

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.3.004

УДК 621.373.12; 621.391.822

## Определение динамических параметров автодинов методом биений

**В. Я. Носков** ✉, **К. А. Игнатков**, **К. Д. Шайдулов**

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ noskov@oko-ek.ru

### Аннотация

Представлены результаты исследований влияния внутренних параметров генератора на особенности формирования динамических автодинных характеристик в случае воздействия сигнала от внешнего генератора. Дано сравнение полученных характеристик с характеристиками радиолокационных автодинов. Полученные данные сопоставлены с результатами исследований с помощью модуляционных характеристик. Результаты теоретических исследований получили подтверждение экспериментальными данными на примере генератора, выполненного на основе диода Ганна 8-мм диапазона.

### Ключевые слова

автодин, автодинный генератор, сигнал биений, динамические параметры, генератор Ганна

### Для цитирования

Носков В. Я., Игнатков К. А., Шайдулов К. Д. Определение динамических параметров автодинов методом биений. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):261–285. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.004

## Determination of autodynes dynamic parameters beat method

**V. Ya. Noskov** ✉, **K. A. Ignatkov**, **K. D. Shaydurov**

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ noskov@oko-ek.ru

### Abstract

This paper demonstrates the results of the oscillator internal parameters' influence on the features of the dynamic autodyne characteristic formation in the event of a signal from an external oscillator. The comparison of the obtained characteristics with characteristics of the radar autodynes is

given. We compare the obtained data with the research results by means of modulation characteristics. The results of theoretical studies are confirmed by the experimental data through the example of the oscillator made on the basis of the Gunn diode of 8-mm range.

### Keywords

autodyne, autodyne oscillator, beat signal, dynamic parameters, Gunn oscillator

### For citation

Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Shaydurov K. D. Determination of autodynes dynamic parameters beat method. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):261–285. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.004

## 1. Введение

Автодины (АД) – это открытые автоколебательные системы, представляющие собой совокупность автодинного генератора и средств регистрации автодинного отклика. Признак открытости здесь подразумевает доступность генератора к каким-либо внешним воздействиям на него. В одном случае это может быть воздействие излучения от стороннего независимого источника, а в другом – собственное, отраженное от объекта локации излучение. В обоих случаях в автодинном генераторе появляется реакция на эти воздействия в виде изменений амплитуды и частоты колебаний, а также напряжения (тока) смещения на активном элементе (АЭ), определяющем его режим генерации. Данная реакция называется автодинным откликом (эффектом), который присущ всем типам генераторов и проявляется во всем диапазоне частот, от радиочастотного до оптического [1–5]. Регистрация этих изменений в виде автодинных сигналов и их обработка обеспечивает возможность получения необходимой информации [5–9].

Радиотехнические системы, построенные по автодинному принципу, имеют простейшую конструкцию приемопередающего модуля, который содержит лишь антенну и АД, совмещающий в себе одновременно функции передатчика и приемника [10–13]. Поэтому АД находят широкое применение в системах ближней радиолокации и связи различного назначения, в аппаратуре контроля параметров технологических процессов и измерительной технике, а также в научных исследованиях и медицине, в которых отмеченные выше достоинства автодинов являются определяющими [13–26].

Основными характеристиками АД радиолокационного применения являются зависимости изменений выходного сигнала автодетектирования, амплитуды и частоты колебаний от изме-

нений величины времени запаздывания отраженного излучения [27]. Они обеспечивают возможность анализа особенностей формирования автодинного отклика при его автодетектировании, а также при выделении сигнала по изменению амплитуды и частоты колебаний. При этом соотношения амплитудных значений указанных автодинных изменений к величине амплитуды возвращенного от объекта локации СВЧ-излучения являются одними из важнейших параметров АД. Они соответственно имеют смысл коэффициентов автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты. Эти обобщенные параметры позволяют сравнивать различные генераторы между собой, выбирать наиболее подходящий тип в качестве АД и оптимизировать режим работы генератора по выбранному критерию.

Зависимость упомянутых характеристик и параметров от частоты автодинного сигнала и, соответственно, скорости перемещения отражающего объекта определяет динамические свойства АД, которые, в свою очередь, определяются постоянной времени автодинного отклика [28; 29]. Учет динамических характеристик радиолокационных АД необходим во многих их практических приложениях, например, в аппаратуре для регистрации быстропротекающих процессов в экспериментальной физике, практике полигонных баллистических испытаний и многих других [8; 9; 13; 19].

Экспериментальное исследование динамических характеристик АД путем натурального моделирования условий максимально приближенных к реальным условиям связано со значительными материальными затратами, сложностью и громоздкостью оборудования [13]. При этом по понятным причинам реальные объекты радиолокации заменяются их электродинамическими аналогами, которые в какой-то степени призваны упростить и значительно ускорить процесс отработки изделий и гарантировать достижение требуемых тактико-технических характеристик более простыми и дешевыми средствами. Однако наиболее продуктивно для таких исследований в лабораторных условиях использование сигнальных эквивалентов, реализуемых различными методами.

Среди методов исследования динамических характеристик АД известен метод модуляционных характеристик, экспериментальное получение которых значительно проще, чем «прямое» снятие автодинных характеристик [29]. Согласно этому методу при фиксированном значении модулирующего параметра (модуля коэффициента отражения) снимается частотная зависимость модуляционной способности генератора при высоких значениях частоты модуляции, из которой далее находится постоянная

времени автодинного отклика. Недостаток этого метода – высокие требования по быстрдействию к модулятору.

Известен также метод модуляции генератора по цепи смещения АЭ [30]. Однако он имеет ограничения из-за сильного влияния цепи питания на исследуемые характеристики генератора в области высоких частот. Другой метод, назовем его «метод биений», основан на замене отраженного сигнала сигналом от дополнительного генератора, частота которого находится за пределами полосы синхронизации АД. Принцип действия этого метода лежит в основе функционирования широко известных автодинных преобразователей частоты [37–33]. Однако применительно к исследованиям динамических свойств радиолокационных АД обоснование этого метода в известной нам литературе отсутствует.

Цель данной статьи – восполнить указанный пробел. Для этого на основе разработанной нами математической модели АД, находящегося под воздействием сигнала от внешнего генератора, выполнены исследования влияния внутренних параметров генератора на особенности формирования динамических характеристик.

## 2. Эквивалентная схема и основные уравнения автодинного СВЧ-генератора

Получим основные уравнения, описывающие формирование автодинного отклика в одночастотном генераторе с одноконтурной колебательной системой (КС) при воздействии сигнала от внешнего генератора. В качестве модели рассмотрим СВЧ-генератор с гистерезисной обратной связью между током АЭ и мгновенным напряжением на нем. Для этого полагаем, что вольтамперная характеристика АЭ из-за конечности времени переноса зарядов в пространстве взаимодействия с полем резонатора в общем случае имеет гистерезис. Это означает, что мгновенный ток  $i_{\text{АЭ}}$  является функцией мгновенного напряжения  $u$  и скорости его изменения  $\dot{u} = du / dt$ :  $i_{\text{АЭ}} = i_{\text{АЭ}}(u, \dot{u})$ . Полагаем также, что время релаксации АЭ существенно меньше характеристического времени изменения амплитуды генерируемых колебаний.

