

Д. т. н. В. Я. НОСКОВ, К. А. ИГНАТКОВ, д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ<sup>1</sup>

Россия, Уральский федеральный университет (УПИ),  
<sup>1</sup>Московский энергетический институт – ТУ (МЭИ–ТУ)  
 E-mail: noskov@oko-ek.ru, SmolskiySM@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
 18.07 2011 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Г. П. ЕРМАК  
 (ИРЭ им. Усикова НАНУ, г. Харьков)

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ АВТОДИННОГО ОТКЛИКА ПРИ СИЛЬНОМ ОТРАЖЕННОМ СИГНАЛЕ

*Проведен анализ автодинного отклика в стабилизированных СВЧ-генераторах в случае сильного сигнала, когда амплитуда отраженной волны соизмерима с амплитудой собственных колебаний генератора.*

Одной из важнейших проблем систем ближней радиолокации (СБРЛ) как при гомодинном, так и при автодинном построении приемопередатчика является обеспечение их максимального динамического диапазона по уровню входного сигнала. Данная проблема связана с широким диапазоном изменения эффективной площади рассеяния (ЭПР) целей и изменения расстояния до отражающих объектов. Эти расстояния в реальных условиях работы СБРЛ могут изменяться от максимально возможных, определяемых энергетическим потенциалом системы, до непосредственного соприкосновения контролируемого объекта и СБРЛ [1—9]. В первом случае уровень отраженного излучения весьма мал и часто соизмерим с уровнем собственных шумов приемника, а во втором — он высок и сопоставим с уровнем зондирующего излучения передатчика. При этом во многих приложениях, например в радиовзрывателях для снарядов и ракет, радиоволновых датчиков охранной сигнализации, измерителях параметров изделий при их аэробаллистических испытаниях и пр., продолжительность нахождения цели в зоне контроля СБРЛ и время обработки принимаемых сигналов для выдачи команд, как правило, ограничены [6—9]. Поэтому в таких случаях для расширения динамического диапазона радиолокационных систем применение различных систем автоматики (типа АРУ) практически невозможно, поскольку они обладают известной инерционностью.

Особенно остро проблема динамического диапазона стоит в автодинных СБРЛ. Это связано с обнаруженными на рубеже 1970—1980-х годов специфическими искажениями автодинных сигналов у диодных СВЧ-генераторов миллиметрового диапазона, которые наблюдаются даже при малом уровне отраженного излучения [10, 11]. Природа этих искажений, как показано в [11], имеет принципиальный характер и связана с неравномерностью набега фазы отраженной волны вследствие автодинных изменений частоты генерации под воздействием отраженного излучения. Данные искажения, свойственные как

обычным автодинам с немодулированным излучением, так и автодинным генераторам с различными видами модуляции излучения (амплитудной, частотной, импульсной и смешанной) [11—16], в большинстве применений являются нежелательными, поскольку нарушают нормальную работу устройств обработки сигналов радиолокаторов, особенно в случае взаимодействия автодинного генератора с отраженным излучением от распределенного объекта [17].

Изучению проблемы искажений автодинных сигналов в различных автогенераторах и поиску методов борьбы с ними посвящено большое число работ. Среди этих методов были такие, где предлагалось использовать бигармонические генераторы [18], в том числе со стабилизацией частоты на второй гармонике [19], автодинные генераторы с внешней и взаимной синхронизацией [20, 21], радиоимпульсную модуляцию излучения генератора [22], а также различные варианты приемопередающих модулей [23—25].

Одно из наиболее эффективных решений проблемы было найдено при использовании в автодинных генераторах внешнего высокочастотного резонатора [13, 26, 27]. Стабилизация частоты с помощью этого резонатора не только значительно уменьшает степень искажения сигнала и улучшает спектр излучения СВЧ-генератора, но и повышает некоторые другие тактико-технические и эксплуатационные показатели автодинных СБРЛ [28, 29]. Однако такое техническое решение оказалось недостаточно радикальным. При увеличении уровня отраженного сигнала выше определенного значения в стабилизированном автодине также появляются искажения сигналов, вызванные автодинными изменениями частоты. Природа их появления связана не столько с неравномерностью набега фазы отраженного излучения (эти искажения могут быть пренебрежимо малы), сколько с внутренними свойствами самого генератора. Как показано в [30], в данном случае при автодинных изменениях частоты автоколебаний происходит дополнительная модуляция амплитуды генерации на нелинейном участке частотной зависимости резистивной проводимости колебательной системы. Эта модуляция, накладываемая на обычные автодинные изменения амплитуды колебаний, обусловленные изменениями фазы отраженной волны, вызывает дополнительные искажения сигнала, которые также создают трудности при их обработке.

В настоящей работе представлены результаты исследований стабилизированной автоколебательной системы для представляющего практический интерес случая сильного сигнала, когда амплитуда отраженной волны соизмерима с амплитудой собственных колебаний генератора. В случае сильного отраженного сигнала условия генерации автоколебаний в значительной степени определяются влиянием отраженной волны, и это влияние оказывается преобладающим над внутренними условиями генерации автономного генератора. Поэтому в этом случае локальная модель генератора трансформируется в принципиально иную, в которой собственно генератор и отражающий объект представляют собой распределенную колебательную систему, в которой генератор непосредственно работает на длинную линию [31]. Данную модель генератора можно трактовать также несколько иначе — как генератор с запаздывающей обратной связью, в которой время запаздывания определяется временем пробега излучения до отражателя и обратно [32, 33]. Сложная динамика таких систем, включая стохастическую, исследовалась теоретически и экспериментально в большом количестве работ, например в [31—38]. Как и любая распределенная система, данная система в общем случае обладает бесконечным числом степеней свободы и бесконечным набором собственных частот. В реальных СВЧ-генераторах количество состояний равновесия определяется как произведение коэффициента отражения на длину линии [38]. При изменении длины этой линии, что эквивалентно перемещению отражателя, в такой системе в зависимости от типа генератора можно наблюдать такие явления, как периодический срыв и возбуждение колебаний (в виде прерывистой генерации), регулярные и хаотические перескоки частоты и амплитуды колебаний.

