

ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ АВТОДИНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Носков В.Я.

Уральский государственный технический университет (УПИ)

Смольский С.М.

Московский энергетический институт (ТУ)

В данном докладе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований автодинных генераторов с амплитудной модуляцией. В качестве основного объекта исследований рассмотрен модифицированный генератор на меза-планарном диоде Ганна в гибридно-интегральном исполнении «Тигель-08АМ». Получены основные соотношения для анализа автодинного отклика и определения уровня амплитудной модуляции по произвольному закону, которые далее конкретизированы на случай гармонического закона. Рассмотрены особенности автоколебаний таких автодинов в непрерывном режиме работы генератора, показаны пути улучшения характеристик и расширения функциональных возможностей автодинных систем ближней радиолокации.

Введение

В малогабаритных системах ближней радиолокации (СБРЛ), – радиовзрывателях, измерительной аппаратуре для проведения аэробаллистических испытаний, охранных устройствах, датчиках и измерителях различных параметров на транспорте, промышленности и научных исследованиях находят широкое применение автодины (автодинные генераторы) [1–6]. Данные устройства благодаря совмещению функций передатчика зондирующего электромагнитного излучения и приёмника отражённого от объекта излучения в одном каскаде – автогенераторе, – обеспечивают конструктивную простоту, компактность и относительно низкую стоимость СВЧ модуля [7]. Поэтому автодинные приёмо-передающие устройства широко используются в тех системах, в которых эти качества являются определяющими.

В большинстве применений СБРЛ имеют специфические особенности работы, связанные, в первую очередь, с тем, что их дальность действия соизмерима с геометрическими размерами отражающих объектов. При этом необходимо обеспечить селекцию цели на фоне высокого уровня отражений от пассивных помех. Кроме того, условия эксплуатации во многих применениях СБРЛ связаны с воздействием высокого уровня вибраций и шумов. Работоспособность СБРЛ в подобных условиях можно обеспечить при использовании автодинных систем с дополнительной модуляцией излучения по частоте [4,5,8] или применением импульсной модуляции [4,9]. Однако в ряде случаев для успешного решения этих задач может оказаться полезным использование амплитудной модуляции (АМ) при непрерывном излучении радиоволн [1,2].

При реализации автодинных СБРЛ с АМ наиболее широко используются простейшие схемы модуляции по цепи питания генератора. В ряде применений модулирующее воздействие вводится в цепь питания генератора от дополнительного низкочастотного генератора [10], в некоторых случаях для этого используется явление автомодуляции колебаний, которое наблюдается при введении в цепь смещения

дополнительных резонансных контуров [11–14]. Данные способы модуляции, отличающиеся наиболее простой схемой, реализуют основное преимущество автодинных систем перед гомодинными – их конструктивную простоту и малогабаритность. Эти преимущества являются особенно важными в автодинах СВЧ и КВЧ диапазонов в обычном волноводном исполнении, так как в этом случае не применяются дополнительные СВЧ элементы (например, pin -диоды). Однако внесение этих элементов модуляции в состав генераторных гибридных интегральных схем незначительно усложняет и удорожает устройства в целом, но существенно улучшает параметры и характеристики систем и расширяет их функциональные возможности. Например, применение многофункционального кристалла с тремя мезапланарными структурами, одна из которых является активной, а две другие – пассивные, позволяет за одну технологическую операцию монтажа кристалла на подложку практически без дополнительных затрат выполнить автодинный генератор на диоде Ганна с амплитудным модулятором и детектором амплитуды колебаний, необходимым для выделения автодинного сигнала [7].

Теоретический анализ явлений, наблюдаемых при экспериментальных исследованиях таких автодинов, по имеющейся у авторов информации до настоящего времени проводился недостаточно глубоко. Однако для определения потенциальных возможностей автодинных СБРЛ с АМ, создаваемых на новой элементной базе, и расширения области применения созданных автодинных модулей КВЧ диапазона в гибридно-интегральном исполнении данные исследования [7], предполагающие всестороннее изучение автодинного эффекта в таких генераторах, представляются весьма актуальными.

В настоящей работе представлены результаты исследований особенностей формирования автодинного сигнала генератора с АМ. Эти особенности, отличающие автодины от систем гомодинного типа, в условиях двойной амплитудной модуляции (автодинной и дополнительной), необходимо учитывать при создании автодинных СБРЛ с АМ диапазонов СВЧ и КВЧ.

1. Общие уравнения для теоретических исследований автодинов с АМ

В настоящем разделе на основе математической модели автодина, учитывающей амплитудно-фазовое запаздывание воздействующего на генератор собственного излучения отражённого от элементарного точечного объекта, получены общие уравнения для описания автодинного эффекта при произвольном законе модуляции амплитуды колебаний. Данные уравнения позволяют выполнять анализ как составляющих полезного автодинного отклика генератора (режимных изменений амплитуды и частоты автоколебаний и автосмещения), так и сопутствующих составляющих, обусловленных АМ.

Разработанная в [15] модель для описания автодинов, в основе которой предполагается амплитудно-фазовое запаздывание отражённого излучения, справедлива также и для случая автодинного генератора с АМ. В этой модели выражение для квазигармонических выходных АМ колебаний, излучаемых посредством приёмопередающей антенны в направлении исследуемого отражающего объекта, в общем виде

можно записать как:

$$u(t) = A(t)\cos\Psi(t) \quad (1)$$

где $A(t)$, $\Psi(t)$ – амплитуда и фаза излучаемых колебаний в текущий момент времени t .

Отраженные от объекта колебания и принятые антенной, но не вошедшие ещё в резонатор генератора, запишем в следующем виде:

$$u_c(t, \tau) = A_c(t, \tau)\cos[\Psi(t, \tau) + \varphi_0], \quad (2)$$

где $A_c(t, \tau) = \Gamma(t, \tau)A(t)$ – амплитуда зависящего генератора эдс отраженного излучения на внешней нагрузке генератора; $\Gamma(t, \tau) = \Gamma[A(t, \tau)/A(t)]$ – модуль мгновенного коэффициента отражения, приведённый к выходным «зажимам» генератора; $\Gamma = (P_c/P_{изл})^{1/2}$ – коэффициент, характеризующий степень затухания излучения при его распространении до объекта и обратно; $P_c, P_{изл}$ – мощности отражённого и излучённого колебаний на внешней нагрузке генератора соответственно; $A(t, \tau), \Psi(t, \tau)$ – амплитуда и фаза колебаний автодинного генератора в момент времени $(t - \tau)$; $\tau = 2\ell/c$ – время запаздывания отражённого излучения; ℓ – расстояние до отражателя; c – скорость распространения радиоволн; φ_0 – постоянный фазовый сдвиг, обусловленный отражающими свойствами объекта.

Воздействие на генератор отражённого излучения (2) вызывает в нём автодинный эффект, заключающийся в изменениях амплитуды и частоты колебаний, а также среднего значения тока (напряжения) активного элемента и, соответственно, автосмещения (при его наличии). Результат такого воздействия в рамках модели автодина в виде одноконтурного генератора на активном элементе с отрицательной проводимостью и цепью автосмещения первого порядка описывается системой линеаризованных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом [15]. Данную систему для относительных малосигнальных автодинных изменений автосмещения a_0 амплитуды a_1 и частоты χ автоколебаний генератора, когда $\Gamma \ll 1$, учитывающую также явление «частотного детектирования», характерное для СВЧ и КВЧ генераторов, запишем в виде:

$$\begin{bmatrix} T_0(da_0/dt) \\ T_p(da_1/dt) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \varepsilon_0 \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \varepsilon_1 \\ \beta_{10} & \beta_{11} & \xi_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_c \\ B_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $T_0 = R_0C_0$, $T_p = 2Q_n/\omega_c$; R_0, C_0 – сопротивление и ёмкость элементов цепи автосмещения; $\omega_c = (LC)^{-1/2}$ – собственная частота резонатора с эквивалентными параметрами L и C ; $\alpha_{ij}(i, j = 0, 1)$, $\varepsilon_i(i = 0, 1)$, $\beta_{ij}(i, j = 0, 1)$, ξ_1 – дифференциальные параметры активного элемента генератора [15], характеризующие взаимное влияние малых относительных автодинных изменений автосмещения $a_0 = u_0/U_0$, амплитуды $a_1 = a/A_0$ и частоты $\chi = \Delta\omega/\omega_0$ автоколебаний в окрестности стационарных колебаний автономного генератора; $u_0 = U - U_0$, $a = A - A_0$, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ абсолютные автодинные вариации автосмещения U , амплитуды A и частоты ω колебаний от соответствующих стационарных значений U_0, A_0 и ω_0 (при условии $\Gamma = 0$); $B_c = \Gamma(t, \tau)(Q_n/Q_{вн})\cos\delta(t, \tau)$,

$B_s = -\Gamma(t, \tau)(Q_n/Q_{вн})\sin\delta(t, \tau)$ – ортогональные составляющие, характеризующие воздействие на генератор отражённого излучения от элементарного отражателя; $Q_n, Q_{вн}$ – нагруженная и внешняя добротности генератора; $\delta(t, \tau)$ – мгновенная разность фаз колебаний в текущий момент времени $\Psi(t)$ и отраженного излучения $\Psi(t, \tau)$, вернувшегося от отражающего объекта через время запаздывания τ :

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau). \quad (4)$$

Для анализа динамики рассматриваемых процессов в автодине полагаем, что амплитуда излучаемых колебаний $A(t)$ в (1) – (3) независимо от способа модуляции подвергается изменениям в соответствии со следующим выражением:

$$A(t) = A_0 + \Delta A_{ам} f_m(t) = A_0[1 + m_{ам} f_m(t)], \quad (5)$$

где $m_{ам} = (\Delta A_{ам}/A_0)$ – коэффициент АМ; $\Delta A_{ам}$ – наибольшее отклонение амплитуды от среднего значения A_0 (глубина АМ колебаний генератора); $f_m(t)$ – нормированная модулирующая функция, имеющая период $T_m = 2\pi/\Omega_m$.