Эквивалентная схема АД с одноконтурной КС приведена на рис. 1. В ней резонатор в окрестности частоты генерации представлен простейшим параллельным колебательным контуром, включающим пассивные параметры АЭ и состоящим из индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и суммарной проводимости  $G$ :  $G = G_p + G_n$ , где  $G_p$  – проводимость собственных потерь резонатора,  $G_n$  – проводимость нагрузки. Параллельно резонатору подключен экви-

валентный источник тока  $j_{\text{вн}}(t)$ , отображающий воздействие на АД сигнала от внешнего генератора:

$$j_{\text{вн}}(t) = J_{\text{вн}} \cos \omega_{\text{вн}} t. \quad (1)$$

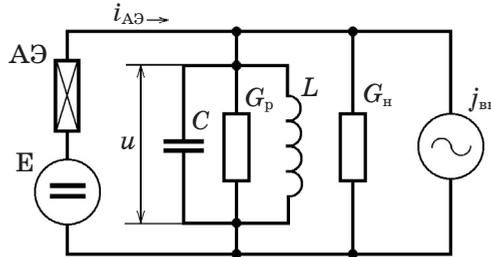


Рис. 1. Эквивалентная схема автодинного СВЧ-генератора  
Fig. 1. Equivalent circuit of an autodyne microwave oscillator

Активный элемент АЭ (см. рис. 1) с вольт-амперной характеристикой  $N$ -типа по постоянному току непосредственно подключен к источнику напряжения смещения  $E$ , а по переменному току – параллельно резонатору. С учетом (1) и сделанных замечаний для схемы на рис. 1 запишем дифференциальное уравнение:

$$d^2u / dt^2 + \omega_c u = F(u, \dot{u}, t), \quad (2)$$

где

$$F(u, \dot{u}, t) = -\frac{\omega_c}{Q_n} \left\{ \left[ 1 + \frac{1}{G} \frac{di_{\text{АЭ}}(u, \dot{u})}{du} \right] \frac{du}{dt} - \frac{1}{G} \frac{dj_{\text{вн}}(t)}{dt} \right\};$$

$\omega_c = (LC)^{-1/2}$ ,  $Q_n = \omega_c C / G$  – собственная частота и нагруженная добротность колебательной системы соответственно.

Учитывая достаточно высокое значение нагруженной добротности  $Q_n$  КС, полагаем, что приближенное решение уравнения (2) является квазигармоническим:

$$u = A \cos \Psi(t) = A \cos(\omega_{\text{вн}} t + \varphi), \quad (3)$$

где  $A \equiv A(t)$  и  $\varphi \equiv \varphi(t)$  – медленно меняющиеся амплитуда и фаза автоколебаний. Тогда производную от (3) запишем в виде

$$\dot{u} = -\omega_{\text{вн}} A \sin \Psi(t). \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует [34], что переменные  $A$  и  $\varphi$  должны удовлетворять уравнению:

$$\dot{A} \cos \Psi(t) - A \dot{\varphi} \sin \Psi(t) = 0. \quad (5)$$

Учитывая малое значение величины относительной расстройки текущей частоты генерации  $\omega$  и частоты  $\omega_c$ :  $(\omega^2 - \omega_c^2) / \omega_c \ll 1$ , исходное уравнение (2) представим в виде:

$$d^2u / dt^2 + \omega^2 u = f(u, \dot{u}, t), \quad (6)$$

$$\text{где } f(u, \dot{u}, t) = -\frac{\omega_c}{Q_H} \left[ \frac{du}{dt} + \frac{1}{G} \frac{di_{AЭ}(u, \dot{u})}{du} - Q_H u \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{\omega_c} - \frac{1}{G} \frac{dj_{вн}(t)}{dt} \right].$$

На основе известных энергетических соотношений для СВЧ генераторов имеем:  $J_{вн} = (8G_H P_{вн})^{1/2}$ , где  $P_{вн} = k_{вн}^2 P_{вых}$  – мощность воздействующего на генератор сигнала внешнего генератора,  $P_{вых}$  – выходная мощность генератора;  $k_{вн} = A_{вн} / A_{вых} = (P_{вн} / P_{вых})^{1/2}$  – коэффициент, характеризующий соотношение амплитуд внешнего сигнала  $A_{вн}$  и собственной амплитуды  $A_{вых}$  колебаний генератора. С учетом (4) запишем выражение для производной тока зависимого источника в виде:

$$dj_{вн}(t)/dt = -2k_{вн} G_H A \omega \sin \Psi(t), \quad (7)$$

Решая систему уравнений (5) и (6) при подстановке в них (1), (3), (4) и (7), получим выражение для медленных переменных  $A$  и  $\varphi$ , которые в стандартной форме метода усреднения [34] примут вид:

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{1}{Q_H \omega} f(A, \Psi, t) \sin \Psi(t), \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{1}{Q_H A \omega} f(A, \Psi, t) \cos \Psi(t), \quad (9)$$

где

$$f(A, \Psi, t) = -\omega_c [-\omega A \sin \Psi(t)] + \omega_c \frac{1}{G} \frac{di_{AЭ}(u, \dot{u})}{du} - \omega_c \left[ Q_H \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{\omega_c} A \cos \Psi(t) - \frac{2k_{вн} G_H}{G} \omega A \sin \Psi(t) \right].$$

Уравнения (8) и (9) в рамках квазигармонического приближения эквивалентны исходному уравнению (2). Дальнейший их анализ обычно приводит к укороченным уравнениям для амплитуды и фазы автоколебаний. Для этого ток АЭ представим в виде ряда Фурье:

$$i_{AЭ}(u, \dot{u}) = I_0(A, \omega) + \sum_{n=1}^{\infty} [I_{nRe}(A, \omega) \cos n\Psi(t) + I_{nIm}(A, \omega) \sin n\Psi(t)], \quad (10)$$

где  $I_0(A, \omega)$ ,  $I_{nRe}(A, \omega)$ ,  $I_{nIm}(A, \omega)$  – постоянная составляющая и амплитуды синфазных и ортогональных составляющих гармоник тока АЭ:

$$I_0(A, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{AЭ}(u, \dot{u}) d\Psi,$$

$$I_{nRe}(A, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{AЭ}(u, \dot{u}) \cos n\Psi d\Psi,$$

$$I_{n\text{Im}}(A, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{AЭ}(u, \dot{u}) \sin n\psi d\psi.$$

Учитывая среди составляющих (10) только первую гармонику тока, представим АЭ генератора в виде параллельного соединения средних за период колебаний двух проводимостей, имеющих соответственно «резистивный»  $G_{AЭ} \equiv G_{AЭ}(A, \omega) = I_{1\text{Re}}(A, \omega) / A$  и «реактивный»  $B_{AЭ} \equiv B_{AЭ}(A, \omega) = I_{1\text{Im}}(A, \omega) / A$  характер. Тогда из (8) и (9) получим систему укороченных дифференциальных уравнений для амплитуды и фазы АД:

$$\frac{2GQ_{\text{H}}}{\omega_{\text{c}}} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + G_{AЭ} + G = 2k_{\text{вн}} \eta G \cos \varphi, \quad (11)$$

$$\frac{2GQ_{\text{H}}}{\omega_{\text{c}}} \frac{d\varphi}{dt} + B_{AЭ} + 2GQ_{\text{H}} \frac{\omega - \omega_{\text{c}}}{\omega_{\text{c}}} = -2k_{\text{вн}} \eta G \sin \varphi, \quad (12)$$

где  $\eta = Q_{\text{H}} / Q_{\text{вн}}$ ,  $Q_{\text{вн}} = \omega_{\text{c}} C / G_{\text{H}}$  – коэффициент полезного действия и внешняя добротность КС.

Уравнения (11), (12) получены в рамках обычных приближений, применяемых для анализа автоколебательных систем, и довольно точно описывают поведение АД при произвольных величинах амплитуды воздействующего на него излучения, а также переходные процессы установления автодинного отклика и его установившиеся значения.

При условии  $k_{\text{вн}} = 0$  уравнения (11), (12) определяют работу автономного генератора, параметры стационарных колебаний которого при равенстве нулю производных в уравнениях (11), (12) и  $B_{AЭ} = B_{AЭ}^0$ ,  $G_{AЭ} = G_{AЭ}^0$ ,  $\omega = \omega_0$ , находятся из соотношений:

$$G + G_{AЭ}^0 = 0, \quad B_{\text{p}}^0 + B_{AЭ}^0 = 0, \quad I_0 = I_0^0, \quad (13)$$

где  $G_{AЭ}^0 = G_{AЭ}(A_0, \omega_0)$ ,  $B_{AЭ}^0 = B_{AЭ}(A_0, \omega_0)$ ;  $B_{\text{p}}^0 = 2GQ_{\text{H}}\chi_0$  – реактивная составляющая пассивной части КС на частоте  $\omega_0$ ;  $\chi_0 = (\omega_0 - \omega_{\text{c}}) / \omega_{\text{c}}$  – относительная расстройка частоты резонатора  $\omega_{\text{c}}$  от частоты стационарных колебаний  $\omega_0$  автономного генератора;  $I_0^0$  – среднее значение тока АЭ. Частоту  $\omega_0$  можно вычислить, используя (13):

$$\omega_0 = \omega_{\text{c}}(1 + \text{tg}\Theta / 2Q_{\text{H}}), \quad (14)$$

где  $\Theta = \text{arctg}(B_{AЭ}^0 / G_{AЭ}^0)$  – угол запаздывания АЭ. Уравнения (13)–(15) стационарного режима хорошо известны в теории автоколебаний для определения амплитуды и частоты автономного СВЧ-генератора [35].

