного тока $I_{\text{вых}}$ относительно напряжения U , поэтому нелинейный активный элемент заменяем усредненной по первой гармонике тока отрицательной комплексной проводимостью в следующем виде:

$$\dot{Y}_a = \frac{I_{\text{вых1}}}{U} e^{j\theta} = \frac{I_{\text{вых1}}}{U} \cos \theta + j \frac{I_{\text{вых1}}}{U} \sin \theta, \quad (8)$$

где θ — угол запаздывания ВЧ-тока относительно напряжения U .

Комплексную проводимость резонаторной системы найдем из следующих соображений. В переходном режиме амплитуда высокочастотного напряжения U в течение короткого времени возрастает в резонаторной системе от нулевого значения до конечной величины. По достижении установленного значения амплитуда совершает либо весьма малые медленные отклонения от среднего значения из-за шума и высших гармоник, либо более существенные низкочастотные колебательные движения вследствие параметрических явлений или внешних воздействий. В этом случае для анализа колебательных процессов удобно ввести новую переменную — комплексную угловую частоту и линейную часть автогенератора (резонатор с нагрузкой) в точках подключения выходных электродов активного элемента заменить проводимостью:

$$\dot{Y}_p = G_p + \frac{1}{j\omega_k L_p} + j\omega_k C_p, \quad (9)$$

где $\omega_k = \omega + j\delta$ — комплексная частота; ω — физически реализуемая частота колебаний системы; δ — затухание резонаторной системы.

Так как в каждый момент времени амплитуда колебаний возрастает по экспоненциальному закону [6], то

$$\delta = -\frac{d(\ln U)}{dt} = -\frac{1}{U} \frac{dU}{dt}. \quad (10)$$

После подстановки значения комплексной частоты в (9) и соответствующих преобразований представим комплексную проводимость резонаторной системы в виде

$$\dot{Y}_p = G_p - 2C_p \delta + j2C_p(\omega - \omega_p), \quad (11)$$

в котором $\omega_p = 1/\sqrt{L_p C_p}$ — резонансная частота колебательной системы; G_p , C_p , L_p — эквивалентные проводимость, емкость и индуктивность резонатора, соответственно.

Искусственно вводя ω_2 в разность $(\omega - \omega_p)$, преобразуем последнюю, заменяя отклонение мгновенной частоты от генерируемой производной фазы

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega - \omega_2, \quad (12)$$

а так как частота и фаза колебаний связаны между собой интегральным и дифференциальным соотношениями, то можно осуществить в (11) замену

$$\omega - \omega_p = \frac{d\varphi}{dt} + (\omega_z - \omega_p). \quad (13)$$

В окончательном варианте соотношения для комплексной проводимости резонатора можно представить выражением:

$$\dot{Y}_p = G_p + 2C_p \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} + j2C_p \left[\frac{d\varphi}{dt} + (\omega_z - \omega_p) \right]. \quad (14)$$

Подставляя в уравнение (6) значения активных проводимостей, а в уравнение (7) — значения реактивных проводимостей из соотношений (3), (8) и (14), получим следующие дифференциальные уравнения установления амплитуды и фазы напряжения ВЧ:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{\omega_p}{2Q_H} \left[U + \frac{I_{\text{вых1}}}{G_p} \cos \theta + \frac{Y_0 Q_H}{\alpha_z^2 C_p \omega_p} U \left(\frac{1 - K^2}{1 + K^2 + 2K \cos \psi} \right) \right], \quad (15)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_p}{2Q_H} \left[\frac{(\omega_z - \omega_p)}{\omega_p} 2Q_H + \frac{I_{\text{вых1}}}{G_p U} \sin \theta + 2 \frac{Y_0 Q_H}{\alpha_z^2 C_p \omega_p} \left(\frac{K \sin \psi}{1 + K^2 + 2K \cos \psi} \right) \right], \quad (16)$$

где $Q_H = C_p \omega_p / G_p$ — нагруженная проводимость резонатора.