Наиболее просто решение системы (3) находится в квазистатическом приближении, когда процессы изменения параметров автоколебаний в генераторе при модуляции и воздействии отражённого излучения протекают достаточно медленно, так что производными в левой части уравнений (3) можно пренебречь. Для этого рассматриваемые процессы должны удовлетворять трём основным условиям. Первое условие, – для изменений амплитуды автоколебаний в автодинных генераторах, когда в (3) можно положить $da_1/dt = 0$, выполняется при удовлетворении неравенств: $\Omega_a, \Omega_m \ll \Omega_{гр}$, где Ω_a – частота автодинного сигнала; $\Omega_{гр} = \omega_0 \alpha_{11}/(2Q_n)$ – граничная частота автодинного отклика по уровню –3дБ, обусловленная инерционностью изменений амплитуды колебаний. Данные условия даже при таких параметрах, как $\alpha_{11} = 0,1$ и $Q_n = 100$ для диапазонов СВЧ и КВЧ выполняются с большим запасом.

Второе условие квазистатического анализа связано с инерционностью цепи автосмещения T_0 , которая может быть сделана пренебрежимо малой величины по отношению к процессам АМ, так что в первом уравнении системы (3) также можно положить $da_0/dt = 0$.

Третье условие квазистатического рассмотрения автодинных изменений частоты в системе (3) выполняется автоматически, поскольку производная в третьем уравнении отсутствует, так как процесс установления частоты автоколебаний в генераторах в первом приближении метода усреднения, которым были получены уравнения (3), является безынерционным [15].

Процесс преднамеренной модуляции амплитуды колебаний в автодине вызывает в соответствие с (5) относительные изменения амплитуды: $a_{ам} = m_{ам} f_m(t)$. Эти изменения $a_{ам}$ в совокупности с автодинными изменениями амплитуды a_a , обусловленными воздействием отражённого излучения, в рассматриваемом случае определяют процесс формирования автодинного отклика. Для облегчения анализа допустим также, что изменения амплитуды $A(t)$ колебаний вследствие модуляции не вызывают значительных

изменений режима генератора, так что дифференциальные параметры α_{ij} , ε_i , β_{ij} и ξ_i в системе (3) остаются в силе. С учётом сделанных замечаний, полагая общие изменения амплитуды $a_1 = a_a + a_{ам}$ и $da_0/dt = da_1/dt = 0$, согласно методу Крамера, получим квазистатическое решение системы (3) в виде:

$$a_0 = K_{0ам} m_{ам} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_0 \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0], \quad (6)$$

$$a_1 = m_{ам} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_1 \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (7)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + m_{ам} \Delta\omega_{мам} f_m(t) - \Gamma(t, \tau) M_\omega \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (8)$$

где $K_{0ам} = \alpha_{11}(\beta_{11}\varepsilon_0 - \alpha_{01}\xi_1)/\Delta$ – коэффициент преобразования изменений амплитуды в изменения автосмещения при АМ; $\omega(t) = d\Psi/dt$ – текущая частота колебаний; $\Delta\omega_{мам} = \omega_0\alpha_{11}(\alpha_{01}\beta_{10} - \alpha_{00}\beta_{11})/\Delta$ – максимальная девиация частоты при АМ, когда $m_{ам} = 1$, обусловленная неизохронностью генератора; $K_0 = Q_n(\beta_{11}\varepsilon_0 - \alpha_{01}\xi_1)/(Q_{вн}\Delta\cos\psi_0)$, $K_1 = Q_n(\alpha_{00}\xi_1 - \varepsilon_0\beta_{10})/(Q_{вн}\Delta\cos\psi_1)$ – коэффициенты автодетектирования и автодинного усиления; $M_\omega = \omega_0 Q_n(\alpha_{00}\alpha_{11} - \alpha_{01}\alpha_{10})/(Q_{вн}\Delta\cos\theta)$ – фактор автодинной девиация частоты генератора обусловленный воздействием отражённого от объекта излучения; $\psi_0 = \arctg[(\alpha_{11}\varepsilon_0 - \alpha_{01}\varepsilon_1)/(\beta_{11}\varepsilon_0 - \alpha_{01}\xi_1)]$, $\psi_1 = \arctg[(\alpha_{00}\varepsilon_1 - \alpha_{01}\varepsilon_0)/(\alpha_{00}\xi_1 - \beta_{10}\varepsilon_0)]$, $\theta = \arctg[(\alpha_{00}\beta_{11} - \alpha_{01}\beta_{10})/(\alpha_{00}\alpha_{11} - \alpha_{10}\alpha_{01})]$ – фазовые углы смещения указанных автодинных откликов a_0 , a_1 и χ ; Δ – определитель системы (3).

В полученных выражениях (6) – (8) последние слагаемые отображают полезные составляющие автодинного отклика, в которых заключена информация о скорости отражающего объекта относительно СБРЛ и расстоянии до него. Из этих же выражений видно, что при АМ автодинного генератора его отклик по изменению автосмещения (6) и амплитуды (7) содержит также составляющие $K_{0ам} m_{ам} f_m(t)$ и $m_{ам} f_m(t)$, повторяющие закон модуляции. Эти составляющие, как видно из (6) – (8), теоретически не оказывают влияния на формирование полезного сигнала, но в реальных условиях работы создают серьёзные проблемы для достижения предельных технических параметров СБРЛ с АМ, поэтому обычно называются паразитными. Дело в том, что уровень этой паразитной модуляции (ПАМ), как правило, значительно превышает полезные составляющие автодинного отклика. Это существенно сужает динамический диапазон системы, затрудняет или делает невозможным последующую обработку полезного сигнала. Кроме того, сопутствующая частотная модуляция (СЧМ) $\Delta\omega_{мам} f_m(t)$ излучения, как следует из (8), вызывает дополнительные условия формирования автодинного отклика, которые необходимо учитывать при выделении полезного сигнала в СБРЛ с АМ и его обработке.

Отметим, что автодинные отклики по изменению автосмещения a_0 и амплитуды a_1 в выражениях (6), (7) отличаются лишь углами ψ_0 , ψ_1 . Поэтому далее будем вести расчёты для обобщённого отклика a , имея в виду a_0 или a_1 с учётом угла смещения ψ . При этом составляющие ПАМ не учитываем.

Режим работы автодинных СБРЛ с АМ, которым посвящена настоящая работа, непрерывный. Поэтому с помощью полученных выражений (6) – (8) имеет смысл

рассмотреть лишь установившиеся значения автодинного отклика. Такой подход, значительно облегчающий проведение анализа, позволяет избавиться от функций запаздывающего воздействия $\Gamma(t, \tau)$ и $\delta(t, \tau)$ благодаря их разложению в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с t [15]. Тогда, с учетом (4), (5) и (7), (8) выражения для $\Gamma(t, \tau)$ и $\delta(t, \tau)$, описывающие динамику автодинных изменений коэффициента отражения с учетом одновременных изменений амплитуды и частоты излучаемых и отраженных колебаний, имеют вид:

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma[M_{\text{ам}}(t, \tau) + M_a(t, \tau)], \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) &= \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \tau\omega(t) - \frac{\tau^2}{2!} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\tau^3}{3!} \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} - \frac{\tau^4}{4!} \cdot \frac{d^3\omega(t)}{dt^3} + \dots = \\ &= \omega_0\tau + m_{\text{ам}}p_{\text{ам}}(\tau)F_{\text{ам}}(t, \tau) - p_a(t, \tau) \cdot F_a(t, \tau), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$M_{\text{ам}}(t, \tau) = 1 - \frac{m_{\text{ам}}}{1+a_1} \left[\frac{\tau^1}{1!} \cdot \frac{df_m(t)}{dt} - \frac{\tau^2}{2!} \cdot \frac{d^2f_m(t)}{dt^2} + \frac{\tau^3}{3!} \cdot \frac{d^3f_m(t)}{dt^3} - \frac{\tau^4}{4!} \cdot \frac{d^4f_m(t)}{dt^4} + \dots \right], \quad (11)$$

$$M_a(t, \tau) = \frac{a_{\text{ма}}}{1+a_1} \left[\frac{\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau}{1!} \sin[\delta(t, \tau) - \psi_1] - \frac{[\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau]^2}{2!} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] - \dots \right] - \quad (12)$$