Поведение СВЧ-генератора наиболее просто проанализировать в малосигнальном приближении, полагая  $k_{\text{вн}} \ll 1$ . Для этого представим амплитуду и частоту автоколебаний и среднее значение тока АЭ в виде:  $A = A_0 + \Delta A$ ;  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ ;  $I_0 = I_0^0 + \Delta I_0$ , где

$\Delta A$ ,  $\Delta\omega = d\varphi / dt$  и  $\Delta I_0$  – автодинные изменения стационарного режима генератора соответственно. Среднее значение тока  $I_0$  АЭ и входящие в уравнения (14) параметры  $G_{\text{АЭ}}^0$  и  $B_{\text{АЭ}}^0$  при этом получают соответствующие приращения. Полагая внешнее воздействие достаточно малым, так что  $\Delta A \ll A_0$ ,  $\Delta\omega \ll \omega_0$ ,  $\Delta I_0 \ll I_0^0$ , запишем указанные параметры с учетом первых двух членов разложения в ряды Тейлора в окрестности стационарного режима автоколебаний:

$$G_{\text{АЭ}} = G_{\text{АЭ}}^0 + \left( \frac{\partial G_{\text{АЭ}}}{\partial A} \right)_0 a + \left( \frac{\partial G_{\text{АЭ}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega, \quad (15)$$

$$B_{\text{АЭ}} = B_{\text{АЭ}}^0 + \left( \frac{\partial B_{\text{АЭ}}}{\partial A} \right)_0 a + \left( \frac{\partial B_{\text{АЭ}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega, \quad (16)$$

$$I_0 = I_0^0 + \left( \frac{\partial I_0}{\partial A} \right)_0 a + \left( \frac{\partial I_0}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega, \quad (17)$$

где частные производные взяты в окрестности стационарного режима колебаний генератора (индекс «0» около больших скобок).

Подставляя (15), (16) в (11), (12) и учитывая соотношения (13), получим систему неоднородных линейризованных уравнений для определения относительных автодинных изменений амплитуды  $a = \Delta A / A_0$  и фазы  $\varphi$  колебаний и изменений тока  $i_0 = \Delta I_0 / I_0^0$  АЭ:

$$\frac{Q_{\text{н}}}{\omega_0} \frac{da}{dt} + \alpha a + \varepsilon \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{dt} = k_{\text{вн}} \eta \cos \varphi, \quad (18)$$

$$\beta a + Q_{\text{н}} \left( \chi_{\text{нр}} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{dt} \right) = -k_{\text{вн}} \eta \sin \varphi, \quad (19)$$

$$\alpha_0 a + \varepsilon_0 \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{dt} = i_0, \quad (20)$$

где  $\chi_{\text{нр}} = \Delta\omega_{\text{нр}} / \omega_0$  – относительная величина начальной расстройки  $\Delta\omega_{\text{нр}}$  частоты внешнего сигнала  $\omega_{\text{вн}}$  и частоты автономного генератора  $\omega_0$ :  $\Delta\omega_{\text{нр}} = \omega_{\text{вн}} - \omega_0$ ;  $\alpha = (A_0 / 2G)(\partial G_{\text{АЭ}} / \partial A)_0$  – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла;  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{p}} + \varepsilon_{\text{АЭ}}$  – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости КС  $\varepsilon_{\text{p}} = (\omega_0 / 2G)(\partial G_{\text{p}} / \partial \omega)_0$  и проводимость АЭ  $\varepsilon_{\text{АЭ}} = (\omega_0 / 2G)(\partial G_{\text{АЭ}} / \partial \omega)_0$ ;  $\beta = (A_0 / 2G)(\partial B_{\text{АЭ}} / \partial A)_0$  – параметр, определяющий неизохронность генератора;  $\alpha_0 = (A_0 / I_0)(\partial I_0 / \partial A)_0$  – параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций

амплитуды колебаний;  $\varepsilon_0 = (\omega_0 / I_0)(\partial I_0 / \partial \omega)_0$  – параметр «частотного детектирования», определяющий вклад изменений частоты генерации в вариации тока питания АЭ.

Полученные выражения (18)–(20) обладают достаточно широкой общностью, поскольку обеспечивают возможность анализировать явления как внутри полосы синхронизации, так и за ее пределами, а также автодинный эффект в СВЧ-генераторах с любым типом АЭ (туннельные диоды, диоды Ганна, полевые и биполярные транзисторы). При этом учитываются такие внутренние параметры генератора, как неизохронность, неизодромность, амплитудное и частотное детектирование. Отметим, что в случае СВЧ-генераторов, выполненных на ЛПД (динамическая вольт-амперная характеристика этих приборов *S*-типа), полученные результаты являются также справедливыми при условии дуальной замены основных понятий: ток  $\leftrightarrow$  напряжение, проводимость  $\leftrightarrow$  сопротивление и т.п.

### 3. Динамические характеристики автодинных СВЧ-генераторов в режиме биений

Поведение входящей в выражения (18)–(20) фазы  $\varphi$ , как известно [36], зависит от соотношения величин начальной расстройки  $\chi_{\text{нр}}$  и  $\chi_{\text{с}}$  и, соответственно, имеем два варианта решения этих уравнений. В случае выполнения неравенства  $\chi_{\text{нр}} > \chi_{\text{с}}$  в системе имеет место режим биений, фаза  $\varphi$  непрерывно изменяется и величина  $\Delta\omega_{\text{с}}$  определяет максимальные отклонения частоты  $\omega_{\text{вн}}$  от  $\omega_0$  (автодинную девиацию частоты). В случае выполнения обратного неравенства  $\chi_{\text{нр}} < \chi_{\text{с}}$  получаем режим захвата колебаний генератора, при этом  $\Delta\omega_{\text{с}}$  является половиной полосы синхронизации.

В режиме биений, когда выполняется сильное неравенство  $\chi_{\text{нр}} \gg \chi_{\text{с}}$ , в (18)–(20) фаза  $\varphi$  изменяется практически линейно с частотой биений  $\Omega_6$ :  $\varphi \equiv \varphi(t) = \Omega_6 t$  [35; 36]. Тогда, исключая из рассмотрения случаи кратного соотношения частот  $\Omega_6$  и  $\omega_0$ , решение этих уравнений для «динамических» относительных изменений амплитуды  $a(t)$  и частоты  $\chi_{\text{нр}}$  колебаний и сигнала автодетектирования  $i_0(t)$  значительно облегчается и имеет вид:

$$a(t) = k_{\text{вн}} K_a k_a (\Omega_6) \cos[\Omega_6 t - \psi_a(\Omega_6)], \quad (21)$$

$$\chi_{\text{нр}}(t) = k_{\text{вн}} L_a l_a (\Omega_6) \sin[\Omega_6 t + \theta(\Omega_6)], \quad (22)$$

$$i_0(t) = k_{\text{вн}} K_0 k_0 (\Omega_6) \cos[\Omega_6 t - \psi_0(\Omega_6)], \quad (23)$$

где  $K_a$ ,  $L_a$ ,  $K_0$  – коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты генерации и автодетектирования;

$$K_a = \eta(1 + \rho^2)^{1/2} / \alpha(1 - \gamma\rho), \quad (24)$$

$$L_a = (1 + \gamma^2)^{1/2} / Q_{вн}(1 - \gamma\rho), \quad (25)$$

$$K_0 = \eta(\alpha_0 / \alpha)(1 - \kappa_{чд}\gamma)(1 + \kappa_{ад}^2)^{1/2} / (1 - \gamma\rho), \quad (26)$$