Принимая во внимание допущение (1) и малость амплитуды напряжения в петле ВДОС по сравнению с генерируемым сигналом, найдем из уравнения (15)

$$U = -\frac{I_{\text{вых1}}}{G_p} \cos \theta. \quad (17)$$

Поскольку в установившемся режиме фаза высокочастотного напряжения генератора СВЧ с ВДОС $\varphi = \text{const}$, то $\frac{d\varphi}{dt} = 0$. Это положение открывает возможность для отыскания из уравнения (16) значения частоты, генерируемой автогенератором с ВДОС:

$$\omega_{\text{вдос}} = \omega_p - \frac{\omega_p}{2Q_H} \text{tg} \theta - \frac{\omega_p}{Q_{\text{вн}}} \frac{K \sin \psi}{(1 + K^2 + 2K \cos \psi)}. \quad (18)$$

Здесь $Q_{\text{вн}} = \alpha_z^2 C_p \omega_p / Y_0$ — внешняя добротность резонатора.

Если принять во внимание, что в автогенераторе без цепи ВДОС генерируемая частота

$$\omega_z = \omega_p - \frac{\omega_p}{2Q_H} \text{tg} \theta, \text{ то}$$

$$f_{\text{вдос}} - f_z = -\frac{f_p}{Q_{\text{вн}}} \frac{K \sin \psi}{(1 + K^2 + 2K \cos \psi)}. \quad (19)$$

Результаты и их обсуждение

Для проверки теоретических выкладок были проведены исследования диапазона перестройки частоты диодного автогенератора с помощью фазовращателя отражательного типа, включенного в цепь ВДОС. При проведении эксперимента использовался автогенератор, выполненный на основе волноводной резонаторной системы, в которую включен диод Ганна 3А703А. При расчете принималось $f_z = 9,03$ ГГц, $f_0 = 9,2$ ГГц, $Q_{\text{вн}} = 40$, $Q_H = 30$, $K = 0,3$. Результаты

расчета и эксперимента по диапазону перестройки частоты в крайних точках различаются на 20–25%. Полученные теоретические результаты в крайних точках (максимум перестройки частоты) на 20–30 МГц больше экспериментальных данных. Во-первых, это связано с тем, что отрицательная комплексная проводимость диода Ганна, в действительности, представляет собой более сложную зависимость, чем это представлено в уравнении (8). Во-вторых, с целью упрощения выводов, в окончательном выражении (19) не было учтено действительное значение амплитуды установления высокочастотного напряжения U в уравнении (15). Однако следует подчеркнуть, что эксперимент качественно подтвердил характеристику изменения перестройки частоты, полученную теоретическим путем.

Заключение

Предложена новая конструкция автогенератора с цепью ВДОС в виде мостового устройства, отличающаяся от существующих генераторов с ВДОС простотой конструкции и большим диапазоном перестройки частоты. Получены аналитические выражения, определяющие диапазон перестройки частоты в зависимости от параметров генератора и цепи ВДОС, качественно подтвержденные экспериментальным путем. В дальнейшем, чтобы добиться количественного совпадения теоретических и экспериментальных результатов, необходимо внести поправки в соотношения, полученные в данной работе, в зависимости от конкретного типа электронного прибора и параметров цепи ВДОС.

THE RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A NEW DESIGN OF THE SHF GENERATOR WITH AN EXTERNAL ADDITIONAL FEEDBACK

A.O. ASHAMES, Y.A. KISLY, A.M. BRIGIDIN

Abstract

A new model of a microwave oscillator with an external additional feedback (EAF), which, in contrast to existing similar devices chain EAF is designed as a bridge device, which significantly simplified the design of the generator, and has increased the range of frequency tuning.

Литература

1. Ota T., Hata M. // J. Inst. Elec. Chem. Eng. Japan. 1970. Vol. 53-B. P. 487–494.
2. А.С. СССР № 375026. СВЧ генератор. 14.05.1971. / А.М. Бригидин, Г.П. Дунаев, В.И. Капыщев и др. 1973. Бюллетень изобретений. N 37.
3. Пат. США № 4162459. МКИ H03 B 9/10.
4. А.С. СССР № 446924. Устройство управления частотой магнетрона. 06.02.1973. / А.М. Бригидин, М.И. Минаев, Г.И. Ясюля. 1974. Бюллетень изобретений. N 38,
5. Бригидин А.М., Минаев М.И. // Электронная техника. 1976. Сер. 1, вып. 2.
6. Курокава К. ТИИЭР. 1973. Т. 60, № 10.
7. Минаев М.И. Генераторы СВЧ с внешней дополнительной обратной связью. Минск, 1984.