– множители, обусловленные процессом модуляции $M_{\text{ам}}(t, \tau)$ и автодинными изменениями амплитуды колебаний генератора $M_a(t, \tau)$;

$$F_{\text{ам}}(t, \tau) = f_m(t) - \frac{\tau}{2!} \cdot \frac{df_m(t)}{dt} + \frac{\tau^2}{3!} \cdot \frac{d^2f_m(t)}{dt^2} - \frac{\tau^3}{4!} \cdot \frac{d^3f_m(t)}{dt^3} + \dots, \quad (13)$$

$$F_a(t, \tau) = \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \frac{\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau}{2!} \cos[\delta(t, \tau) + \theta] - \frac{[\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau]^2}{3!} \sin[\delta(t, \tau) + \theta] + \dots - \quad (14)$$

– множители, обусловленные процессом модуляции $F_{\text{ам}}(t, \tau)$ и автодинными изменениями частоты колебаний генератора $F_a(t, \tau)$; $\Omega_a(t, \tau) = d(\delta(t, \tau))/dt$ – мгновенная частота автодинного отклика; $a_{\text{ма}} \equiv a_{\text{ма}}(t, \tau) = \Gamma(t, \tau)K_1$ – относительная глубина автодинных изменений амплитуды колебаний; $p_{\text{ам}}(\tau) = \Delta\omega_{\text{мам}}\tau$ – максимальный индекс фазовой модуляции, обусловленный изменениями частоты вследствие АМ ($\Delta\omega_{\text{мам}}$) при $m_{\text{ам}} = 1$; $p_a(t, \tau) = \Gamma(t, \tau) \cdot M_{\omega}\tau = \Delta\omega_{\text{ма}}(t, \tau) \cdot \tau = p_a \cdot M_{\text{ам}}(t, \tau)$ – индекс фазовой модуляции сигнала, обусловленный автодинными изменениями частоты ($\Delta\omega_{\text{ма}}$), который назовём параметром искажений сигнала автодина с АМ по аналогии с известным параметром $p_a = \Gamma M_{\omega}\tau$ для автодинов без модуляции [15].

При анализе обычных «доплеровских» автодинов (без модуляции) СВЧ и КВЧ диапазонов, у которых $m_{\text{ам}} = p_{\text{ам}}(t, \tau) = 0$, достаточно использования в большинстве применений первых членов разложений в (9) и (10), полагая $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$ и $\delta(t, \tau) = \omega(t) \cdot \tau$, т.к. в этих выражениях в первом приближении мгновенная частота Ω_a автодинного отклика равна доплеровской частоте Ω_D и $\Omega_D\tau \ll 1$, поэтому высшими составляющими ряда можно пренебречь [15]. В рассматриваемом здесь случае обычно имеет место

выполнение неравенств: $m_{ам} \gg a_{ма}$, $p_{ам}(t, \tau) \gg p_a(t, \tau)$. Поэтому для корректного решения уравнений (6) – (8) требуется учёт большего числа членов, содержащихся в разложениях (9) и (10).

Как видно из (9) и (10), последние слагаемые в их правых частях, являются зависимыми от решений этих же уравнений, образуя бесконечные взаимосвязанные цепочечные зависимости. Так, например, аргументы тригонометрических функций в выражениях для множителей $M_a(t, \tau)$ и $F_a(t, \tau)$, зависят от фазы $\delta(t, \tau)$ коэффициента отражения. Данную фазу, $\delta(t, \tau)$, в свою очередь, необходимо найти из трансцендентного уравнения (10). Амплитудные множители перед этими функциями $a_{ма} \equiv a_{ма}(t, \tau)$ и $p_a(t, \tau)$ также зависят от левых частей этих уравнений: $a_{ма} = \Gamma(t, \tau)K_1$ и $p_a(t, \tau) = \Gamma(t, \tau) \cdot M_{\omega} \tau$. Точное аналитическое решение данных уравнений в общем виде не представляется возможным.

Ниже на основе полученной системы уравнений (6) – (8) и разложений (9), (10) выполнен с использованием программы «MathCAD» численный анализ особенностей поведения автодинных генераторов с АМ по гармоническому закону модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ в диапазонах СВЧ и КВЧ.

2. Расчёт и анализ сигналов автодинов с гармонической АМ

Основным достоинством синусоидальной модуляции являются простота реализации и сравнительно низкий уровень высших гармоник сигнала модуляции. В связи с этим, выделение слабых сигналов на фоне основных составляющих сигнала выполняется довольно просто. Поэтому данный закон модулирующей функции находит самое широкое использование в автодинных системах для решения ряда задач ближней радиолокации [5–9].

При анализе СБРЛ с АМ важнейшим является выяснение закономерностей формирования амплитуды полезного сигнала в зависимости от расстояния до отражающего объекта. Данную зависимость принято называть характеристикой амплитудной селекции (ХАС) цели по дальности. Поэтому основным уравнением для анализа такой характеристики является выражение (7) с учётом разложения (9). Для анализа членов разложения (9) перепишем его для гармонического закона модулирующей функции $f_m(t) = \sin \Omega_m t$ в виде:

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma[M_{ам}(t, \tau) + M_a(t, \tau)], \quad (15)$$

где

$$M_{ам}(t, \tau) = 1 - \frac{m_{ам}}{1 + a_1} \left[\Omega_m \tau \cdot \cos \Omega_m t + \frac{(\Omega_m \tau)^2}{2!} \sin \Omega_m t - \frac{(\Omega_m \tau)^3}{3!} \cos \Omega_m t - \dots \right], \quad (16)$$

$$M_a(t, \tau) = \frac{a_{ма}}{1 + a_1} \left[\frac{\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau}{1!} \sin[\delta(t, \tau) - \psi_1] - \frac{[\Omega_a(t, \tau) \cdot \tau]^2}{2!} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] - \dots \right]. \quad (17)$$

Для нормальной работы СБРЛ частота Ω_m амплитудной модуляции должна значительно отличаться от частоты $\Omega_a(t, \tau)$ автодинного сигнала. При таких условиях

спектр сигнала и спектральные составляющие, обусловленные процессом АМ, не перекрываются, что упрощает задачу частотной селекции полезных составляющих спектра автодинного сигнала. Наибольший практический интерес представляет рассмотреть случай, когда $\Omega_m \gg \Omega_a(t, \tau)$. Кроме того, реальное соотношение $m_{ам}$ и $a_{ма}$ такого, что обычно $m_{ам} \gg a_{ма}$. Поэтому для большинства применений выражение (15) можно значительно упростить, исключив из дальнейшего анализа второе слагаемое и выполнив его нормировку:

$$\Gamma(t_n, \tau_n) = \Gamma M_{ам}(t_n, \tau_n), \quad (18)$$

$$\text{где } M_{ам}(t_n, \tau_n) = 1 - \frac{m_{ам}}{1 + m_{ам} \sin(2\pi k t_n)} \left[2\pi \tau_n \cos(2\pi k t_n) + \frac{(2\pi \tau_n)^2}{2!} \sin(2\pi k t_n) - \dots \right]; \quad k = \Omega_m / \Omega_D;$$

$$t_n = \omega_0 \tau / 2\pi; \quad \tau_n = \tau / T_m.$$

Из (18) видно, что ХАС является периодической функцией времени запаздывания τ_n и, соответственно, расстояния ℓ до отражателя, определяемыми периодом модулирующей функции $f_m(t)$. Поэтому далее ограничимся анализом только её основной составляющей, заключённой в интервале $0 < \tau_n < 1$. Кроме того, для облегчения анализа полагаем, что k – представляет собой натуральный ряд чисел, причём $k \gg 1$.

Если условия работы СБРЛ таковы, что необходимо рассматривать ХАС только вблизи СБРЛ (начальный участок ХАС), где выполняется неравенство $\tau_n \ll 1$, то выражение (18) ещё более упрощается и имеет вид:

$$\Gamma(t_n, \tau_n) = \Gamma \left\{ 1 - \frac{m_{ам} \tau_n \cdot \cos(2\pi k t_n)}{1 + m_{ам} \sin(2\pi k t_n)} \right\}. \quad (19)$$

Из полученного выражения (18) видно, что с увеличением расстояния до отражающего объекта, где применение выражения (19) становится неприемлемым, число требуемых членов ряда быстро растёт, что значительно усложняет анализ. Так, например, при выполнении условия $\tau_n \leq 1$, которое означает, что время запаздывания τ отражённого излучения должно составлять величину не более трети полупериода модулирующей функции: $\tau < T_m/2\pi$, необходимое число первых членов ряда в выражении (18) должно быть не менее пяти. Для корректного описания ХАС на всём её интервале $0 < \tau_n < 1$, как показали расчёты, требуется увеличить число членов этого ряда до 20...25.