$\psi_a = \text{arctg} \rho$ ,  $\theta = \text{arctg} \gamma$ ,  $\psi_0 = \text{arctg} \kappa_{ад}$  – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды, частоты автоколебаний и сигнала автодетектирования соответственно;  $\kappa_{ад} = (\rho - \kappa_{чд}) / (1 - \kappa_{чд}\gamma)$ ;  $\kappa_{чд} = \varepsilon_0 \alpha / \alpha_0 Q_{вн}$  – параметр частотного детектирования автодинных изменений частоты в изменения среднего значения тока АД. В (25)  $k_{вн} L_a = \Delta\omega_c / \omega_0 = (\omega_{вн} - \omega_0) / \omega_0 = \chi_c$  – относительное максимальное отклонение частоты  $\omega = d\Psi / dt$  возмущенного генератора от частоты автономных колебаний  $\omega_0$  под воздействием внешнего сигнала;  $k_a(\Omega_6)$ ,  $l_a(\Omega_6)$ ,  $k_0(\Omega_6)$  – нормированные коэффициенты частотной зависимости коэффициента автодинного усиления, девиации частоты генерации и сигнала автодетектирования соответственно:

$$k_a(\Omega_6) = \sqrt{\frac{(1 - \rho \Omega_6^H)^2 + (\rho + \Omega_6^H)^2}{(1 + \rho^2)[1 + (\Omega_6^H)^2]^2}}, \quad (27)$$

$$l_a(\Omega_6) = \frac{1 + \gamma \Omega_6^H + (1 - \gamma\rho) (\Omega_6^H)^2}{\sqrt{(1 + \gamma^2)[1 + (\Omega_6^H)^2] \cos\theta(\Omega_6^H)}}, \quad (28)$$

$$k_0(\Omega_6) = \frac{1 - \rho \Omega_6^H}{\sqrt{1 + \kappa_{ад}^2 [1 + (\Omega_6^H)^2] \cos\psi_0(\Omega_6^H)}}, \quad (29)$$

$\psi_a(\Omega_6)$ ,  $\theta(\Omega_6)$ ,  $\psi_0(\Omega_6)$  – углы относительных фазовых смещений автодинных изменений амплитуды колебаний, частоты биений и сигнала автодетектирования соответственно:

$$\psi_a(\Omega_6) = \text{arctg} \frac{\rho + \Omega_6^H}{1 - \rho \Omega_6^H}, \quad (30)$$

$$\theta(\Omega_6) = \text{arctg} \frac{\gamma(1 - \rho \Omega_6^H)}{1 + \gamma \Omega_6^H + (1 - \gamma\rho)(\Omega_6^H)^2}, \quad (31)$$

$$\psi_0(\Omega_6) = \text{arctg} \frac{\rho - \kappa_{чд} + (1 - \kappa_{чд}\gamma) \Omega_6^H - \kappa_{чд}(1 - \gamma\rho) (\Omega_6^H)^2}{(1 - \kappa_{чд}\gamma)(1 - \rho \Omega_6^H)}, \quad (32)$$

$\Omega_6^H = \Omega_6 \tau_a$  – нормированная частота биений;  $\tau_a$  – характеристическая постоянная времени (время релаксации) автодинного отклика:

$$\tau_a = \frac{Q_{вн}}{\alpha \omega_0 (1 - \gamma\rho)}. \quad (33)$$

Из сравнения полученных здесь выражений (21)–(33) для АД в режиме преобразования частоты с соответствующими выраже-

ниями (1)–(13), полученными для случая радиолокационного АД [28], видно их полное формальное совпадение. Однако физические явления, лежащие в основе их работы, разные. Отличие этих явлений состоит в том, что в первом случае частота выходного сигнала АД, определяемая в соответствии с эффектом Доплера относительной скоростью движения радара и объекта, может изменяться от нуля (объект неподвижен) до максимальной граничной частоты  $\Omega_{гр}$  [28; 36]. Тогда как в случае автодинного преобразователя частота биений снизу ограничена величиной полосы синхронизации  $\Delta\omega_c$ , которая определяется, как следует из (22), величиной автодинной девиации частоты:  $\Delta\omega_c = k_{вн} L_a l_a(\Omega_0)\omega_0$ . Наличие одновременной амплитудной (21) и частотной (22) модуляции колебаний генератора, безусловно, усложняет форму выходного сигнала [37; 38]. Однако характер этих искажений принципиально иной и не связан с явлением запаздывания отраженного излучения, как у радиолокационных АД [27].

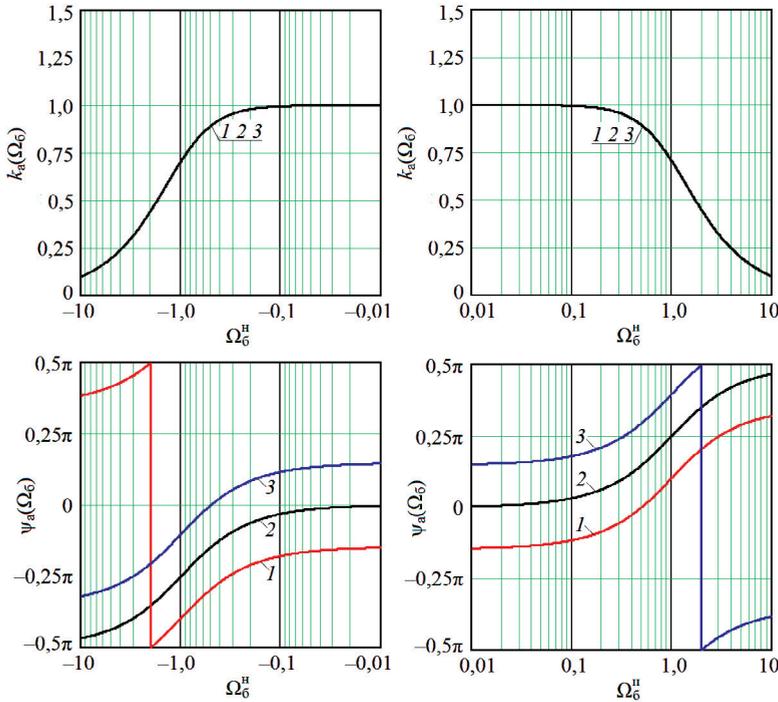
#### 4. Расчет и анализ динамических характеристик

Поскольку выражения (27)–(32) являются достаточно сложными, то их анализ выполним с привлечением численных методов. На рис. 2–4 представлены результаты расчетов полупологарифмических частотных зависимостей как для отрицательных (слева), так и положительных (справа) значений частоты  $\Omega_0^n$ , выполненных при различных величинах коэффициентов  $\gamma$ ,  $\rho$  и  $\kappa_{зд}$ .

Из графиков рис. 2 видно, что частотная зависимость нормированного коэффициента автодинного усиления  $k_a(\Omega_0)$ , обусловленного инерционностью изменений амплитуды колебаний, является симметричной функцией относительно  $\Omega_0 = 0$ . Вид ее напоминает амплитудно-частотную характеристику колебательного контура и не зависит от величин коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ . При этом угол фазового смещения характеристики  $\psi_a(\Omega_0)$  определяется только неизодромностью генератора ( $\rho \neq 0$ ), вызывающей ее смещение по оси ординат. Зависимость  $k_a(\Omega_0)$  от величин коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$  прослеживается в абсолютных значениях частоты автодинного отклика ( $\Omega_0$ ). Так, из анализа выражения (27) следует, что если период  $2\pi / \Omega_0 < \tau_a$ , то величина амплитуды автодинного сигнала  $a(t)$  резко уменьшается, поскольку АД не успевает реагировать на быстрое изменение фазы  $\varphi$ . Из (27) при условии  $k_a(\Omega_0) = 1/2^{1/2}$  находим граничное значение частоты автодинного сигнала

$$\Omega_{гр} = \frac{1}{\tau_a} = \frac{\alpha\omega_0(1-\gamma\rho)}{Q_H} = \frac{\omega_0\sqrt{1+\rho^2}}{K_a Q_{вн}}. \quad (34)$$

