

МОДЕЛЬ АВТОДИННОГО СВЧ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Носков В. Я., Игнатков К. А.
Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. Первого президента России Б. Н. Ельцина
Екатеринбург, Россия
e-mail: noskov@oko-ek.ru

Аннотация — Представлены результаты разработки математической модели автодинного СВЧ генератора в виде системы дифференциальных уравнений, полученной для изменений амплитуды и частоты колебаний, а также отклика генератора в виде изменений сигнала автодетектирования. Модель, необходимая для определения динамических свойств СВЧ генераторов, учитывает их внутренние параметры, такие как неизохронность, неизодромность и явление частотного детектирования, а также условия быстрого движения отражающего объекта.

I. Введение

Зависимость основных характеристик и параметров СВЧ генераторов от частоты автодинного сигнала и, соответственно, скорости перемещения отражающего объекта определяет динамические свойства автодинов. Учёт динамических характеристик автодинов необходим во многих их практических приложениях, например, в аппаратуре для регистрации быстротекущих процессов в экспериментальной физике и практике полигонных баллистических испытаний [1, 2].

В ряде работ установлено, что у автодинов миллиметрового диапазона на процесс формирования автодинного отклика оказывает влияние явление «неизодромности» генераторов, состоящее в зависимости амплитуды колебаний от изменений частоты генерации [3]. Данное явление требует своего более глубокого изучения, что необходимо как для определения основных характеристик СВЧ генераторов, оптимизации их режима работы, так и для поиска их новых возможностей практического применения.

В настоящей работе с учётом отмеченных выше факторов разработана математическая модель для изучения особенностей формирования автодинных характеристик в случае быстрого движения отражающего объекта, когда необходимо учитывать инерционные свойства СВЧ-генераторов.

II. Разработка математической модели

Функциональная схема простейшего радиолокатора, у которого автодинный СВЧ-генератор АГ непосредственно связан с антенной А через трансформатор импедансов ТИ без каких-либо развязывающих элементов, представлена на рис. 1, а. Рабочее смещение на активный элемент (АЭ) генератора АГ подаётся от источника питания E_n через блок регистрации БР. Электромагнитные колебания, вырабатываемые в СВЧ-генераторе АГ излучаются через приёмо-передающую антенну А в направлении отражающего объекта ОО (или просто отражателя, или радиолокационной цели). Отражённое излучение возвращается через антенну А в АГ, вызывая в нём автодинный эффект.

Возникающие в результате этого автодинные изменения среднего значения тока или напряжения в цепи питания АЭ СВЧ-генератора преобразуются с помощью простейшей цепи автосмещения или специальной схемы блока регистрации БР в напряжение выходного сигнала u_0 (сигнал «автодетектирования»)

[4]. В некоторых конструкциях автодинных радиолокаторов полезный сигнал выделяется с помощью дополнительной схемы, преобразующей автодинные изменения амплитуды или частоты автоколебаний в напряжение выходного сигнала u_1 (сигнал «внешнего детектирования»).

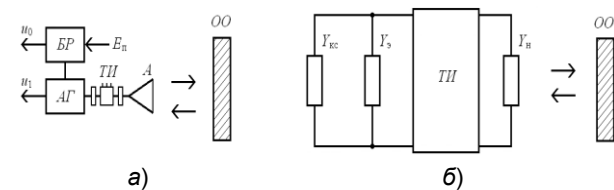


Рис. 1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного радиолокатора.

Fig. 1. Autodyne radar function chart (a) and equivalent circuit (b)

Эквивалентная схема автодинного СВЧ-генератора представлена на рис. 1, б. На этой схеме по высокой частоте колебательная система представлена проводимостью $Y_{кc} = Y_{кc}(\omega)$, зависящей от частоты ω , а $Y_n = Y_n(t)$ — отображает проводимость нагрузки генератора и её изменения, вызванные воздействием отражённого излучения, запаздывающего на время его распространения t до отражающего объекта ОО и обратно: $t = 2l/c$, где l — расстояние до объекта; c — скорость распространения электромагнитного излучения. Средняя за период колебаний «электронная» проводимость АЭ $Y_а$ в общем случае является зависимой от напряжения смещения E , амплитуды A и частоты ω колебаний: $Y_а = Y_а(E, A, \omega)$. Такая зависимость является характерной для СВЧ-генераторов, выполненных на АЭ с гистерезисом, обусловленным явлением запаздывания основных носителей в пространстве взаимодействия с полем резонатора. В дальнейшем рассмотрим случай, при котором на АЭ кроме фиксированного смещения E_0 приложено также малое модулирующее воздействие e_m , так что $E = E_0 + e_m$, где $e_m = E_m \sin \Omega_m t$, $E_m \ll E_0$. При этом регистрируемым параметром являются автодинные изменения среднего значения тока $I_а$ АЭ.