Анализ общего случая произвольного времени запаздывания отраженного излучения в условиях большого сигнала, несомненно, представляет научный интерес, но в настоящей работе ограничимся исследованиями особенностей формирования автодинного отклика в условиях, когда отсутствуют срывы генерации и скачкообразные изменения режима автоколебаний во всем диапазоне изменения уровня отраженного излучения. Такие условия, представляющие нам наиболее привлекательными для практики, обеспечиваются в случае применения в генераторах так называемых неустойчивых активных элементов (АЭ) [39] и малого расстояния до отражателя (в зоне первой моды генерации), где и наблюдается обычно в автодинных СБРЛ сильный отраженный сигнал [13, 40]. В этом случае при анализе искажений в стабилизированном генераторе существенное значение имеет учет не только нелинейности частотной зависимости резистивной составляющей проводимости колебательной системы, но и нелинейности ее реактивной составляющей. Аналитические исследования при этом весьма затруднены, поэтому в настоящей работе такой анализ выполнен численными методами на основе разработанной математической модели автодинного генератора.

Численные методы, как известно, обладают известной степенью формализма. Для выявления закономерностей протекания каких-либо процессов в сложных системах они требуют выполнения достаточно большого объема вычислений с вариациями исходных данных. С целью минимизации объема этих вычислений авторами выбраны только «стандартные» варианты параметров автогенераторов (изохронный — неизохронный, изодромный — неизодромный<sup>1</sup>) и характерные условия работы автодинных систем.

### Основные уравнения для анализа автодинных генераторов при сильном отраженном сигнале

Для получения уравнений, описывающих процесс формирования автодинного отклика в условиях сильных отраженных сигналов, а также учитывающих внутренние параметры и основные особенности конструкции стабилизированных автодинных СВЧ-генераторов, рассмотрим эквивалентную схему, представленную на **рис. 1**. На ней  $Y_3$  — средняя за период колебаний электронная проводимость АЭ, которая в общем случае является зависимой от напряжения смещения  $E$ , амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний и имеет резистивную  $G_3$  и реактивную  $B_3$  составляющие:  $Y_3 = Y_3(E, A, \omega) = G_3(E, A, \omega) + jB_3(E, A, \omega)$ . АЭ непосредственно связан на СВЧ с основным (рабочим) резонатором, представленным на схеме эквивалентными емкостью  $C_1$ , индуктивностью  $L_1$  и проводимостью потерь  $G_{п1}$ , имеющим комплексную проводимость  $Y_p$ .

Стабилизирующий резонатор, представленный на схеме **рис. 1** аналогичными элементами  $C_2$ ,  $L_2$  и  $G_{п2}$ , связан посредством резистивной проводимости  $G_c$  и отрезка линии с волновой проводимостью  $\rho_d$  с основным резонатором. Длина  $l$  этой линии кратна половине длины волны излучения:  $l = n\lambda/2$ .  $C_0$  — емкость блокировочного конденсатора, обеспечивающего режим короткого замыкания по СВЧ.

Возникающие в генераторе при подаче от источника питания ИП смещения на АЭ колебания, имеющие амплитуду  $A$  и частоту  $\omega$ , выделяются на проводимости внешней нагрузки  $Y_n$  и излучаются в пространство в виде электромагнитного излучения через приемопередающую антенну. Воздействие на ге-

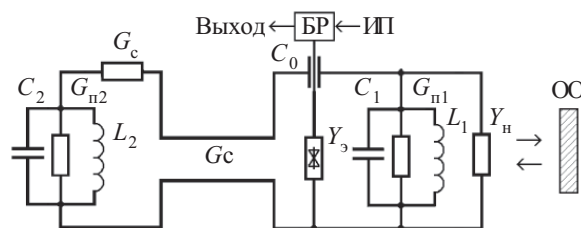


Рис. 1. Эквивалентная схема стабилизированного автодинного генератора

<sup>1</sup> **Изодромный** (isodromic, от греческого isos — одинаковый, равный и dromos — бер) **генератор** — автогенератор, у которого амплитуда колебаний не зависит от изменений частоты генерации. Неизодромный генератор предполагает такую зависимость [41].

нератор отраженного от объекта ОО излучения вызывает автодинный эффект, который заключается в изменениях амплитуды  $\Delta A$  и частоты  $\Delta \omega$  автоколебаний, а также среднего значения тока  $\Delta I_3$  АЭ. Последние в цепи питания АЭ преобразуются в напряжение выходного сигнала (сигнал «автотестирования») с помощью специальной схемы блока регистрации БР [42]. В некоторых конструкциях автодинных радиолокаторов полезный сигнал выделяется с помощью дополнительной схемы «внешнего детектирования», которая преобразует автодинные изменения амплитуды или частоты автоколебаний в напряжение выходного сигнала [17].