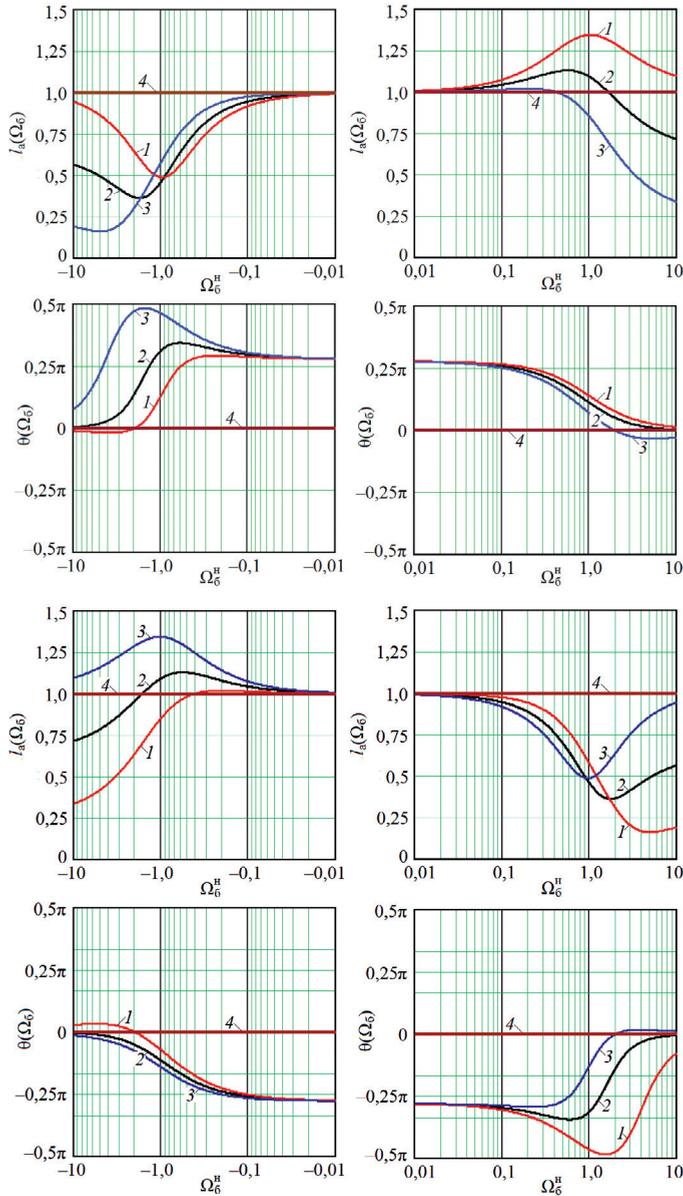
Выражение (34) полностью совпадает с выражением, полученным для граничной частоты доплеровского сигнала радиолокационного АД (см. (24), [28]).



**Рис. 2.** Графики частотных зависимостей коэффициентов автодинного усиления  $k_a(\Omega_\delta)$  и угла фазового сдвига  $\psi_a(\Omega_\delta)$ , рассчитанные при  $\gamma = 1,2$  и различных значениях коэффициента  $\rho$ :  $\rho = -0,5$  (кривые 1);  $\rho = 0$  (кривые 2);  $\rho = 0,5$  (кривые 3)

**Fig. 2.** Plots of the frequency dependences of the autodyne amplification coefficients  $k_a(\Omega_\delta)$  and the phase shift angle  $\psi_a(\Omega_\delta)$ , calculated for  $\gamma = 1.2$  and at different values of the coefficient  $\rho$ :  $\rho = -0.5$  (curves 1);  $\rho = 0$  (curves 2);  $\rho = 0.5$  (curves 3)

В отличие от частотной зависимости  $k_a(\Omega_\delta)$ , зависимость  $l_a(\Omega_\delta)$  (см. рис. 3) при условии  $\gamma \neq 0$  не является симметричной функцией относительно  $\Omega_\delta = 0$ , а имеет в окрестности нуля дисперсионную форму. Вид этой гипотетической функции в значительной степени определяется величиной и знаком коэффициентов неизохронности  $\gamma$  и неизодромности  $\rho$ . При смене знака при коэффициенте  $\gamma$ , как видно из сравнения соответствующих кривых рис. 3, а и б, кривые  $l_a(\Omega_\delta)$  на графиках в окрестности значений  $\Omega_\delta = 0$  также меняют знак производной. При этом кривые  $\theta(\Omega_\delta)$  поворачиваются на угол примерно  $\pi$  относительно начала координат, как точки центральной симметрии. Крутизна  $S_\Omega$  дисперсионной зависимости  $l_a(\Omega_\delta)$  в окрестности частоты  $\Omega_\delta = 0$ .



I

II

**Рис. 3.** Графики частотных зависимостей нормированных коэффициентов девиации частоты  $I_a(\Omega_6)$  и углов фазового сдвига  $\theta(\Omega_6)$ , рассчитанные при  $\gamma = 1,2$  (I) и  $\gamma = -1,2$  (II) и различных значениях коэффициента неизодромности  $\rho$ :  $\rho = -0,5$  (кривые 1);  $\rho = 0$  (кривые 2);  $\rho = 0,5$  (кривые 3). При этом кривые 4 получены при  $\gamma = 0$

**Fig. 3.** Plots of frequency dependences of normalized coefficients of frequency deviation  $I_a(\Omega_6)$  and phase shift angles  $\theta(\Omega_6)$ , calculated for  $\gamma = 1.2$  (I) and  $\gamma = -1.2$  (II) and various values of the nonisodromic coefficient  $\rho$ :  $\rho = -0.5$  (curves 1);  $\rho = 0$  (curves 2);  $\rho = 0.5$  (curves 3). In this case, curves 4 were obtained at  $\gamma = 0$

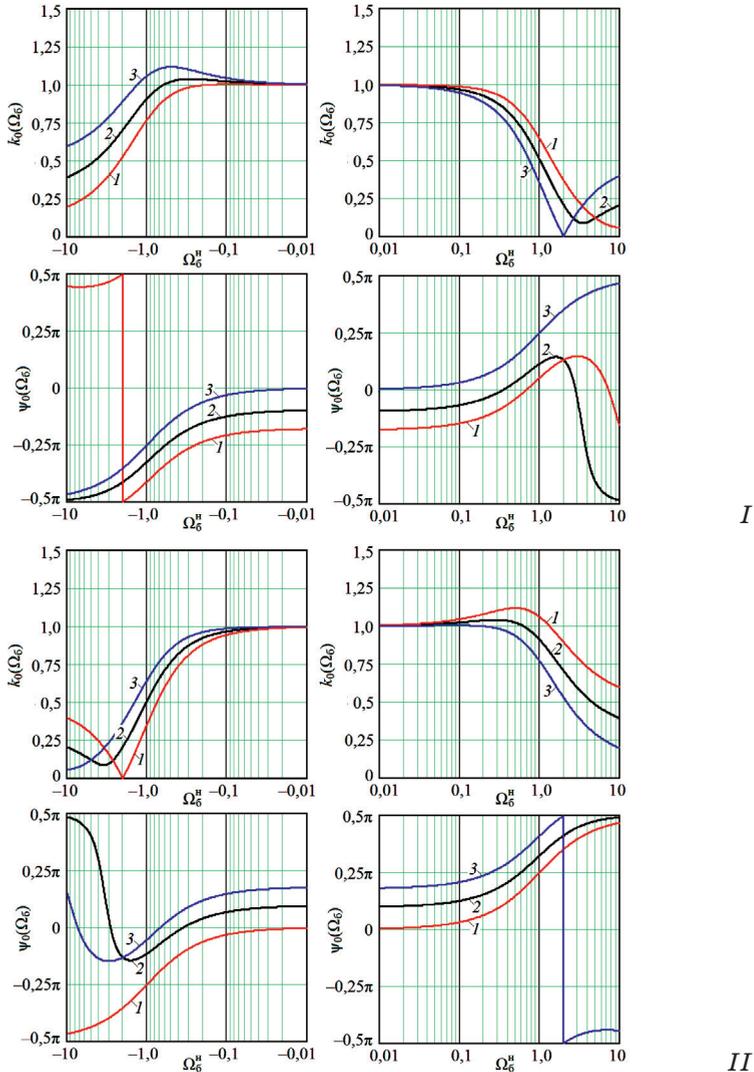
$$S_{\Omega=0} = \left( \frac{dl_a(\Omega_6)}{d\Omega_6^H} \right)_{\Omega=0} = \frac{\gamma(1-\gamma\rho)}{1+\gamma^2} \quad (35)$$

имеет наибольшее значение при  $\gamma = \pm 1$ , как показано также в работе [39] для случая радиолокационного АД. При этом, как видно из (35), неизодромность генератора увеличивает крутизну  $S_{\Omega=0}$  при условии, если знаки при коэффициентах  $\gamma$  и  $\rho$  различные. При других значениях коэффициента  $\gamma$  эффект частотной дисперсии проявляется в меньшей степени и в случае изохронного генератора ( $\gamma = 0$ ) он полностью отсутствует (см. графики рис. 3), а при этом фазовый сдвиг  $\theta(\Omega_6) = 0$ .