Полагаем, что колебания на АЭ являются квазигармоническими: $u(t) = \text{Re}[A e^{j(\omega_0 t + \varphi)}]$, где $A = A(t)$, $\varphi = \varphi(t)$ — медленно меняющиеся амплитуда и фаза. Тогда уравнение баланса комплексных проводимостей для схемы рис. 1, б в соответствии с общей теорией СВЧ-генераторов имеет вид:

$$Y_а(A, \omega) + Y_{кc}(\omega) + Y_{пн}(t) = 0, \quad (1)$$

где $Y_{пн} = Y_{пн} k_{ти}$ — приведённая к плоскости АЭ проводимость нагрузки; $k_{ти}$ — коэффициент передачи трансформатора импедансов ТИ.

В случае функционирования автодинной системы в условиях, когда амплитуда собственных колебаний генератора $A(t)$ значительно превышает амплитуду вернувшихся от объекта в резонатор колебаний $\Gamma A(t, t)$, так что выполняется условие $\Gamma \ll 1$, где Γ — коэффициент, характеризующий затухание излу-

ния при его распространении до объекта и обратно, выражение для $Y_{\text{пн}}(\tau)$ в (1) можно представить в виде:

$$Y_{\text{пн}}(\tau) = G_{\text{пн}} + \Delta Y_{\text{пн}}(\tau), \quad (2)$$

где $\Delta Y_{\text{пн}}(\tau) = -\Delta G_{\text{пн}}(\tau) + j\Delta B_{\text{пн}}(\tau)$ — изменяющаяся часть приведённой к плоскости АЭ комплексной проводимости нагрузки, обусловленная действием отражённой волны, $\Delta G_{\text{пн}}(\tau) = 2G_{\text{пн}}\Gamma(\tau)\cos\delta(\tau)$ и $\Delta B_{\text{пн}}(\tau) = 2G_{\text{пн}}\Gamma(\tau)\sin\delta(\tau)$ — её резистивная и реактивная составляющие; $\Gamma(\tau) = [A(t, \tau)/A(t)]$ — модуль и $\delta(\tau)$ — фаза мгновенного коэффициента отражения. Для режима стационарных колебаний автономного генератора, когда $\Gamma = 0$, $\omega = \omega_0$, $A = A_0$, из (1) следует:

$$Y_3(A_0, \omega_0) + Y_{\text{кв}}(\omega_0) + G_{\text{пн}} = 0. \quad (3)$$

В уравнении (1) представим амплитуду колебаний, как $A = A_0 + \Delta A$, где ΔA — автодинные изменения амплитуды, причём $\Delta A \ll A_0$. Явление автодетектирования автодинного отклика при фиксированном напряжении смещения $E = E_0$ состоит в автодинных изменениях среднего значения тока $I_3 = I_3(E, A, \omega)$ АЭ. Выделение этих изменений относительно точки «покоя» $I_{30} = I_3(E_0, A_0, \omega_0)$ и линейное детектирование изменений амплитуды ΔA обеспечивают возможность получения выходных сигналов $u_0 = Z_{\text{пр}}\Delta I_3$, и $u_1 = k_{\text{д}}\Delta A$, где $\Delta I_3 = I_3(E, A, \omega) - I_3(E_0, A_0, \omega_0)$; $Z_{\text{пр}}$ — импеданс преобразования изменений тока в напряжение блока регистрации БР; $k_{\text{д}}$ — коэффициент передачи детектора.

Следуя теории К. Курокавы [5], для возмущённого генератора, когда в (2) $\Gamma \neq 0$, в уравнении (1) следует ω заменить на $\omega_0(1 + \chi) - j(1/A)(dA/dt)$, где $\chi = (1/\omega_0)(d\varphi/dt) = \Delta\omega/\omega_0$ — в данном случае имеет смысл относительных автодинных изменений частоты. Учитывая медленность функций $\varphi(t)$ и $A(t)$, можно полагать, что $d\varphi/dt$ и $(1/A)(dA/dt)$ достаточно малы по сравнению с ω_0 . Тогда, допуская линейность зависимостей $G_3(E, A, \omega)$, $B_3(E, A, \omega)$ и $I_3(E, A, \omega)$ от амплитуды A и частоты ω колебаний и напряжения смещения E , выражения для $Y_{\text{кв}}$ и Y_3 в (1), а также $I_3(E, A, \omega)$ можно разложить в ряды Тейлора в окрестности стационарного режима колебаний генератора, ограничившись при этом двумя первыми членами.