В соответствии с общей теорией СВЧ-генераторов уравнение автоколебаний для схемы рис. 1, приведенной к плоскости АЭ, имеет вид [28]

$$Y_{cp} + Y_3 + Y_p + Y_n = 0, \quad (1)$$

где  $Y_{cp}$ ,  $Y_p$  — комплексные проводимости стабилизирующего и рабочего резонаторов, приведенные к плоскости АЭ;  $Y_n$  — проводимость внешней нагрузки генератора, отображающая также воздействие отраженного от объекта излучения:

$$Y_n(t, \phi) = G_n(t, \tau) + jB_n(t, \tau); \quad (2)$$

$$G_n(t, \tau) = \frac{G_n[1 - \Gamma(t, \tau)^2]}{1 + \Gamma^2(t, \tau) + 2\Gamma(t, \tau)\cos\delta(t, \tau)};$$

$$B_n(t, \tau) = \frac{2G_n\Gamma(t, \tau)\sin\delta(t, \tau)}{1 + \Gamma^2(t, \tau) + 2\Gamma(t, \tau)\cos\delta(t, \tau)};$$

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma[U(t, \tau)/U(t)];$$

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

Здесь  $\Gamma(t, \tau)$  и  $\delta(t, \tau)$  — модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения [13, 43];  $U(t)$ ,  $U(t, \tau)$  и  $\Psi(t)$ ,  $\Psi(t, \tau)$  — амплитуда и фаза напряжения на нагрузке  $Y_n$ , создаваемого генератором в текущий момент времени  $t$  и в момент  $(t - \tau)$  из предыстории системы, соответственно. Величина  $\Gamma$  характеризует затухание излучения при его распространении до объекта и обратно, а  $\delta(t, \tau)$  — полный набег фазы отраженной волны за время  $\tau = 2s/c$  распространения излучения до отражающего объекта и обратно,  $s$  — расстояние до отражателя,  $c$  — скорость распространения излучения.

Выражение (1) после подстановки в него (2) и выражения для комплексной проводимости колебательной системы  $Y_{kc} = Y_{cp} + Y_p$  из [30] и выделения вещественной и мнимой частей примет вид

$$G_3 + G_1 \left[ 1 + \frac{\beta_1(1 + \beta_2 + 4Q_{c2}^2 v_{c2}^2)}{(1 + \beta_2)^2 + 4Q_{c2}^2 v_{c2}^2} + 2\Gamma(t, \tau)\eta g_n(t, \tau) \right] = 0; \quad (3)$$

$$B_3 + 2G_1 \left[ Q_{n1} v_{c1} + \frac{\beta_1 \beta_2 Q_{c2} v_{c2}}{(1 + \beta_2)^2 + 4Q_{c2}^2 v_{c2}^2} + \Gamma(t, \tau)\eta b_n(t, \tau) \right] = 0, \quad (4)$$

где  $G_1 = G_{n1} + G_n$ ;  $\eta = G_n/G_1 = Q_{n1}/Q_{n2}$  — кпд рабочего резонатора,  $Q_{n1} = \omega_{c1} C_1/G_1$ ,  $Q_{n2} = \omega_{c1} C_1/G_n$  — его нагруженная и внешняя добротности, соответственно;  $\beta_1 = G_c/G_1$ ,  $\beta_2 = G_c/G_{n2}$  — коэффициенты, характеризующие степень связи рабо-

чего и стабилизирующего резонаторов с линией передачи между ними;  $v_{c1} = (\omega - \omega_0)/\omega_{c1}$ ,  $v_{c2} = (\omega - \omega_{c2})/\omega_{c2}$  — относительные расстройки текущих частот соответственно первого и второго (стабилизирующего) резонаторов, имеющих собственные частоты  $\omega_{c1} = 1/(L_1 C_1)^{1/2}$ ,  $\omega_{c2} = 1/(L_2 C_2)^{1/2}$  и собственные добротности  $Q_{c1} = \omega_{c1} C_1/G_{n1}$ ,  $Q_{c2} = \omega_{c2} C_2/G_{n2}$ ;  $g_n(t, \tau)$ ,  $b_n(t, \tau)$  — нормированные изменения резистивной и реактивной проводимостей нагрузки в окрестности стационарного режима генератора:

$$g_n(t, \tau) = - \frac{\Gamma(t, \tau) + \cos\delta(t, \tau)}{1 + \Gamma(t, \tau)^2 + 2\Gamma(t, \tau)\cos\delta(t, \tau)}; \quad (5)$$

$$b_n(t, \tau) = \frac{\sin\delta(t, \tau)}{1 + \Gamma(t, \tau)^2 + 2\Gamma(t, \tau)\cos\delta(t, \tau)}. \quad (6)$$

Для облегчения анализа системы уравнений (3), (4) заменим нелинейные члены электронной проводимости  $Y_3 = G_3 + jB_3$  их квазилинейной аппроксимацией в окрестности режима стационарных колебаний и будем рассматривать происходящие в генераторе процессы, вызванные воздействием отраженного излучения, в относительных (безразмерных) вариациях параметров автоколебаний относительно этого режима. Такой подход вполне обоснован, поскольку составляющие проводимости  $Y_3$  являются более «медленными» функциями частоты, чем проводимость колебательной системы  $Y_{kc}$ . Кроме того, ограничим настоящие исследования случаем выделения автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний с помощью внешнего детектирования при фиксированном напряжении смещения на АЭ:  $E = E_0$ .