На **рис. 1** приведены результаты таких расчётов ХАС как нормированной функции двух переменных: коэффициента модуляции $m_{ам}$ (ось «модуляции») и нормированного времени запаздывания отражённого излучения τ_n («временная» ось). По вертикали на этих ХАС отложены относительные уровни «доплеровской» составляющей автодинного отклика (на «нулевой» гармонике) $a_n(0)$ (**рис. 1, а**), первой $a_n(1)$ (**б**), второй $a_n(2)$ (**в**) и третьей $a_n(3)$ (**г**) гармоник нормированного полезного сигнала $a_n = a_1 / \Gamma K_1$ (без учёта ПАМ) при разложении (7) с учётом (18) в гармонический ряд Фурье по периоду модулирующей функции. Для этих же характеристик на **рис. 2** и **3** приведены семейства графиков их сечений при $m_{ам} = 0,8$ (см. **рис. 2, а**) и $\tau_n = 0,5$ (см. **рис. 2, б**), а также нормированные относительно частоты Ω_m спектрограммы автодинного отклика $a_n(\Omega_n)$

от неподвижного отражателя при $\tau_n = 0,5$ и различных значениях коэффициента $m_{ам}$ (см. **рис. 3, а, б**) (здесь и далее $\Omega_n = \Omega/\Omega_m$). Фазовые характеристики сигналов на гармониках при различных величинах $m_{ам}$ показаны на графиках **рис. 4**.

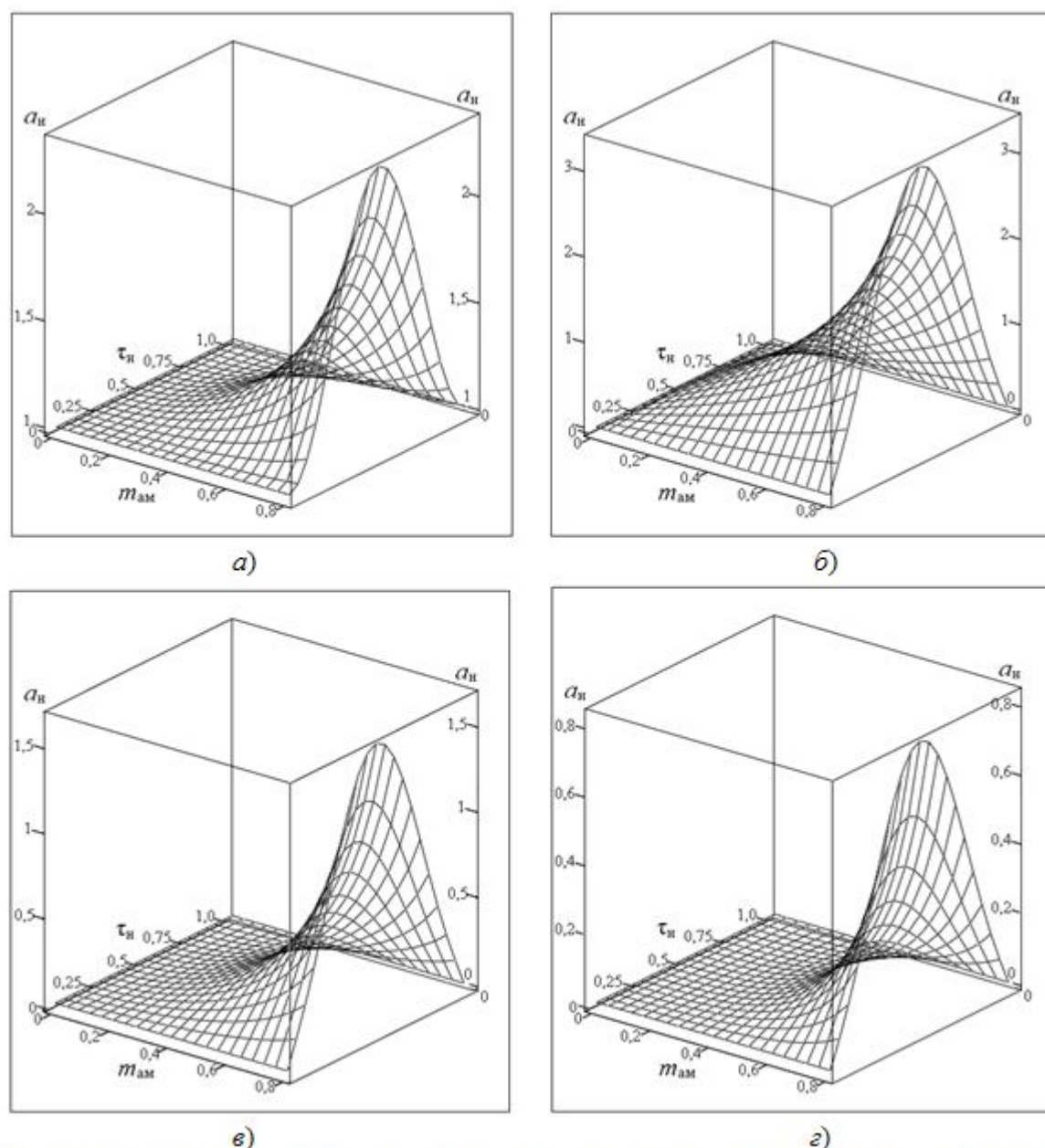


Рис. 1. Характеристики амплитудной селекции для доплеровской огибающей автодинного сигнала (нулевая гармоника (а), первой (б), второй (в) и третьей (г) гармоник частоты модуляции).

Из полученных характеристик и спектрограмм **рис. 1 – 3** видно, что максимум автодинного отклика соответствует середине зоны селекции, которая равна половине длины модулирующей волны $\ell_{cp} = T_m c/4$; амплитуда отклика на всех гармониках частоты модуляции и на «нулевой» гармонике, а также спектральный состав высших гармоник частоты модуляции значительно возрастают с приближением коэффициента $m_{ам}$ к единице. Такой характер поведения автодинного отклика в середине ХАС объясняется регенеративным процессом в петле обратной связи «генератор – отражающий объект – генератор», когда процесс модуляции амплитуды колебаний и воздействие отражённого

излучения находятся в фазе.

Подобного рода явления (регенерации) наблюдаются, например, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [16]. В этих измерителях выделенное

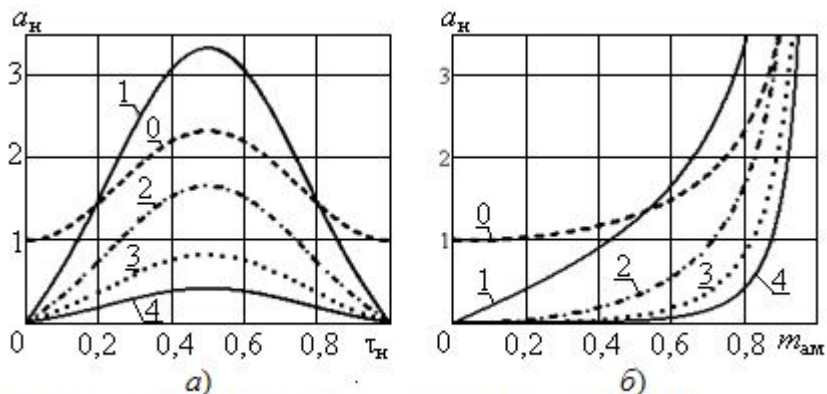


Рис. 2. Сечения ХАС при $m_{ам} = 0,8$ (а) и $\tau_н = 0,5$ (б).

приёмником СБРЛ напряжение модуляции отражённого сигнала после усиления снова подаётся в необходимой полярности на модулятор передатчика. Подбором параметров элементов замкнутого контура (усиления и сдвига фазы), в который входят отражающий объект и

среда распространения, можно добиться режима генерации на некоторой частоте, которая зависит от времени задержки отражённого излучения.