После подстановки данных разложений в (1) с учётом (2), (3) получим выражение, из которого выделим вещественную и мнимую части. В результате получим систему линеаризованных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом для относительных изменений амплитуды $a_1 = \Delta A/A_0$ и частоты $\chi = \Delta\omega/\omega_0$ колебаний генератора, а также тока $i_0 = \Delta I_3/I_{30}$ АЭ и напряжения смещения $a_0 = \Delta E/E_0$ на нём:

$$\frac{\xi_{11}}{\omega_0} \frac{da_1}{dt} + \alpha_{10}a_0 + \alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi = \Gamma(\tau)\eta\cos\delta(\tau), \quad (4)$$

$$\beta_{10}a_0 + \beta_{11}a_1 + \xi_{11}\chi = -\Gamma(\tau)\eta\sin\delta(\tau), \quad (5)$$

$$\dot{i}_0 = \alpha_{00}a_0 + \alpha_{01}a_1 + \varepsilon_{01}\chi, \quad (6)$$

где $\alpha_{00} = (E_0/I_{30})(\partial I_3/\partial E)_0$ — нормированная проводимость АЭ в режиме генерации; $\alpha_{01} = (A_0/I_{30})(\partial I_3/\partial A)_0$ — безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций амплитуды колебаний; $\varepsilon_{01} = (\omega_0/I_{30})(\partial I_3/\partial \omega)_0$ — параметр «частотного детектирования», определяющий вклад изменений частоты генерации в вариации тока питания АЭ; $\alpha_{10} = (E_0/2G)(\partial G_3/\partial E)_0$ — параметр, определяющий процесс преобразования относительных изменений напряжения смещения в изменения амплитуды колебаний; $\alpha_{11} = (A_0/2G)(\partial G_3/\partial A)_0$ — приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного

цикла; $\xi_{11} = \varepsilon_{\text{кв}} + \varepsilon_3$ — параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости колебательной системы $\varepsilon_{\text{кв}} = (\omega_0/2G)(\partial G_{\text{кв}}/\partial \omega)_0$ и электронную проводимость АЭ $\varepsilon_3 = (\omega_0/2G)(\partial G_3/\partial \omega)_0$; $\beta_{10} = (E_0/2G)(\partial B_3/\partial E)_0$ — параметр, определяющий процесс преобразования изменений напряжения смещения в изменения частоты колебаний; $\beta_{11} = (A_0/2G)(\partial B_3/\partial A)_0$ — параметр, определяющий неизохронность генератора; $\xi_{11} = \xi_{\text{кв}} + \xi_3$ — параметр стабилизации частоты генератора, учитывающий частотную крутизну реактивных проводимостей колебательной системы $\xi_{\text{кв}} = (\omega_0/2G)(\partial B_{\text{кв}}/\partial \omega)_0$ и АЭ $\xi_3 = (\omega_0/2G)(\partial B_3/\partial \omega)_0$, смысл последних — нагруженная добротность одноконтурной колебательной системы $\xi_{\text{кв}} = Q_{\text{н}}$ и добротность «электронной» проводимости АЭ $\xi_3 = Q_3$ соответственно; $\eta = G_{\text{пн}}/G = Q_{\text{н}}/Q_{\text{вн}}$ — кпд колебательной системы, $Q_{\text{вн}}$ — её внешняя добротность; $G = G_{\text{кв}} + G_{\text{пн}}$ — проводимость потерь колебательной системы с учётом приведённой нагрузки. Ввиду выполнения в реальных СВЧ-генераторах неравенства $\xi_{\text{кв}} \gg \xi_3$ далее полагаем $\xi_{11} = Q_{\text{н}}$.

III. Заключение

Полученная система уравнений (4) — (6) будет использована далее для нахождения выражений для динамических автодинных и модуляционных характеристик СВЧ-генераторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с постановлением Правительства №218 от 09.04.2010г.

IV. Список литературы

- [1] Физика быстропротекающих процессов / Перевод под ред. Н. А. Златина. М.: Мир, 1971. 519 с.
- [2] Поршнев С. В. Радиолокационные методы измерений экспериментальной баллистики. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 211 с.
- [3] Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Амплитудно-частотные характеристики автодинных СВЧ генераторов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2011. № 4 (511). С. 17—31.
- [4] Носков В. Я., Смольский С. М. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов на полупроводниковых диодах СВЧ (Обзор) // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 1. С. 14—26.
- [5] Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ / Под ред. М. Хауса, Д. Моргана. М.: Мир, 1979.

AUTODYNE MICROWAVE GENERATOR MODEL FOR DETERMINATION OF ITS DYNAMIC FEATURES

Noskov V. Ya., Ignatkov K. A.

Ural Federal University (UrFU) named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
e-mail: noskov@oko-ek.ru

Abstract — The paper presents the results of mathematical model development of a microwave autodyne oscillator in the way of a differential equation system derived for changing oscillation amplitude and frequency, as well as for the response of the oscillator by way of autodetection signal changes. A model, which is required to determine the dynamic features of microwave generators, takes into account their internal parameters such as nonisochronism, nonizodromism, and the frequency detection phenomenon, as well as the conditions of rapid movement of the reflecting object.