Следуя изложенной логике анализа, из системы уравнений (3) и (4) с учетом условий стационарного режима (см. (13), (14) в [30]) автономного генератора (при  $\Gamma(t, \tau) = 0$ ), близости значений частот  $\omega_{c1}$ ,  $\omega_{c2}$  и  $\omega_0$  и разложения функций  $G_3$  и  $B_3$  в ряды Тейлора (см. (15) — (18) в [30]) получим систему линейризованных уравнений для определения относительных изменений амплитуды  $a_1 = \Delta A/A_0$  и частоты  $\chi = \Delta\omega/\omega_0$  колебаний для генератора, стабилизированного внешним резонатором:

$$\alpha_{11} a_1 + \varepsilon_{11} \chi + g_{kc}(\chi) + \Gamma(t, \tau)\eta g_n(t, \tau) = 0; \quad (7)$$

$$\beta_{11} a_1 + \xi_{11} \chi + b_{kc}(\chi) + \Gamma(t, \tau)\eta b_n(t, \tau) = 0, \quad (8)$$

где  $\alpha_{11} = (A_0/2G_{30})(\partial G_3/\partial A)_0$  — приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла;  $\varepsilon_{11} = (\omega_0/2G_{30})(\partial G_3/\partial \omega)_0$  — параметр, определяющий неизодроность генератора, учитывающий влияние изменений частоты на амплитуду колебаний через электронную проводимость АЭ;  $\beta_{11} = (A_0/2B_{30})(\partial B_3/\partial A)_0 \tan\theta$  — параметр, определяющий неизохронность генератора;  $\xi_{11} = (\omega_0/2B_{30})(\partial B_3/\partial \omega)_0 \tan\theta$  — параметр стабилизации частоты учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости АЭ;  $g_{kc}(\chi)$ ,  $b_{kc}(\chi)$  — нормированные изменения резистивной и реактивной составляющих проводимости колебательной системы в окрестности стационарного режима генератора:

$$g_{kc}(\chi) = \frac{\beta_1}{2} \left[ \frac{(1 + \beta_2) + (2Q_{c2}\chi + \theta)^2}{(1 + \beta_2)^2 + (2Q_{c2}\chi + \theta)^2} - \frac{(1 + \beta_2) + \theta^2}{(1 + \beta_2)^2 + \theta^2} \right], \quad (9)$$

$$b_{\text{к}}(\chi) = Q_{\text{н}}\chi + \frac{1}{2} \left[ \frac{\beta_1\beta_2(2Q_{\text{с}}\chi + \vartheta)}{(1 + \beta_2)^2 + (2Q_{\text{с}}\chi + \vartheta)^2} - \frac{\beta_1\beta_2\vartheta}{(1 + \beta_2)^2 + \vartheta^2} \right]; \quad (10)$$

$v = v_{02}/v_{\text{гр}}$  — нормированная расстройка частоты стабилизирующего резонатора относительно его граничного значения  $v_{\text{гр}} = 1/(2Q_{\text{с}})$ ;  $v_{02} = (\omega_0 - \omega_{\text{с}})/\omega_{\text{с}}$  — относительная расстройка собственной частоты  $\omega_{\text{с}}$  второго резонатора от частоты  $\omega_0$  стационарных колебаний автономного генератора. Дифференциальные параметры АЭ  $\alpha_{11}$ ,  $\varepsilon_{11}$ ,  $\beta_{11}$  и  $\xi_{11}$  в формулах (7), (8) могут быть рассчитаны для конкретной реализации генератора или определены экспериментально.

Полученная система уравнений (7), (8) описывает стационарные значения и квазистатические изменения амплитуды и частоты автодинных генераторов как при малых, так и при больших уровнях отраженного излучения, а также при произвольной величине времени его запаздывания. Отметим, что при  $\beta_1 = 0$  данные выражения соответствуют случаю одноконтурного автодина, рассмотренного в [11, 13, 40].

В реальных условиях функционирования СБРЛ большой уровень отраженного излучения, соизмеримый с амплитудой собственных колебаний генератора, наблюдается на сравнительно малых расстояниях до отражателя. При таких условиях работы автодина, несмотря даже на значительные изменения параметров колебаний, вполне допустимо для упрощения дальнейшего анализа установившихся значений автодинного отклика разложить параметры запаздывающего воздействия  $\Gamma(t, \tau)$  и  $\delta(t, \tau)$  в ряды Тейлора по малому времени запаздывания  $\tau$  по сравнению с текущим временем  $t$ :  $\tau \ll t$  [13, 32]. Ограничиваясь при этом двумя первыми членами разложений, получим решения первого приближения для модуля и фазы коэффициента отражения в виде  $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$ ,  $\delta(t, \tau) = \omega\tau$ .

С учетом данного разложения получим окончательные выражения для дальнейшего численного анализа автодинного генератора. Для этого совместным решением (6) и (7), исключая из первого выражения переменную  $\chi$ , а из второго —  $a_1$ , после элементарных преобразований, полагая  $\eta = 1$ , получим

$$a_1/K_a + g_{\text{н}}(\eta) + \Gamma g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = 0; \quad (11)$$

$$\chi/L_a + b_{\text{н}}(\chi) + \Gamma b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = 0, \quad (12)$$

где  $K_a = 1/[\alpha_{11}(1 - \gamma\rho)]$ ,  $L_a = 1/[\xi_{11}(1 - \gamma\rho)]$  — коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации;  $g_{\text{н}}(\chi) = g_{\text{к}}(\chi) - \rho b_{\text{к}}(\chi)$ ,  $b_{\text{н}}(\chi) = b_{\text{к}}(\chi) - \gamma g_{\text{к}}(\chi)$  — нормированные резистивная и реактивная составляющие проводимости колебательной системы с учетом неизохронности и неизодромности генератора;  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) - \rho b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ ,  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) - \gamma g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  — то же самое для нагрузки;  $\gamma = \beta_{11}/\alpha_{11}$ ,  $\rho = \varepsilon_{11}/\xi_{11}$  — коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора.

