

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОДИННОМ ГЕНЕРАТОРЕ И АНАЛИЗ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ

В.Я. Носков, К.А. Игнатков

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, noskov@oko-ek.ru

THE BASIC EQUATIONS FOR TRANSIENT PROCESSES INVESTIGATION IN THE AUTODYNE OSCILLATOR AND ITS SUSTAINABILITY ANALYSIS

V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov

Радиотехнические системы, построенные по автодинному принципу, имеют простейшую конструкцию приёмо-передающего модуля, который содержит лишь антенну и автодинный генератор, совмещающий в себе одновременно функции передатчика и приёмника. Поэтому автодины находят широкое применение в системах ближней радиолокации (СБРЛ) различного назначения, в аппаратуре контроля параметров технологических процессов и измерительной технике и в военном деле.

Применение импульсной модуляции излучения автодина значительно расширяет функциональные возможности СБРЛ и улучшает их параметры и характеристики. Первые идеи использования этого вида модуляции были изложены в заявке на изобретение автодинного радиовзрывателя английскими учёными в самом начале Второй мировой войны. В дальнейшем данный метод нашёл своё применение в различных системах обнаружения объектов. Особенно интенсивные исследования радиоимпульсных автодинов начались с появлением СВЧ генераторов на основе твердотельных активных элементов (АЭ). Однако важный для понимания физики работы радиоимпульсного автодина процесс установления автодинного отклика в генераторе был исследован в ряде работ, опубликованных лишь в последнее время [1,2]. В настоящей работе представлены основные уравнения для анализа данных процессов и рассмотрены условия устойчивости автодинного генератора.

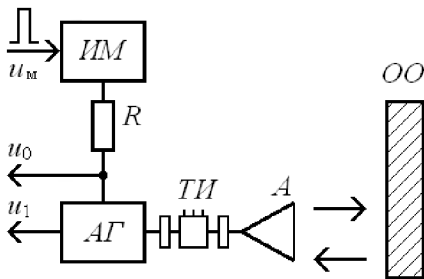


Рис. 1. Функциональная схема автодинной радиоимпульсной СБРЛ

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. При подаче запускающего импульса u_m импульсный модулятор ИМ формирует перепад напряжения, который через резистор R подаётся в цепь питания СВЧ генератора АГ, вызывая его запуск. Электромагнитные колебания, вырабатываемые в СВЧ генераторе АГ излучаются через приёмо-передающую антенну А в направлении отражающего объекта ОО. Отражённое излучение

возвращается через антенну А в АГ, вызывая в нём автодинный эффект, который состоит в изменениях амплитуды и частоты колебаний, а также среднего значения тока (или напряжения) смещения АЭ. Изменения амплитуды или частоты регистрируются с помощью амплитудных или частотных детекторов в виде выходного сигнала u_1 , а изменения тока АЭ – с помощью резистора R, с которого снимается сигнал u_0 .

Автодинный генератор с одноконтурной колебательной системой, находящейся под воздействием собственного отражённого излучения, для относительных вариаций параметров автоколебаний, таких, как амплитуда a_1 и частота χ колебаний генератора, а также фаза мгновенного коэффициента отражения $\delta(t, \tau)$, приведённого к выходу генератора, и относительная величина тока i_0 АЭ, описывается системой дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом вида [3]:

$$(Q_n / \omega_0)(da_1 / dt) + \alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi = \Gamma \eta \cos \delta(t, \tau), \tag{1}$$

$$\beta_{11}a_1 + \xi_{11}\chi = -\Gamma \eta \sin \delta(t, \tau), \tag{2}$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau), \quad (3)$$

$$i_0 = \alpha_{01} a_1 + \varepsilon_{01} \chi, \quad (4)$$

где α_{11} – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{kc} + \varepsilon_3$ – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости колебательной системы ε_{kc} и электронную проводимость АЭ ε_3 ; β_{11} – параметр, определяющий неизохронность генератора; $\xi_{11} = \xi_{kc} + \xi_3$ – параметр стабилизации частоты генератора, учитывающий частотную крутизну реактивных проводимостей колебательной системы ξ_{kc} и АЭ ξ_3 , смысл последних – нагруженная добротность одноконтурной колебательной системы $\xi_{kc} = Q_H$ и добротность «электронной» проводимости АЭ $\xi_3 = Q_3$ соответственно; α_{01} – безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций амплитуды колебаний; ε_{01} – параметр «частотного детектирования», определяющий вклад изменений частоты генерации в вариации тока АЭ; $\eta = Q_H / Q_{BH}$ – кпд колебательной системы, Q_H , Q_{BH} – её нагруженная и внешняя добротности; ω_0 – частота стационарных колебаний автономного генератора; Γ – приведённый к выходу генератора амплитудный коэффициент отражения; $\Psi(t)$, $\Psi(t, \tau)$ – фаза колебаний генератора в момент времени t и из предыстории системы: $t - \tau$. Ввиду выполнения для реальных СВЧ генераторов неравенства $\xi_{kc} \gg \xi_3$ далее полагаем $\xi_{11} = Q_H$.

Из уравнений (1) – (4) видно, что основная инерционность автодинной системы связана с изменениями амплитуды колебаний. Комбинируя выражения (1), (2) при исключении переменной χ , получим:

$$da_1 / dt + (1 / \tau_a) a_1 = \Gamma \eta (\omega_0 / Q_H) \sqrt{1 + \rho^2} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (5)$$

где τ_a – характеристическая постоянная времени (время релаксации) автодинного отклика:

$$\tau_a = Q_H / \alpha_{11} \omega_0 (1 - \gamma \rho); \quad (6)$$

$\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$ и $\rho = \varepsilon_{11} / Q_H$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности соответственно; $\psi_1 = \arctg \rho$ – угол фазового смещения автодинных изменений амплитуды.