Таким образом, на величину автодинной девиации частоты оказывает влияние два основных фактора. Первый и определяющий связан с изменениями частоты генерации непосредственно от воздействия внешнего сигнала. Второй обусловлен преобразованием автодинных изменений амплитуды  $a(t)$  в изменения частоты колебаний вследствие неизохронности генератора. В случае синфазного сложения этих факторов при увеличении частоты  $\Omega_6^H$  одного знака автодинная девиация возрастает; в противном случае противофазного сложения при увеличении частоты  $\Omega_6^H$  другого знака она уменьшается. В этом состоит физический смысл явления частотной дисперсии автодинной девиации частоты [39]. В рассматриваемом случае неизодромного генератора ( $\rho \neq 0$ ) составляющая, обусловленная его неизохронностью, определяется еще одним, дополнительным фактором. Он связан с наличием в СВЧ генераторах внутренней обратной связи через его неизохронность и неизодромность, она определяется через входящее в (24)–(26) и (33) произведение  $\gamma\rho$  как петлевое усиление [27].

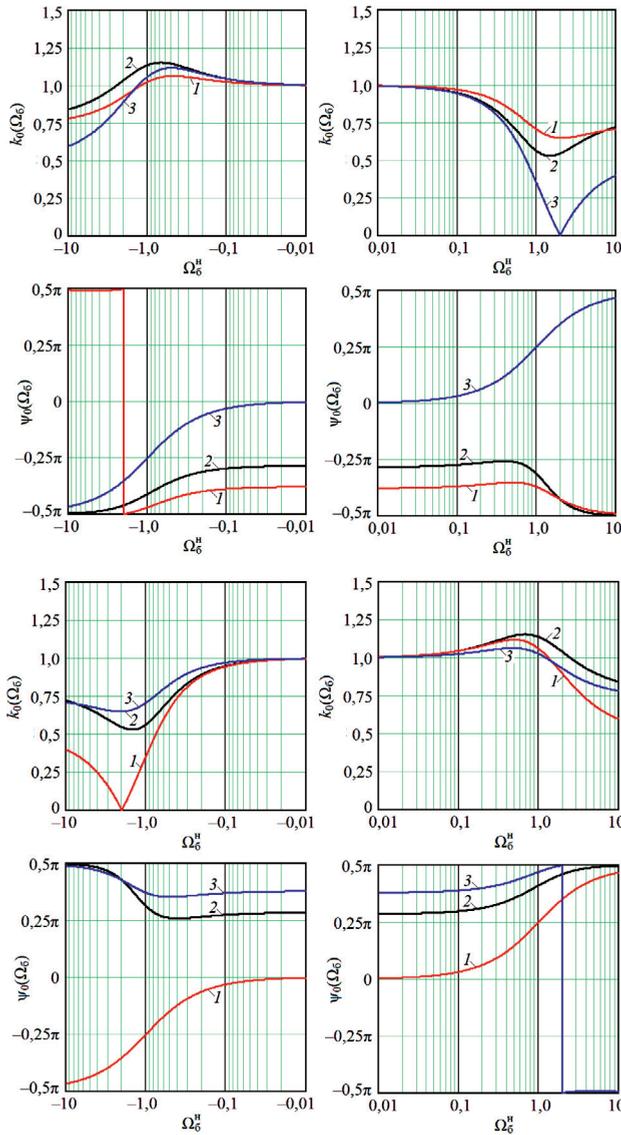
Характеристики  $k_0(\Omega_6)$  и  $\psi_0(\Omega_6)$  на рис. 4 отражают результат амплитудно-фазового сложения выделенного в цепи смещения АД отклика по изменениям амплитуды (21)  $a(t)$  и детектирования отклика (22) по изменениям частоты  $\chi_{\text{нр}}(t)$ , что видно из выражения (23). Поэтому частотная зависимость  $k_0(\Omega_6)$  в общем случае также имеет некоторую асимметрию характеристики, которая обусловлена явлением частотного детектирования ( $\kappa_{\text{чд}} \neq 0$ ). Фазовое смещение  $\psi_0(\Omega_6)$  автодинного отклика также имеет сложную зависимость от частоты  $\Omega_6^H$ , причем при разных знаках коэффициентов  $\gamma$  и  $\kappa_{\text{чд}}$  зависимости  $\psi_0(\Omega_6)$  (см. рис. 4, I и IV) подобны характеристикам  $\psi_a(\Omega_6)$  (см. рис. 2). Отличия их состоят в наличии дополнительных фазовых смещений по оси ординат за счет частотного детектирования. В случае разных знаков коэффициентов  $\gamma$  и  $\kappa_{\text{чд}}$  эти характеристики имеют еще более сложный вид, который определяется в сильной степени величиной коэффициента  $\pi$  (см. рис. 4, II и III). Естественно, при отсутствии у генера-

тора явления частотного детектирования ( $\kappa_{\text{чд}} = 0$ ) характеристики  $k_0(\Omega_6)$  и  $\psi_0(\Omega_6)$  совпадают с характеристиками  $k_a(\Omega_6)$  и  $\psi_a(\Omega_6)$ .



**Рис. 4.** Графики частотных зависимостей нормированных коэффициентов автодетектирования  $k_0(\Omega_6)$  и углов фазового смещения  $\psi_0(\Omega_6)$ , рассчитанные при различных значениях коэффициентов  $\gamma$  и  $\kappa_{\text{чд}}$ :  $\gamma = 1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0,5$  (I);  $\gamma = 1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0,5$  (II);  $\gamma = -1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0,5$  (III);  $\gamma = -1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0,5$  (IV) и коэффициента неизодромности  $\rho$ :  $\rho = -0,5$  (кривые 1);  $\rho = 0$  (кривые 2);  $\rho = 0,5$  (кривые 3)

**Fig. 4.** Plots of the frequency dependences of the normalized auto-detection coefficients  $k_0(\Omega_6)$  and phase shift angles  $\psi_0(\Omega_6)$ , calculated for different values of the coefficients  $\gamma$  and  $\kappa_{\text{чд}}$ :  $\gamma = 1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0.5$  (I);  $\gamma = 1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0.5$  (II);  $\gamma = -1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0.5$  (III);  $\gamma = -1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0.5$  (IV) and non-isodromic coefficient  $\rho$ :  $\rho = -0.5$  (curves 1);  $\rho = 0$  (curves 2);  $\rho = 0.5$  (curves 3)



III

IV

**Рис. 4.** Графики частотных зависимостей нормированных коэффициентов автодетектирования  $k_0(\Omega_6)$  и углов фазового смещения  $\psi_0(\Omega_6)$ , рассчитанные при различных значениях коэффициентов  $\gamma$  и  $\kappa_{\text{чд}}$ :  $\gamma = 1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0,5$  (I);  $\gamma = 1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0,5$  (II);  $\gamma = -1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0,5$  (III);  $\gamma = -1,2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0,5$  (IV) и коэффициента неиздромности  $\rho$ :  $\rho = -0,5$  (кривые 1);  $\rho = 0$  (кривые 2);  $\rho = 0,5$  (кривые 3) (Окончание)

**Fig. 4.** Plots of the frequency dependences of the normalized auto-detection coefficients  $k_0(\Omega_6)$  and phase shift angles  $\psi_0(\Omega_6)$ , calculated for different values of the coefficients  $\gamma$  and  $\kappa_{\text{чд}}$ :  $\gamma = 1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0.5$  (I);  $\gamma = 1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0.5$  (II);  $\gamma = -1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = -0.5$  (III);  $\gamma = -1.2$ ,  $\kappa_{\text{чд}} = 0.5$  (IV) and non-isodromic coefficient  $\rho$ :  $\rho = -0.5$  (curves 1);  $\rho = 0$  (curves 2);  $\rho = 0.5$  (curves 3) (End)

Выявленные нами особенности формирования сигнала ограничивают применение метода биений. Этот метод может использоваться для измерения предельной чувствительности АД, как радиоприемного устройства. Позволяет определить коэффициенты автодинного усиления  $K_a$ , девиации частоты  $L_a$  и автодетектирования  $K_0$ . Кроме того, исходя из определения граничной частоты  $\Omega_{\text{гр}}$  при снятии характеристики  $k_a(\Omega_a)$ , этот метод дает возможность определить постоянную времени автодинного отклика  $\tau_a$ .