При этом выражение для фазы  $\delta(t, \tau)$ , которая входит в формулы (5), (6) для вычислений проводимостей  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  и  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ , примет вид

$$\delta(t, \tau) = \delta(\chi, \tau_{\text{н}}) = 2\pi(1 + \chi)(N + \tau_{\text{н}}), \quad (13)$$

где  $N = 2s/\lambda$  — целое число полуволн, укладывающихся между отражающим объектом и генератором;  $\tau_{\text{н}} = \omega_0\tau$  — нормированное (безразмерное) время.

Решение системы уравнений (11), (12) с учетом (13) позволяет проводить анализ особенностей формирования автодинного отклика по изменению амплитуды  $a_1$  и частоты  $\chi$  колебаний при изменении  $\tau_{\text{н}}$  на отдельных фрагментах расстояния  $s$  до отражателя.

### Анализ влияния нагрузки генератора на процесс формирования автодинного отклика

Суть автодинного эффекта состоит в реакции генератора на воздействие собственного отраженного излучения. Это воздействие, эквивалентное изменению удаленной на некоторое расстояние нагрузки, вносит в колебательную систему генератора вариации резистивной и реактивной проводимости, которые приводят к соответствующим автодинным изменениям амплитуды и частоты колебаний. В случае слабого отраженного излучения амплитуда автодинного отклика генератора обычно прямо пропорциональна уровню отраженного излучения, а форма его близка к гармонической. Однако в случае большого уровня отраженного излучения такая пропорциональность отклика нарушается. Кроме того, на процесс формирования отклика оказывают влияние характеристики колебательной системы и АЭ генератора и величина расстояния до отражающего объекта. В определенных условиях в автодинном генераторе при перемещении отражателя могут возникать скачкообразные изменения амплитуды и частоты колебаний, связанные с нарушением условий устойчивости режима.

Для выяснения влияния отмеченных факторов на особенности формирования автодинного отклика рассмотрим на основании системы уравнений (11), (12) с учетом (5), (6) поведение относительных составляющих проводимостей  $g_{\text{н}}$  и  $b_{\text{н}}$  нагрузки в зависимости от относительных изменений безразмерного времени  $\tau_{\text{н}}$  с учетом вносимых АЭ параметров неизохронности  $\gamma$  и неизодромности  $\rho$  генератора. При этом величину времени запаздывания отраженного излучения учитывать не будем, полагая в (13)  $N = 0$ .

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3. Из анализа полученных результатов видно, что при малом уровне отраженного излучения, когда  $\Gamma < 0,1$ , изменения реактивной  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  и резистивной  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  проводимостей практически гармонические (см. рис. 2), неизохронность генератора и его неизодромность вызывают лишь их относительные фазовые смещения. Из анализа выражений (13) и графиков рис. 2, а следует также, что в случае изохронного и изодромного генератора  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  является четной функцией времени  $\tau_{\text{н}}$ , а  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  — нечетной. Это означает, что при смене направления перемещения отражателя (знака при  $\tau_{\text{н}}$ ) вид графиков  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  не изменяется, а графики  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  зеркально переворачиваются относительно оси абсцисс. При этом в случае заметных искажений характеристик, когда  $\Gamma > 0,1$ , порядок следования пологих и крутых участков функции  $b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$  при изменении  $\tau_{\text{н}}$  меняется на обратный, чего нельзя отметить в отношении функции  $g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ . В случае неизохронного генератора ( $\gamma \neq 0$ ) при сильном отраженном сигнале (см. кривые 2 на рис. 2, а, б) смена знака при коэффициенте  $\gamma$  вызывает изменение не только порядка следования крутых и пологих участков на гра-