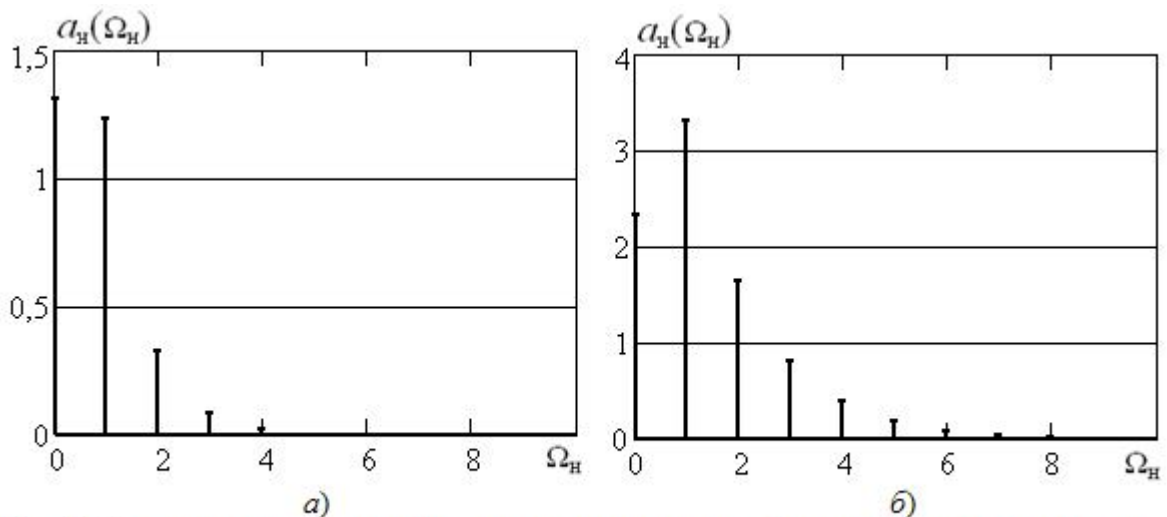


Рис. 3. Спектрограммы автодинного отклика от неподвижного отражателя при $\tau_н = 0,5$ и значениях коэффициентов АМ: а) $m_{ам} = 0,5$; б) $m_{ам} = 0,8$.

Влиянием вида ХАС (см. рис. 1, 2) объясняется также ход зависимости амплитуды автодинного отклика от расстояния до отражателя, полученной экспериментально в работе [14] при исследовании автомодулированного режима генератора на диоде Ганна. Данный режим реализуется при включении в цепь питания генератора низкочастотного колебательного контура с определённой добротностью. В зоне низкочастотной генерации с «мягким» характером возбуждения наблюдается слабая амплитудная модуляция СВЧ колебаний. Выходной сигнал в этом случае получался в результате детектирования амплитуды низкочастотных колебаний на контуре. Автодин на диоде Ганна, работающий в этом режиме, обладает повышенной чувствительностью с увеличением расстояния до отражателя.

Импульсный режим излучения автодинного генератора является крайним проявлением стопроцентной АМ [9]. В этом режиме в зоне перекрытия отражённых и формируемых радиоимпульсов вследствие явления сверхрегенерации наблюдается

значительное усиление входного сигнала [12]. Данный факт также является косвенным подтверждением хода полученных зависимостей ХАС.

Как показали расчеты, фаза доплеровского сигнала (на «нулевой» гармонике) в пределах ХАС не изменяется. В то время как на чётных гармониках фазовый сдвиг сигналов в пределах ХАС изменяется монотонно от $\pi/2$ до $-\pi/2$ (см. кривые 2 на графиках **рис. 4**), а на нечётных гармониках (см. кривые 1 на графиках **рис. 4**) в середине ХАС наблюдается скачок фазы со значения $-\pi/2$ на величину $\pi/2$. Как видно из графиков **рис. 4**, данный скачок на величину угла π происходит при $\tau_n = 0,5$. Следует отметить, что при $m_{ам} < 0,5$ эти зависимости в первом случае имеют практически линейный характер на всём протяжении ХАС, а во втором – их можно аппроксимировать ломаными прямыми.

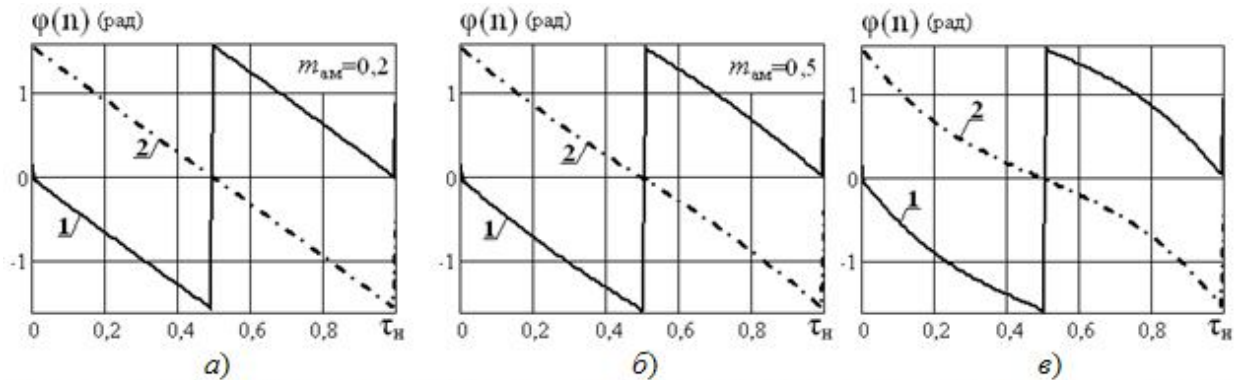


Рис. 4. Фазовые характеристики автодинного отклика на нечётных (1) и чётных (2) гармониках частоты АМ, рассчитанные для $\tau_n = 0,5$ при: $m_{ам} = 0,2$ (а); $m_{ам} = 0,5$ (б); $m_{ам} = 0,8$ (в).

Из результатов расчётов ХАС видно, что при гармонической АМ наиболее выгодно использование больших значений коэффициента АМ, величина которого приближается к единице. При этом появляется возможность выделения сигналов на высших гармониках частоты модуляции. При величине $m_{ам} < 0,5$ применение высших гармоник является энергетически не выгодным, так как их уровень резко падает. Выявленные особенности поведения амплитудно-фазовых характеристик сигналов могут использоваться в устройствах обработки сигналов СБРЛ с АМ.

Рассмотрим теперь выражение для фазы коэффициента отражения $\delta(t, \tau)$. С учётом закона модулирующей функции $f_m(t) = \sin \Omega_m t$ выражение (10) для фазы $\delta(t, \tau)$ после нормировки примет вид:

$$\delta(t_n, \tau_n) = 2\pi t_n + m_{ам} p_{ам}(\tau_n) \cdot F_{ам}(t_n, \tau_n) - p_a(t_n, \tau_n) \cdot F_a(t_n, \tau_n), \quad (20)$$

где

$$F_{ам}(t_n, \tau_n) = \sin(2\pi k t_n) - \frac{2\pi \tau_n}{2!} \cos(2\pi k t_n) - \frac{(2\pi \tau_n)^2}{3!} \sin(2\pi k t_n) + \frac{(2\pi \tau_n)^3}{4!} \cos(2\pi k t_n) + \dots; \quad (21)$$

$$F_a(t_n, \tau_n) = \sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta] - \frac{\Omega_{на} \cdot 2\pi \tau_n}{k \cdot 2!} \cos[\delta(t_n, \tau_n) + \theta] - \frac{[\Omega_{на} \cdot 2\pi \tau_n]^2}{k^2 \cdot 3!} \sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta] + \dots; \quad (22)$$

$\Omega_{на} \equiv \Omega_{на}(t_n, \tau_n) = \Omega_a(t_n, \tau_n) / \Omega_D$ – нормированная относительно частоты Доплера мгновенная частота автодинного отклика.

Решение вопроса о числе используемых членов рядов в (20) – (22) в значительной степени зависит от величины индексов $p_{ам}(\tau_n)$ и $p_a(t_n, \tau_n)$. Если изменения частоты при

АМ $\Delta\omega_{\text{ма}}$ и воздействию отражённого излучения $\Delta\omega_{\text{ма}}$ настолько малы, что $p_{\text{ам}}(\tau_{\text{н}}) \ll 1$ и $p_{\text{а}}(t_{\text{н}}, \tau_{\text{н}}) \ll 1$, то выражение для фазы коэффициента отражения имеет простейший вид: $\delta(t_{\text{н}}, \tau_{\text{н}}) = 2\pi t_{\text{н}}$. Такое условие в автодинных генераторах СВЧ и КВЧ диапазонов может выполняться только в «жёстко» стабилизированных генераторах, например, при условии его внешней синхронизации [17,18].

Для данного случая, когда фаза $\delta(t_{\text{н}}, \tau_{\text{н}})$ изменяется линейно: $\delta(t_{\text{н}}, \tau_{\text{н}}) = 2\pi t_{\text{н}}$, на **рис. 5** представлены результаты расчёта нормированных временных $a_{\text{н}}(t_{\text{н}}, \tau_{\text{н}})$ и спектральных диаграмм $a_{\text{н}}(\Omega_{\text{н}})$ выходных сигналов автодина с АМ при соотношении частот $k = 10$, значении коэффициента модуляции $m_{\text{ам}} = 0,5$ и различных величинах относительного времени запаздывания $\tau_{\text{н}}$. Из сравнения полученных спектрограмм со спектрограммами, приведенными на **рис. 3**, видно, что спектральные составляющие, полученные на частотах, кратных частоте модуляции $\Omega_{\text{м}}$ для неподвижного отражателя, в случае движущегося отражателя распадаются на две составляющие половинной

амплитуды. Данные составляющие смещены от частоты, кратной $\Omega_{\text{м}}$, на величину доплеровской частоты $\pm \Omega_{\text{Д}}$. При этом составляющая на «нулевой» частоте смещается на частоту Доплера с прежней амплитудой.