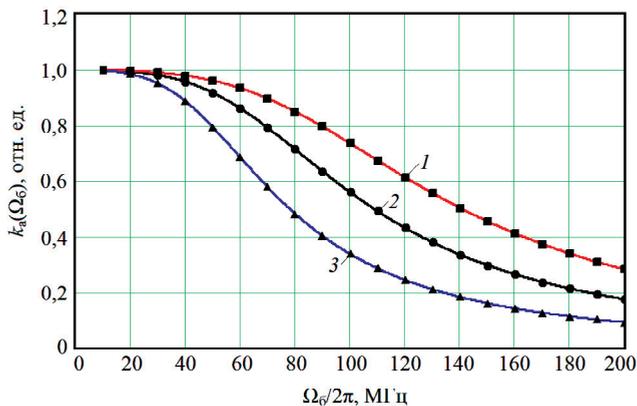
## 5. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования частотной зависимости коэффициента усиления методом биений выполнялись с генераторным модулем «Тигель-08», изготовленным по гибридно-интегральной технологии на планарном двухмезовом диоде Ганна 8-мм диапазона длин волн [27]. Частота генерации 37,5 ГГц, выходная мощность 15 мВт. На исследуемый модуль сигнал от измерительного генератора Г4-175 подавался через развязывающий вентиль и переменный аттенюатор ДЗ-37. Выходная мощность генератора Г4-175 составляла 1 мВт. Затухание аттенюатора устанавливалось 20 дБ во всем диапазоне отстройки частот.

Часть выходной мощности генераторного модуля «Тигель-08» отводилась через направленный ответвитель на вход анализатора спектра С4-60. С помощью анализатора спектра выполнялись измерения уровня сигнала биений по величине глучины модуляции амплитуды колебаний. Вид частотных характеристик сигнала биений, нормированных относительно их максимальных значений, представлен в виде графиков на рис. 5 для различных положений регулировочного винта связи с нагрузкой.

Граничная частота  $\Omega_{\text{гр}} / 2\pi$  характеристики 1 (см. рис. 5) составила 110 МГц, для 2 – 80 МГц и 3 – 60 МГц. При этом значения постоянной времени  $\tau_a$  автодинного отклика исследуемого генераторного модуля составили: для характеристики 1 – 1,4 нс, 2 – 2,0 нс и 3 – 2,6 нс. Сравнение полученных результатов расчета  $\tau_a$  с представленными в [28; 29] данными показывает их близость.

Значения внутренних параметров модуля «Тигель-08» следующие:  $\rho = -0,187$ ,  $\gamma = 0,92$  и  $\alpha = 0,15$  [27]. Эти данные позволяют согласно (25) и (38) рассчитать коэффициент автодинного усиления  $K_a = 5,4$  и внешнюю добротность генераторного модуля. Так, для каждого случая связи модуля с нагрузкой в выбранном режиме работы имеем: для характеристики 1 –  $Q_{\text{вн}} = 70$ , для 2 –  $Q_{\text{вн}} = 90$  и для 3 –  $Q_{\text{вн}} = 130$ .



**Рис. 5.** Графики частотной зависимости нормированного коэффициента автодинного усиления генератора на диоде Ганна 8-мм диапазона, полученные для различных положений регулировочного винта связи: полностью выведен (кривая 1), введен на половину (кривая 2), полностью введен (кривая 3)

**Fig. 5.** Plots of the frequency dependence of the normalized autodyne gain of the generator on the 8-mm Gunn diode, obtained for various positions of the communication adjusting screw: fully withdrawn (curve 1), entered half (curve 2), fully entered (curve 3)

Простота снятия характеристик частотной зависимости – одно из достоинств метода биений. Этот метод особенно востребован при выполнении лабораторных исследований большого числа различных генераторов с целью их отбора и оптимизации режима колебаний в качестве АД.

## 6. Заключение

Разработана математическая модель одноконтурного СВЧ-генератора, находящегося под воздействием сигнала от стороннего источника. На основе этой модели рассмотрено формирование динамических модуляционных характеристик СВЧ-генераторов в режиме биений. При этом учтены внутренние свойства этих генераторов, таких как неизохронность, неизодромность и частотное детектирование. Анализ полученных характеристик показал, что только характеристика модуляции амплитуды колебаний совпадает с амплитудной характеристикой АД и может использоваться для определения постоянной времени автодинного отклика, характеризующей его динамические свойства. Частотные и автодетекторные характеристики генераторов при этом не имеют общих характерных признаков для их использования с указанной целью. Выполненные экспериментальные исследования динамических характеристик генераторов «Тигель-08М» методом биений подтвердили адекватность разрабо-

танной модели и показали, что все известные на сегодня методы дают близкие результаты оценки постоянной времени автодинного отклика.

Полученные результаты анализа представляются полезными при определении времени реакции автодинного СВЧ-генератора на воздействии внешнего асинхронного сигнала, а также при решении задач оптимального приема и обработки сигналов в режиме биений в различных системах. Такая задача в настоящее время возникла, например, при использовании АД в качестве приемопередатчика на борту шара-зонда для запросного радиолокатора в перспективной системе радиозондирования атмосферы [40]. В этих системах АД должен обладать достаточным быстродействием при приеме радиоимпульсов запросного радиолокатора для обеспечения требуемой точности измерения расстояния до шара-зонда.

### Список литературы

1. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929
2. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339
3. Gupta M-S., Lomax R. J., Haddad G. I. Noise consideration in self-mixing IMPATT-diode oscillators for short-range Doppler radar applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(1):37–43. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128158
4. Nygren T., Sjolund A. Sensitivity of Doppler radar with self-detecting diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(5):494–498. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128268
5. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд-во СГУ; 2003.
6. Jefford, P. A., Howes, M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
7. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood: Artech House; 2003.
8. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.000043882.16801.3a
9. Данилин А. И., Воторопин С. Д., Чернявский А. Ж. Использование автодинных приемопередаточных модулей на диодах Ганна для определения деформаций лопаток турбомашин. *11-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные*

технологии» (КрыМиКо 2001), Севастополь, 10–14 сент. 2001 г. Севастополь: Вебер; 2001. С. 654–656. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961705

10. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan*. 1975;58-B(5):60–66.

11. Соловьев Ю. Л., Рудаков А. В. Малогабаритное устройство миллиметрового диапазона для систем ближней радиолокации. 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2008), Севастополь, 8–12 сент. 2008 г. Севастополь: Вебер; 2008. С. 113. DOI: 10.1109/CRMICO.2008.4676311

12. Votoropin S. D. Autodyne sensors of the EHF range on Gunn diodes. In: *38th European Microwave Conference*. 2008. P. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709

13. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930

14. Armstrong B. M., Brown R., Rix F., Stewart J. A. C. Use of microstrip impedance-measurement technique in the design of a BARITT diplex Doppler sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1980;28(12):1437–1442. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130263

15. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M., Novak S., Margison S. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–954. DOI: 10.1049/el:19800679

16. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094

17. Efanov A. A., Diskus C. G., Stelzer A., Thim H. W., Lubke K., Springer A. L. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*. 1997;52(3):219–223. DOI: 10.1007/BF02996047.