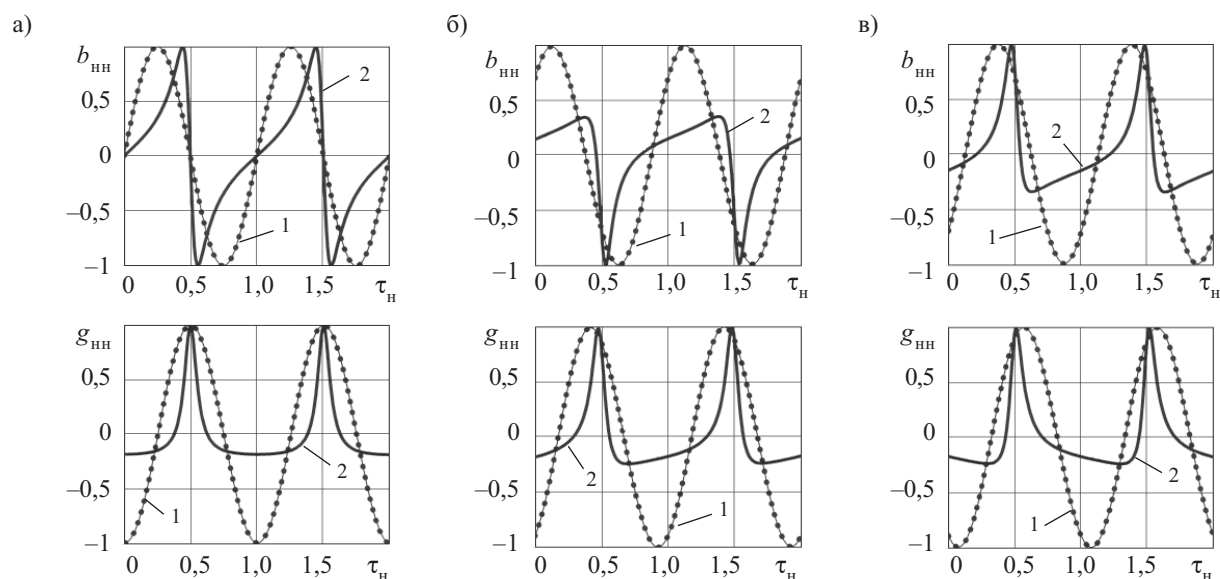


Рис. 2. Зависимости  $b_n$  и  $g_n$  от нормированного времени  $\tau_n$ , рассчитанные при  $\Gamma=0,01$  (кривые 1) и  $\Gamma=0,5$  (кривые 2) и различных значениях коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ :  
 а —  $\gamma=\rho=0$ ; б —  $\gamma=-0,5$ ,  $\rho=0,5$ ; в —  $\gamma=0,5$ ,  $\rho=-0,5$

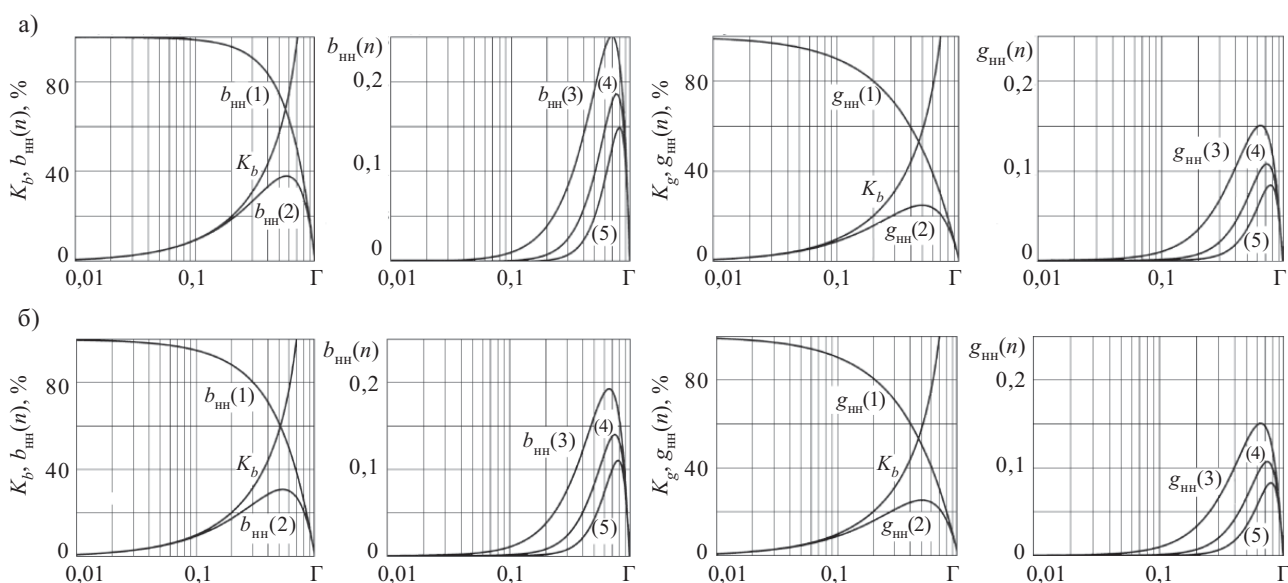


Рис. 3. Зависимости коэффициентов гармоник  $K_b$  и  $K_g$ , а также уровней первых пяти гармоник реактивной  $b_n(n)$  и резистивной  $g_n(n)$  проводимостей от величины коэффициента отражения  $\Gamma$ , рассчитанные при  $\gamma=\rho=0$  (а) и  $\gamma=\pm 1$ ,  $\rho=\pm 0,5$  (б) ( $n = 1, 2, \dots, 5$  — порядковый номер гармоники,  $F_n=1/T_n$  — нормированная частота изменений проводимости,  $T_n$  — нормированный период))

фиках зависимости  $b_n(\tau_n)$ , но и полярности следования острых и плоских полувольт. В случае же неизотропного генератора ( $\rho \neq 0$ ) смена знака при коэффициенте  $\rho$  вызывает изменение только порядка следования крутых и пологих участков на графиках зависимости  $g_n(\tau_n)$ .

Сравнивая графики зависимостей  $b_n(\tau_n)$  и  $g_n(\tau_n)$  с экспериментальными графиками соответственно частотной и амплитудной характеристик, представленными в [13, 40], можно увидеть, что последние практически повторяют первые, но с инверсией мгновенных значений. Это позволяет заключить, что искаже-

ния автодинного отклика в случае большого отраженного сигнала обусловлены преимущественно влиянием «нелинейности» нагрузки генератора, а не ограничением сигнала электронной проводимостью АЭ, как предполагалось в [40].