Из графиков **рис. 5, а** видно также, что в начале, и в конце (график здесь не приводим) каждой ХАС автодинный отклик на выходе автодина с АМ представлен только на доплеровской частоте $\Omega_{\text{Д}}$. Отклик на гармониках частоты модуляции $\Omega_{\text{м}}$ в этих случаях отсутствует. При смещении в среднюю область ХАС происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных составляющих в форме «пиков», обусловленных процессом взаимодействия отражённых АМ колебаний с излучаемыми, также «промодулированными» по амплитуде с частотой $\Omega_{\text{м}}$. Как показали расчёты при других значениях $m_{\text{ам}}$, амплитуда пиков существенно возрастает с приближением коэффициента $m_{\text{ам}}$ к единице, а также при переходе в

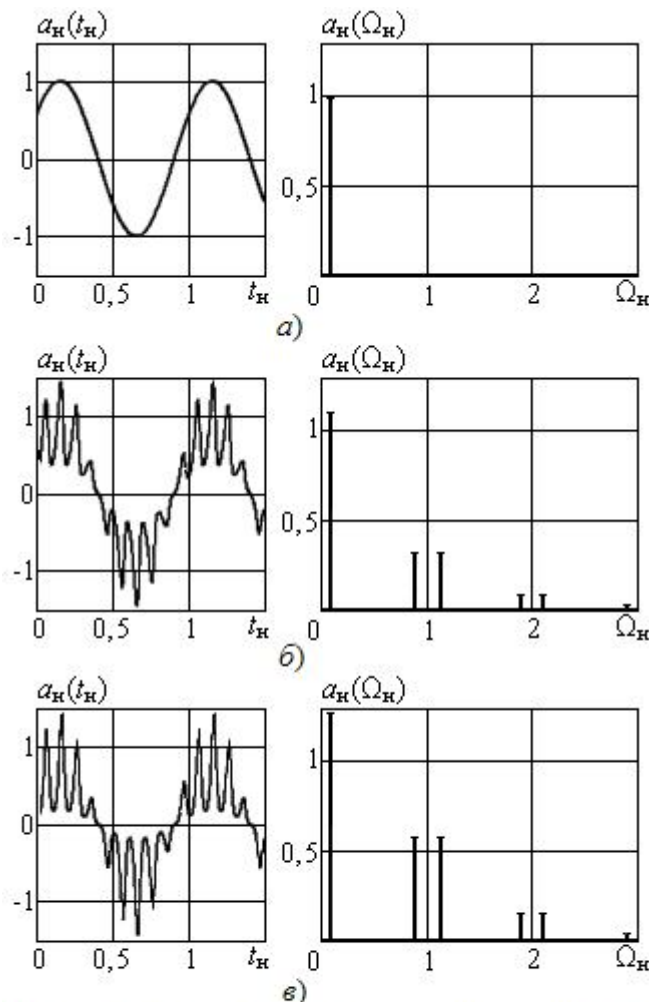


Рис. 5. Временные диаграммы (слева) и спектрограммы (справа) автодинных откликов от движущегося отражателя, рассчитанные для $m_{\text{ам}} = 0,5$ и $\psi = 1$ при: $\tau_{\text{н}} = 0$ (а); $\tau_{\text{н}} = 0,2$ (б); $\tau_{\text{н}} = 0,4$ (в).

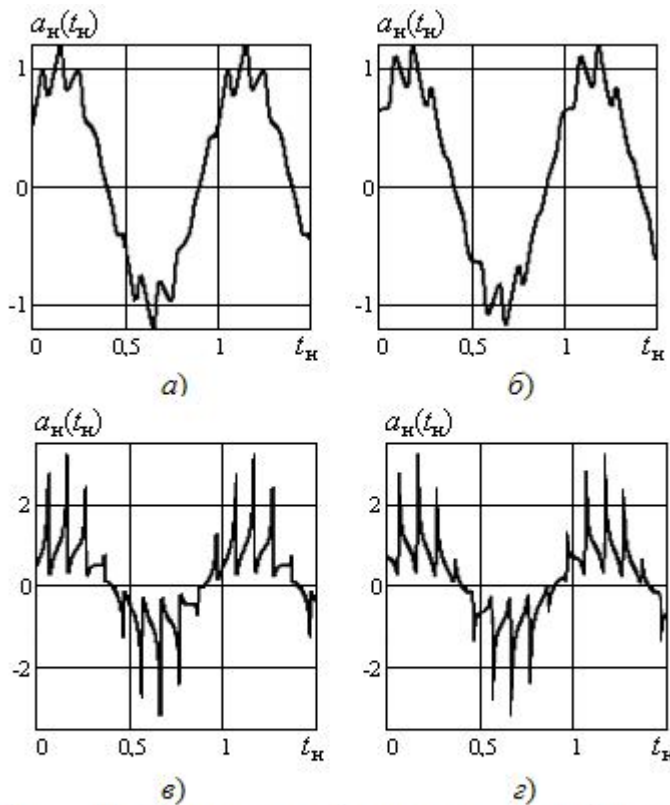


Рис. 6. Временные диаграммы автодинных откликов от движущегося отражателя, рассчитанные для $m_{ам} = 0,5$ (а, б) и $m_{ам} = 0,97$ (в, г) в начале и конце ХАС при: $\tau_H = 0,05$ (а, в); $\tau_H = 0,95$ (б, г).

явление выглядит ещё более явно (см. рис. 6, в и г). При сравнительно малых величинах $m_{ам}$ данные пики выглядят сглаженными (см. рис. 6, а, б), чего нельзя отметить при больших значениях коэффициента модуляции (см. рис. 6, в, г). В последнем случае обращает на себя внимание смещение положения максимума пика относительно периода модуляции при изменении величины τ_H . В начале ХАС они находятся ближе к правой стороне периода модуляции T_m (см. рис. 6, в), а в конце ХАС – к левой (см. рис. 6, г). Данное явление, по-видимому, оказывает влияние на обсуждаемый выше ход фазовых характеристик сигналов на гармониках частоты модуляции Ω_m (см. рис. 4).

Отметим, что спектр колебаний на частотах, кратных частоте Ω_m (см. рис. 5), имеет вид двухполосного сигнала с подавленной несущей, который обычно получается на выходе балансного модулятора. Для выделения доплеровского сигнала в этом случае необходимо использование синхронного детектора. В реальных условиях работы наличие преднамеренной АМ излучения и неизбежная нелинейность модуляционной характеристики генератора вызывает наличие значительного уровня гармоник частоты Ω_m . Поэтому выходные колебания в окрестности этих гармоник скорее напоминают спектр обычного АМ сигнала. В таком случае огибающая этих колебаний, имеющая частоту Доплера, может быть выделена с помощью обычного диодного детектора [13,14,19].

Из проведенного анализа спектров следует, что в автодинном генераторе с АМ при

область средней части ХАС. Эти дополнительные составляющие вызывают соответствующий рост уровня сигнала не только на гармониках частоты модуляции Ω_m , но и на доплеровской частоте Ω_D .

Специфику формирования пиков рассмотрим на примере временных диаграмм автодинного отклика от движущегося отражателя, представленных на рис. 6. Данные диаграммы рассчитаны для начальных и конечных участков ХАС при $m_{ам} = 0,5$ (рис. 6, а, б) и $m_{ам} = 0,97$ (рис. 6, в, г). Как видно из графика рис. 6, а и б, полученных для $m_{ам} = 0,5$, при отклонении величины τ_H от нулевого значения всего лишь на величину 0,05 на доплеровском сигнале заметно появление признаков искажений, связанных с формированием пиков.

При больших величинах $m_{ам}$ данное

выделении доплеровского сигнала на гармониках частоты модуляции можно увеличить энергетический потенциал системы за счёт оптимальной фильтрации и уменьшения влияния фликкерных шумов. Обычно фликкерный шум, имеющий спектральное распределение типа $1/\Omega$, переходит в равномерный на частотах порядка $\Omega/(2\pi) = 100$ кГц. При этом частота АМ находится значительно выше этого значения: $\Omega_m/(2\pi) \geq 1,0$ МГц. Поэтому, например, при $m_{ам} = 0,5$ и $\Omega_m/(2\pi) = 10$ кГц амплитуда сигнала на первой гармонике относительно сигнала на «нулевой» гармонике (автодина без АМ) имеет практически такую же величину (см. рис. 2, б), а фликкерный шум с частотой падает почти в 10 раз.

Поскольку функция ХАС на гармониках частоты модуляции принимает нулевые значения в непосредственной близости от СБРЛ и на дальностях, кратных длине модулирующей волны, то в СБРЛ можно реализовать такой алгоритм обработки, когда подавляются помехи от объектов, расположенных на соответствующих расстояниях. В целом выбор метода обработки доплеровского сигнала в автодинном генераторе с АМ определяется из условий конкретной задачи.