18. Kim S., Nguyen C. A Displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.81.812575

19. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania, Vilnius. 2010. Vol. 2. P. 406–409.

20. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80

21. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9

22. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-2023-1

23. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. 2014. P. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447.

24. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. In: *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. 2016. P. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402
25. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418
26. Ветрова Ю. В., Дорошенко А. А., Постельга А. Э., Усанов Д. А. Дистанционный контроль движения поверхности объекта с использованием двухканального СВЧ-автодинного генератора. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(4):387–395. DOI: 10.1134/S0033849419040119
27. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ-генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–46.
28. Носков В. Я., Игнатков К. А. Влияние внутренних параметров автодинных СВЧ-генераторов на их динамические характеристики. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2012;(3):23–40.
29. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamic autodyne and modulation characteristics of microwave oscillators. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2013;72(10):919–934. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v72.i10.70
30. Гершензон Е. М., Калыгина В. М., Левит Б. И., Туманов Б. Н. Резонанс релаксационных колебаний в автодинных генераторах. *Известия вузов. Радиофизика*. 1981;24(8):1028–1034.
31. Braun R. M. *Self-mixing oscillators at Q-band using Gunn diode solid state sources*. University of Cape Town; 1982. Available at: <http://hdl.handle.net/11427/15665>
32. Pantoja F. R., Calazans E. T. Theoretical and experimental studies of gain compression of millimeter-wave self-oscillating mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;MTT-33(3):181–186. DOI: 10.1109/TMTT.1985.1132979
33. Flint R. A., Fan L., Navarro J. A., Chang K. Low cost and compact active integrated antenna transceiver for system applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996;44(10):1642–1649. DOI: 10.1109/22.538955
34. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. *Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний*. М.: Наука; 1974.
35. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293
36. Воторопин С. Д., Закарлюк Н. М., Носков В. Я., Смольский С. М. О принципиальной невозможности самосинхронизации автодина излучением, отраженным от движущегося объекта. *Известия вузов. Физика*. 2007;50(9):53–59.
37. Минаев М. И. Низкочастотный спектр автодинного преобразователя частоты. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1989;(7):12–14.
38. Минаев М. И., Ценципер Б. Л. Исследование автодинного смесителя частоты на диоде Ганна с большим динамическим диапазоном

изменения мощности внешнего сигнала. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1987;(4):30–33.

39. Носков В. Я. Динамические особенности автодинного отклика СВЧ-генератора. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 1992;35(9)9–16.

40. Иванов В. Э., Гусев А. В., Игнатков К. А., Кудинов С. И., Малыгин И. В., Носков В. Я., Плохих О. В., Рысев В. В., Черных О. А. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2015;(9):3–49.

## References

1. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929

2. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339

3. Gupta M-S., Lomax R.J., Haddad G.I. Noise consideration in self-mixing IMPATT-diode oscillators for short-range Doppler radar applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(1):37–43. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128158

4. Nygren T., Sjolund A. Sensitivity of Doppler radar with self-detecting diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(5):494–498. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128268

5. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V. *Physics of Semiconductor RF and Optical Autodynes*. Saratov: Saratov State University; 2003. (In Russ.).

6. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559

7. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood: Artech House; 2003.

8. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.000043882.16801.3a

9. Danilin A. I., Votoropin S. D., Tcherniavski A. G. Using of autodyne transceiver modules on Gunn diodes for determination of turbomachine blades deformations. In: *11<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2001, September 10–14*. Sevastopol: Veber; 2001, pp. 654–656. (In Russ.). DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961705654–656

10. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan*. 1975;58-B(5):60–66.

11. Solovyov Y. L., Rudakov A. V. The miniature module MM-wave range for radar systems. In: *18<sup>th</sup> International Crimean Conference*

“*Microwave & Telecommunication Technology*”, Sevastopol, 2008, September 8–12. Sevastopol: Veber; p. 113. (In Russ.). DOI: 10.1109/CRMICO.2008.4676311

12. Votoropin S. D. Autodyne sensors of the EHF range on Gunn diodes. In: *38<sup>th</sup> European Microwave Conference*. 2008, pp. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709

13. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930

14. Armstrong B. M., Brown R., Rix F., Stewart J. A. C. Use of microstrip impedance-measurement technique in the design of a BARITT diplex Doppler sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1980;28(12):1437–1442. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130263

15. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M., Novak S., Margison S. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–954. DOI: 10.1049/el:19800679

16. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094

17. Efanov A. A., Diskus C. G., Stelzer A., Thim H. W., Lubke K., Springer A. L. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*. 1997;52(3):219–223. DOI: 10.1007/BF02996047.

18. Kim S., Nguyen C. A displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.81.812575

19. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania, Vilnius. 2010. Vol. 2, pp. 406–409.

20. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80

21. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9

22. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-2023-1

23. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. 2014. P. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447

24. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. In: *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. 2016, pp. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402

25. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418

26. Vetrova Iu. V., Doroshenko A. A., Postelga A. E., Usanov D. A. Remote control of the surface movement of an object using a two-channel SHF autodyne generator. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(4):409–417. DOI: 10.1134/S1064226919040119
27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Autodyne characteristic dependence on the UHF oscillator's inherent parameters. *Radiotekhnika*. 2012;(6):24–46. (In Russ.)
28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Internal parameter influence of autodyne UHF oscillators upon its dynamic characteristics. *Electronic Techniques. Series 1. UHF technique*. 2012;(3):23–40.
29. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamic autodyne and modulation characteristics of microwave oscillators. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2013;72(10):919–934. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i10.70
30. Gershenson E. M., Kalygina V. M., Levit B. I., Tumanov B. N. Resonance of relaxation oscillations in autodyne oscillators. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1981;24(8):707–711. DOI: 10.1007/BF01034344
31. Braun R. M. *Self-Mixing Oscillators at Q-Band Using Gunn Diode Solid State Sources*. University of Cape Town; 1982. Available at: <http://hdl.handle.net/11427/15665>
32. Pantoja F. R., Calazans E. T. Theoretical and experimental studies of gain compression of millimeter-wave self-oscillating mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;MTT-33(3):181–186. DOI: 10.1109/TMTT.1985.1132979
33. Flint R. A., Fan L., Navarro J. A., Chang K. Low cost and compact active integrated antenna transceiver for system applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996;44(10):1642–1649. DOI: 10.1109/22.538955
34. Bogolyubov N. N., Mitropolskiy Yu. A. *Asymptotic Methods in the Theory of Nonlinear Oscillations*. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)
35. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293
36. Votoropin S. D., Zakarlyuk N. M., Noskov V. Ya. Smolskiy S. M. On principal impossibility of auto-synchronization of an autodyne by radiation reflected from a moving target. *Russian Physics Journal*. 2007;50(9):195–206. DOI: 10.1007/s11182-007-0132-2.
37. Minaev M. I. Low frequency spectrum of the autodyne frequency converter. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*. 1989;(7):12–14. (In Russ.)
38. Minaev M. I., Cenciper B. L. Investigation of the autodyne frequency mixer on the Gunn diode with a large dynamic range of variation of the external signal power. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*. 1987;(4):30–33. (In Russ.)
39. Noskov V. Ya. Dynamic features of the SHF oscillator autodyne response. *Izvestiya VUZ: Radioelektronika*. 1992;35(9):9–16. (In Russ.)
40. Ivanov V. E., Gusev A. V., Ignatkov K. A., Kudinov S. I., Malygin I. V., Noskov V. Ya., Plohih O. V., Ryisev V. V., Chernyih O. A.

Current status and development prospects of atmosphere radio sensing systems in Russia. *Uspehi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2015;(9):3–49. (In Russ.)

### **Информация об авторах**

**Носков Владислав Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32.

**Игнатков Кирилл Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32.

**Шайдуров Кирилл Дмитриевич** – ассистент департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32.

### **Information about the authors**

**Vladislav Ya. Noskov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

**Kirill A. Ignatkov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

**Kirill D. Shaydurov** – Assistant Professor, Department of Radio Electronics and Communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Поступила / Received: 24.07.2019

Принята в печать / Accepted: 10.09.2019