В целом, как видно из графиков рис. 3, характер зависимостей  $K_b$  и  $K_g$ , а также гармонических составляющих реактивной  $b_n(n)$  и резистивной  $g_n(n)$  проводимостей одинаков; есть небольшие отличия графиков гармоник реактивной проводимости изотропного и изотропного генератора (см. рис. 3, а). При величине модуля коэффициента отражения  $\Gamma=0,1$

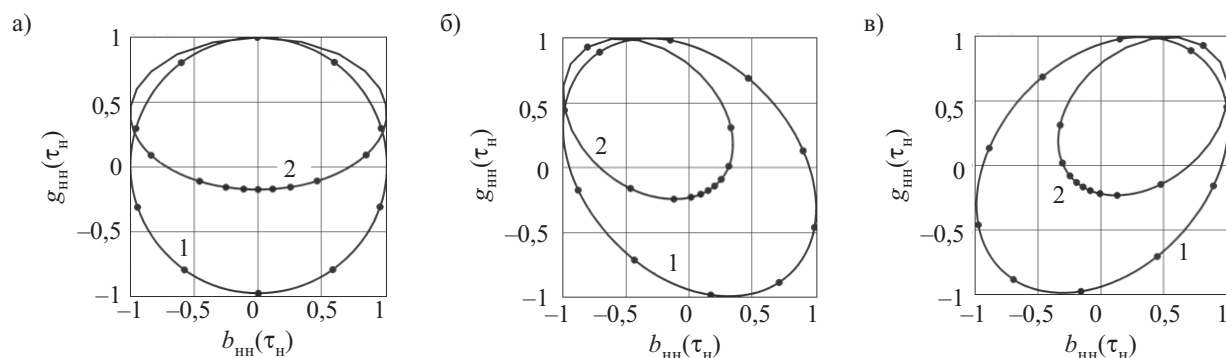


Рис. 4. Диаграммы резистивной  $g_{nn}(\tau_n)$  и реактивной  $b_{nn}(\tau_n)$  проводимостей нагрузки на комплексной плоскости, рассчитанные при  $\Gamma=0,01$  (кривые 1) и  $\Gamma=0,7$  (кривые 2) и различных значениях коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ :  
 а —  $\gamma=\rho=0$ ; б —  $\gamma=1, \rho=-0,5$ ; в —  $\gamma=-1, \rho=0,5$

коэффициенты гармоник  $K_b$  и  $K_g$  не превышают 10%, и для качественных исследований рассматриваемых процессов в автодинных СВЧ-генераторах таким уровнем гармоник можно пренебречь. Поэтому в случае когда  $\Gamma < 0,1$ , при анализе автодинных СВЧ-генераторов вполне допустимо использование приближенных выражений для вычисления проводимости нагрузки [11, 13, 26—29].

При увеличении модуля коэффициента отражения, когда  $\Gamma > 0,1$ , как видно из графиков рис. 2 и 3, наблюдается значительное увеличение искажений изменений проводимостей  $b_{nn}(\tau_n)$  и  $g_{nn}(\tau_n)$ , резкий рост уровня высших гармоник этих функций и существенное уменьшение уровня первых гармонических составляющих  $g_{nn}(1)$  и  $b_{nn}(1)$ . Коэффициенты гармоник  $K_b$  и  $K_g$  достигают 100% на всех графиках при  $\Gamma=0,7$ . В окрестности этого значения  $\Gamma$  отмечается наибольший подъем уровня высших гармоник, а при дальнейшем росте коэффициента отражения — резкий спад до нуля при  $\Gamma=1$ .

На рис. 4 представлены результаты расчетов нормированных относительно максимальных абсолютных значений характеристик  $b_{nn}(\tau_n)$  и  $g_{nn}(\tau_n)$  в виде годографов на комплексной плоскости, повернутой на угол  $\pi/2$ . Точками на этих годографах выделены значения, которые принимают проводимости  $b_{nn}(\tau_n)$  и  $g_{nn}(\tau_n)$  через интервалы времени  $\Delta\tau_n$ , равные изменениям нормированного времени на одну десятую от времени полного оборота годографа:  $\Delta\tau_n=0,1$ . В случае  $\Gamma \ll 1$  (см. кривые 1) годографы имеют форму окружности, полностью заполняющей квадрат нормированной комплексной плоскости, для изохронного генератора (см. рис. 4, а) и эллипса для неизохронного генератора (см. рис. 4, б, в). При этом длина интервалов между точками на годографах практически одинакова, что указывает на равномерность движения изображающей точки по годографам при изменении  $\tau_n$ . При большом же коэффициенте отражения  $\Gamma$  (см. кривые 2) движение изображающей точки по годографу является неравномерным, что хорошо видно по интервалам между точками. При этом эллипсы не полностью заполняют квадрат нормированной комплексной плоскости из-за смещения средних значений величин  $b_{nn}(\tau_n)$  и  $g_{nn}(\tau_n)$  за период изменения  $\tau_n$ . Углы наклона эллипсов годографов проводи-

мости нагрузки совпадают с углами наклона эллипсов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) автодинного отклика генератора, построенных для одних и тех же коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ . В случае одинаковых знаков при коэффициентах  $\gamma$  и  $\rho$  эллипсы годографов и АЧХ уменьшают размер малой оси, а в случае разных знаков — увеличивают. Причем, при условии  $\gamma = -\rho$  эллипс годографа проводимости нагрузки вырождается в окружность.

Радиус-вектор годографов на комплексной плоскости представляет собой модуль нормированной комплексной проводимости  $y_{nn}(\tau_n) = \{[g_{nn}(\tau_n)]^2 + [b_{nn}(\tau_n)]^2\}^{1/2}$ , а угол между этим вектором и осью резистивной проводимости  $g_{nn}(\tau_n)$  находится как  $\varphi(\tau_n) = \arctg[b_{nn}(\tau_n)/g_{nn}(\tau_n)]$ . Результаты расчетов величин  $y_{nn}(\tau_n)$  и производной  $\Omega_n(\tau_n) = d\varphi(\tau_n)/d\tau_n$ , характеризующей угловую скорость вращения радиус-вектора, для случаев слабого и сильного отраженного сигнала представлены на рис. 5.