3. Экспериментальные исследования автодинов с АМ

В настоящем разделе представлены результаты экспериментальных исследований автодинного генератора с гармоническим законом АМ, которые выполнялись с модифицированным генераторным модулем «Тигель-08АМ» 8-ми миллиметрового диапазона длин волн. Кроме того, с этим модулем была сделана оценка выигрыша в потенциале, который обеспечивает автодин с АМ по сравнению с автодином без первичной модуляции.

Генераторный модуль «Тигель-08АМ» изготовлен по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна. Данные модули отличаются от обычных модулей «Тигель-08» топологией диодной вставки [7]. На поликоровой подложке диодной вставки модуля «Тигель-08АМ» предусмотрена возможность установки параллельно (по СВЧ) двух ЧИПов с развязкой их цепей смещения: диода Ганна и рin-диода. На рin-диод подавалось постоянное открывающее смещение, соответствующее середине линейного участка модуляционной характеристики и через ограничительный резистор – переменное модулирующее напряжение, обеспечивающее требуемую глубину АМ. Центральная частота излучения модуля – 37,5 ГГц, выходная мощность – 15 мВт, ток потребления при напряжении смещения 4 В – не более 0,2 А. Энергетический потенциал автодина в полосе 1 кГц на частоте 1 кГц составил около 80 дБ.

Функциональная схема экспериментальной установки для комплексного изучения формы и спектра автодинного отклика по изменению амплитуды и частоты колебаний и напряжения автосмещения генераторов с АМ приведена на **рис. 7, а**. В ней предусмотрена регистрация автодинного отклика при изменении расстояния до отражателя-имитатора, скорости его перемещения, уровня отражённого сигнала и других факторов.

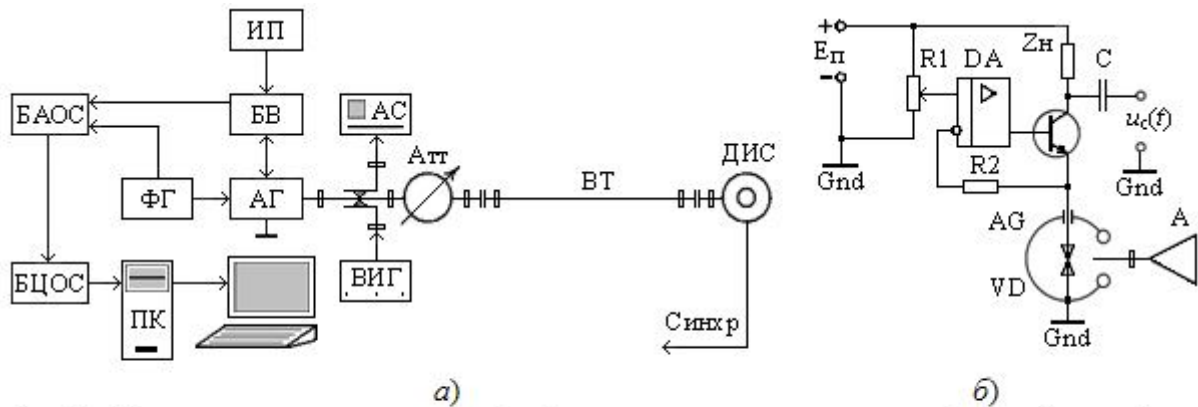


Рис. 7. Функциональная схема стенда для экспериментальных исследований автодинов с АМ (а) и принципиальная схема блока выделения автодинного сигнала в цепи питания генератора на диоде Ганна (б).

Исследуемый автодинный генератор (АГ) (см. **рис. 7**) связан с электромеханическим доплеровским имитатором сигнала (ДИС) волноводной линией (ВТ), в которой находятся переменный аттенуатор (Атт), моделирующий затухание распространяющегося в пространстве излучения и направленный ответвитель (НО). Боковые плечи направленного ответвителя связаны с анализатором спектра (АС) и внешним измерительным генератором (ВИГ). Последний предназначен для исследований автодинных генераторов в режиме внешней синхронизации.

Питание от стабилизированного источника питания (ИП) на исследуемый генератор АГ поступало через специальный блок выделения (БВ) автодинного сигнала, который предназначен для преобразования автодинных изменений среднего значения тока диода Ганна в напряжение [19]. Схема этого блока представлена на **рис. 7, б**. Операционный усилитель DA1 в совокупности с транзистором VT поддерживают неизменным напряжение питания диода Ганна, которое устанавливается потенциометром R1. Выделение полезного сигнала происходит на нагрузке Z_n в цепи коллектора. При резистивном сопротивлении Z_n на выходе $u_c(t)$ выделяется вся совокупность автодинного сигнала, а при использовании параллельных колебательных контуров – сигналы на соответствующих гармониках частоты модуляции.

Требуемый коэффициент АМ генератора АГ (см. **рис. 7, а**) и частота модуляции устанавливались выходным напряжением функционального генератора (ФГ), подаваемого на управляющий вход модуля «Тигель-08АМ» через разделительный конденсатор в цепь смещения рпн-диода. Глубина АМ генератора контролировалась анализатором спектра АС.

С выхода БВ сигнал, содержащий совокупность сигнала ПАМ и полезный автодинный сигнал, подавался на блок аналоговой обработки сигнала (БАОС). Назначение этого блока – первичное подавление сигнала ПАМ и выделение полезных сигналов на доплеровской частоте или на гармониках частоты модуляции. Для этого выходной сигнал автодина сначала усиливался (в единицы раз), с помощью дифференциального усилителя, на второй вход которого подавался «оригинал» ПАМ – часть модулирующего напряжения. Сформированный таким образом в БАОС сигнал далее поступал на вход блока цифровой обработки сигнала БЦОС, реализованный на базе отладочных плат фирмы Analog Device для АЦП AD7654 (Evolution Board AD7654 CB) и

платы управления этим АЦП с помощью компьютера (AD Control Board BRD3).

Для исключения влияния условий распространения излучения ХАС снималась при использовании волноводного тракта ВТ стандартного сечения, длина которого изменялась дискретно через 1,5 м путём его наращивания начиная от 1,5 м до 15 м. Глубина АМ излучения генератора АГ выбрана равной 50%. Дальнейшее её увеличение вызывает значительное увеличение нелинейных искажений сигнала ПАМ. Частота модуляции была выбрана равной 10 МГц. Уровень синхронизирующего сигнала от внешнего измерительного генератора ВИГ, подаваемого на автодинный генератор АГ для исключения сопутствующей ЧМ составлял около 1 мВт.

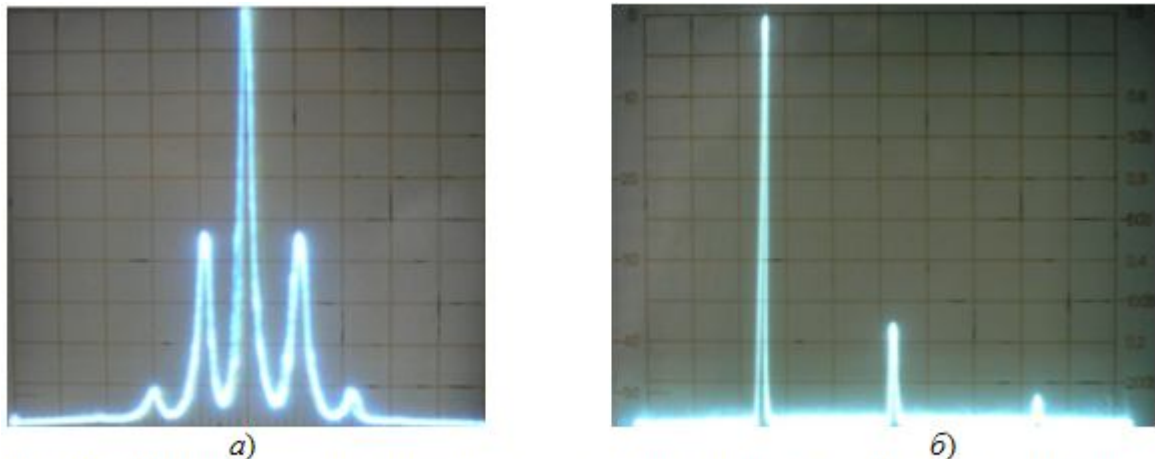


Рис. 8. Спектрограммы выходного излучения генератора АГ (а) и выходного сигнала блока выделения БВ (б) при его резистивной нагрузке Z_n .

На рис. 8 приведены спектрограммы выходного излучения автодинного генератора «Тигель-08АМ» (а) и выходного сигнала БВ (б) при резистивном характере нагрузки Z_n , иллюстрирующие работу лабораторного макета СБРЛ с АМ. С этой же целью для случая выделения автодинного отклика на гармониках (первой или второй) частоты модуляции на рис. 9 представлены осциллограммы огибающей сигнала на выходе БВ (а) при резонансной нагрузке, а также выходного доплеровского сигнала после его цифровой обработки и полного подавления сигнала ПАМ в блоке БЦОС (б).