В рамках описанных выше представлений рассмотрим важный для теории и практики автодинов вопрос об устойчивости их, как системы «генератор – отражатель». Данный вопрос рассматривался в различных работах лишь фрагментарно: или с позиций отсутствия скачков на фазовом портрете этой системы [4] или учитывались только внутренние свойства генератора, как автономной системы [5]. Для комплексного учёта отмеченных факторов при анализе асимптотической устойчивости системы (1) – (4) воспользуемся методом Ляпунова. При этом имеет смысл рассмотреть лишь уравнения (1) и (2), полагая в них $\delta(t, \tau) = \omega \tau$, где ω – текущая частота колебаний; τ – время запаздывания отражённого излучения. Тогда эти уравнения при равенстве производной в (1) нулю для установившихся значений автодинного отклика по изменению амплитуды a_{1y} и частоты ω_y примут вид:

$$\alpha_{11} a_{1y} + \varepsilon_{11} (\omega_y - \omega_0) / \omega_0 - \Gamma \eta \cos(\omega_y \tau) = 0, \quad (7)$$

$$\beta_{11} a_{1y} + Q_H (\omega_y - \omega_0) / \omega_0 + \Gamma \eta \sin(\omega_y \tau) = 0. \quad (8)$$

В систему (7), (8) относительно установившихся значений a_{1y} и ω_y введём вариации переменных: $a_1 = a_{1y} + \Delta a_1$ и $\omega = \omega_y + \Delta \nu$. После подстановки этих значений в (1), (2) и вычитания из образовавшейся системы исходных выражений (7) и (8) получим систему уравнений для вариаций:

$$(Q_H / \omega_0) [d(\Delta a_1) / dt] + \alpha_{11} \Delta a_1 + [(\varepsilon_{11} / \omega_0) + \Gamma \eta \tau \sin(\omega_y \tau)] \Delta \nu = 0, \quad (9)$$

$$\beta_{11} \Delta a_1 + [(Q_H / \omega_0) + \Gamma \eta \tau \cos(\omega_y \tau)] \Delta \nu = 0. \quad (10)$$

Из характеристического уравнения для системы (9), (10) получим следующие условия устойчивой работы автодина при любом значении набега фазы $\delta(\tau) = \omega_y \tau(t)$:

$$1) \alpha_{11} > 0; 2) (1 - \gamma\rho) > 0; 3) 1 + p_a \cos(\omega_0 \tau + \theta) > 0, \quad (11)$$

где $\theta = \arctg \gamma$ – угол фазового смещения автодинных изменений частоты.

Требование выполнения первого неравенства: $\alpha_{11} > 0$, в отношении прочности предельного цикла общеизвестно, а второе – является достаточно новым: $(1 - \gamma\rho) > 0$. Произведение входящих в это условие коэффициентов γ и ρ , как показано в [6], имеет физический смысл «петлевого усиления» в генераторе, как системы с обратной связью. В этой системе за счёт неизодромности ($\rho \neq 0$) генератора происходит преобразование вариаций частоты в изменения амплитуды колебаний, которые, далее, за счёт «обратной связи» в виде неизохронности генератора ($\gamma \neq 0$) преобразуются вновь в изменения частоты. Данное неравенство распадается на следующие два условия: если γ и ρ одного знака, то петлевое усиление должно удовлетворять неравенству $\gamma\rho < 1$, поскольку в системе действует положительная обратная связь и генератор при его несоблюдении ($\gamma\rho \geq 1$) склонен к возбуждению паразитных колебаний. В случае, когда коэффициенты γ и ρ имеют разные знаки, в системе обеспечивается безусловное выполнение условий внутренней устойчивости, так как в этом случае имеет место отрицательная обратная связь.

Первые два условия в (11) имеют отношение к собственно генератору, а третье – к автодинной системе, находящейся под воздействием собственного отражённого излучения. Физический смысл этого условия – требование к ограничению индекса фазовой модуляции колебаний генератора. Этот индекс как раз и определяется величиной параметра искажений: $p_a < 1$. В случае нарушения этого неравенства, например, из-за большой величины автодинной девиации частоты $\Delta\omega_{ма}$ вследствие высокого уровня сигнала или большой величины времени τ запаздывания отражённого излучения диапазон устойчивых величин набега фазы $\delta_y(\tau) = \omega_y \tau$ определяется неравенством: $\delta_y(\tau) < \arccos(1/p_a) - \theta$. В этом случае при изменении величины $\tau = \tau(t)$ вследствие перемещения отражателя и, соответственно, фазы $\delta(\tau) = \omega\tau(t)$ в автодинной системе наблюдается известное явление скачков выходных сигналов [4].

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

Литература

1. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ автодинного эффекта радиоимпульсного генератора // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 3. С. 64–70.
2. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 3–51.
3. Носков В.Я., Игнатков К.А. Модель автодинного СВЧ генератора для определения его динамических свойств // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конференции в 2 т. (Севастополь, 10–14 сент. 2012 г.) Севастополь: Вебер, 2012. Т. 2.
4. Воторопин С.Д., Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. О принципиальной невозможности самосинхронизации автодина излучением, отражённым от движущегося объекта // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 9. С. 53–59.
5. Смольский С.М. Оптимизация автодинного режима генераторов СВЧ с учетом условий устойчивости // Труды МЭИ. 1979. Вып.397. С. 69–73.
6. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–46.