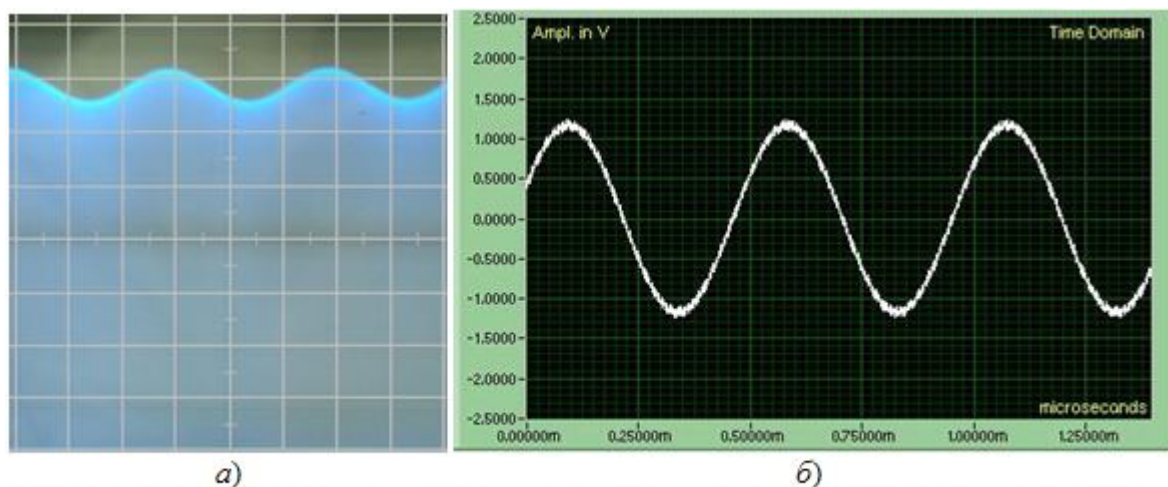


Рис. 9. Осциллограммы выходного сигнала блока выделения БВ (а) на гармониках частоты модуляции и выходного доплеровского сигнала БЦОС (б).

Результаты измерения уровней полезного сигнала на доплеровской частоте и на первых двух гармониках частоты модуляции в нормированном виде (в виде ХАС)

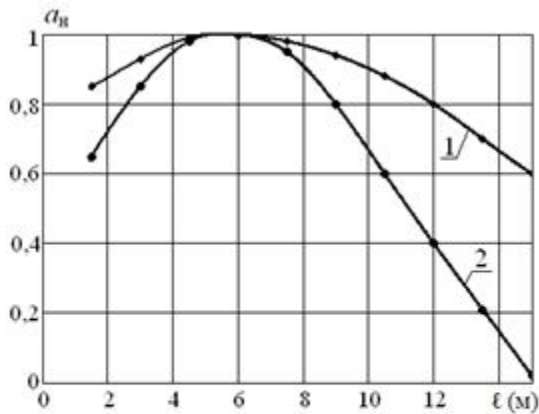


Рис. 10. Графики нормированных зависимостей амплитуд автодинных сигналов в доплеровском канале (1), на первой и второй гармониках частоты модуляции (2) от расстояния l .

представлены на рис. 10. Как видно из полученных кривых, вершина ХАС находится на расстоянии около 6 м. Графики ХАС для сигналов на гармониках практически совпадают. Сравнение полученных экспериментальных результатов с рассчитанными кривыми (см. рис. 2, а) показывает их качественное соответствие. Смещение максимума экспериментальной ХАС на 1,5 м относительно теоретического (7,5 м) объясняется влиянием затухания излучения в волноводном тракте.

С помощью селективного вольтметра было измерено отношение сигнал/шум сигналов на первой и второй гармониках частоты модуляции при $\Omega_D/(2\pi) = 2$ кГц и постоянном затухании в СВЧ тракте 70 дБ. Расстояние до имитатора составляло $l_0 = 7,5$ м. Результаты этих измерений показали, что отношение сигнал/шум для сигнала на частоте Ω_m равно 32, для сигнала на частоте $2\Omega_m$ – около 12, а отношение сигнал/шум при отсутствии АМ, при той же величине затухания в СВЧ тракте, было равным лишь 5. Следовательно, применение АМ и выделение сигнала на гармониках частоты модуляции обеспечивает выигрыш автодина в чувствительности по сравнению с автодином без модуляции, по крайней мере, на несколько децибел.

4. Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования ХАС автодинных генераторов с АМ показали, что благодаря подавлению сигналов, отражённых от объектов на определённых расстояниях от СБРЛ, и переносу спектра доплеровского сигнала за пределы влияния фликкерных шумов данные автодины по сравнению с автодинами без модуляции обладают повышенными помехоустойчивостью и чувствительностью.

Весьма специфическая проблема автодинов с АМ – необходимость исключения сопутствующей ЧМ, которая обусловлена неизохронностью СВЧ и КВЧ генераторов, может быть решена при создании нового автодинного модуля, в котором необходимо обеспечить стабилизацию частоты основного генератора с помощью дополнительного маломощного генератора, выполненного, например, на слаботочном диоде Ганна [20].

Таким образом, из анализа результатов выполненных исследований следует, что весьма перспективным направлением создания монолитных и гибридно-монолитных автодинов на планарных линиях передач, намеченным в последнее время и требующим своего дальнейшего развития, является использование 3-мезового полупроводникового чипа [7]. Применение в автодинных гибридно-интегральных схемах для СБРЛ с АМ предлагаемого чипа, представляющего собой многоэлементную микромощную мезапланарную ганновскую структуру, обеспечивает комплексное решение ряда

перечисленных выше проблем. Это достигается благодаря выполнению функции амплитудного модулятора одной боковой мезаструктурой и функции детектора, выделяющего полезный сигнал, – другой боковой мезаструктурой. При этом центральная мезаструктура в копланарной линии является активной, реализующей функции генераторного диода Ганна.

Данная работа посвящена памяти Евгения Константиновича Алахова, одного из основоположников автодинной тематики в СССР.

Литература

1. Алахов Е.К. Некоторые проблемы построения автодинных приёмопередающих устройств и пути их решения // Труды ЛИТМО. Современная электроника в оптическом приборостроении. – Л.: 1981. – С. 80 – 90.
2. Алахов Е.К. Практика работы автодинных устройств и пути построения автодинных комплексов // Л.: ЛИТМО. Деп. рук. № 5125-82. ВИНТИ. – 1982. – 33 с.
3. Коган И.М., Тамарчак Д.Я., Хотунцев Ю.Л. Автодины // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. – М.: ВИНТИ, 1984. – Т.33. – С. 3 – 175.
4. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. – Харьков: Институт радиопроизводства и электроники АН Украины. – 1991. – С. 38 – 47.
5. Igor V. Komarov, Sergey M. Smolskiy. Fundamentals of Short-Range FM Radar. // Artech House, Norwood, MA, USA 2003, 289 pages, Hard cover ISBN 1-58053-110-5.
6. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скриполь Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. – Саратов: СГУ, 2003. – 312 с.: ил.
7. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 1. Конструкторско-технологические достижения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – №12. – С. 3 – 30.
8. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 3. – С. 3 – 50.
9. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 6. – С. 3 – 51.
10. Хатьков Н.Д., Шаньгина Л.И., Драцкий С.В. Автодинный СВЧ датчик на диоде Ганна // 1997 IEEE – Russia Conference: MIA – ME'97. – P. 33 – 35.
11. Алахов Е.К. Использование триодного режима отражательного клистрона для построения прибора с модулированными СВЧ колебаниями // Известия вузов. Приборостроение. – 1967. – № 6. – С. 8 – 12.
12. Алахов Е.К. Применение суперрегенеративного режима отражательного клистрона-автодина для приёма вторичного излучения // Известия вузов. Приборостроение. – 1971. – № 10. – С. 5 – 9.
13. Бородавский П. А., Булдыгин А. Ф., Уткин К. К. Автодинный смеситель на диоде Ганна // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1974. – № 12. – С. 82–84.

14. Острейковский А.В. О повышении автодинной чувствительности генератора на диоде Ганна // Сб. Электродинамика и физика СВЧ. – Днепропетровск: ДГУ. – 1985. – С. 6 – 8.
15. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 7. – С. 3 – 33.
16. Шаров Ю.В., Кислов О.А. Об одном способе измерения малых дальностей // Радиоприёмные устройства. – М.: МЭИ, 1972. – № 110. – С. 63 – 67.
17. Артеменков С.Л., Смольский С.М. Стабилизация частоты транзисторных автодинов дополнительным синхросигналом // Сб.: Современные проблемы стабилизации частоты. – М.: МЭИ, 1983. – № 8. – С. 30 – 35.
18. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Применение внешней синхронизации для исследования внутренних свойств СВЧ генераторов по их автодинным характеристикам // Известия вузов. Физика, 2008, – т. 51, – №9/2. – С. 159 – 163.
19. 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.
20. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Приёмопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Серия. СВЧ-техника. – 1993. – № 4. – С. 70 – 72.

E-mail: noskov@oko-ek.ru;
smolskiysm@mail.ru