Радиус-вектор  $y_{nn}(\tau_n)$  для изохронного и изодромного генератора ( $\gamma=\rho=0$ ) имеет постоянную величину, равную единичному радиусу окружности (см. кривые 1 на рис. 5, а), и вращается с постоянной скоростью ( $2\pi$ ) только при малом отраженном сигнале, когда  $\Gamma \ll 1$ . Во всех остальных случаях наблюдается изменение его длины и неравномерность вращения при изменении величины  $\tau_n$ . В случае слабого отраженного сигнала вариации скорости вращения обусловлены эллипсовидностью формы годографа проводимости (см. рис. 4, б и в), когда  $\gamma \neq 0$  и  $\rho \neq 0$ . В случае сильного сигнала кроме этого существенное влияние оказывает также «деформация» этого годографа вследствие изменений длины радиус-вектора. Из сравнения характеристик рис. 5, б и в видно, что в случае когда знаки при коэффициентах  $\gamma$  и  $\rho$  одинаковы, амплитуда этих изменений больше, чем при их различии.

Для рассмотрения процесса преобразования изменений нагрузки в автодинный отклик генератора в «чистом виде», без влияния посторонних факторов, необходимо чтобы в выражениях (11) и (12) слагаемые  $g_{kn}(\chi)$  и  $b_{kn}(\chi)$  были линейными функциями частоты. Такими свойствами обладает одноконтурная колебательная система в окрестности собственной частоты  $\omega_{c1}$ , для которой  $b_{kc}(\chi) = Q_{n1}\chi$ ,  $g_{kc}(\chi) = 0$ .

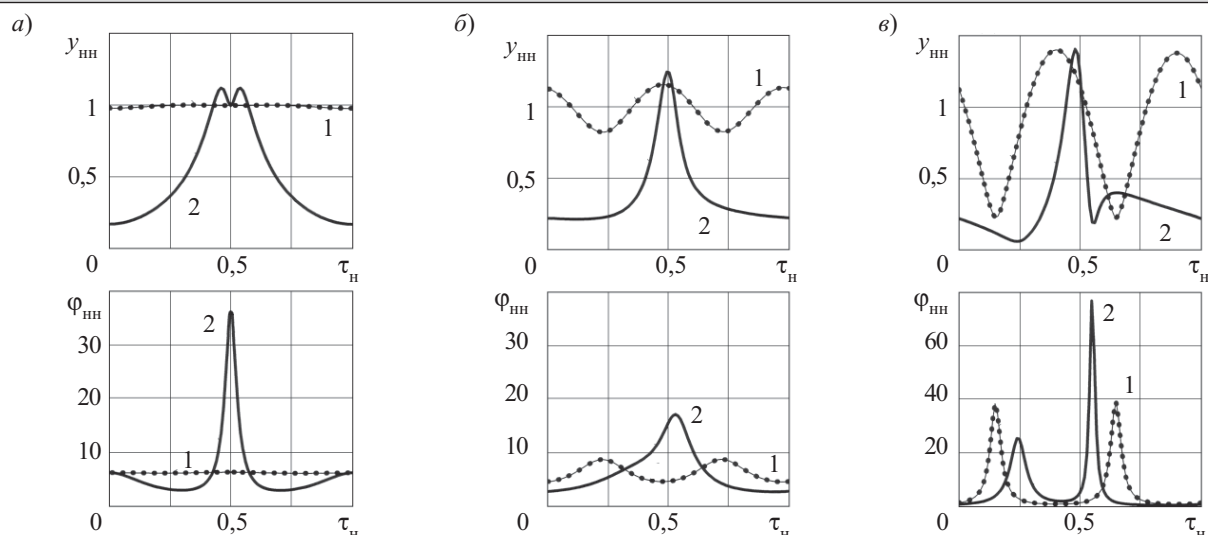


Рис. 5. Характеристики радиус-векторов  $y_{nn}(\tau_n)$  и угловой скорости его вращения  $\Omega_{1n}(\tau_n)$ , рассчитанные при  $\Gamma = 0,01$  (кривые 1),  $\Gamma = 0,5$  (кривые 2) и различных значениях коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ :  
 $a - \gamma = \rho = 0$ ;  $b - \gamma = 1, \rho = -0,5$ ;  $c - \gamma = 1, \rho = 0,5$

Тогда в результате расчетов согласно уравнений (11) и (12), которые в данном случае разрешаются независимо, получаем зависимости нормированных изменений частоты  $\chi_n(\tau_n)$  и амплитуды  $a_{n1}(\tau_n)$  колебаний, которые имеют аналогичный зависимостям  $b_{nn}(\tau_n)$  и  $g_{nn}(\tau_n)$  вид, соответственно, но с инверсией. Аналогичным образом инвертируются диаграммы комплексной проводимости нагрузки (см. рис. 4) в АЧХ автодинного генератора с сохранением эксцентриситета и ориентации осей эллипсов. При этом графики зависимостей коэффициентов  $K_b$  и  $K_g$ , а также уровней первых пяти гармоник реактивной  $b_{nn}(n)$  и резистивной  $g_{nn}(n)$  проводимостей от величины модуля коэффициента отражения  $\Gamma$ , представленные на рис. 3, полностью соответствуют таким же зависимостям для коэффициентов гармоник отклика по изменению частоты  $K_\chi$  и амплитуды  $K_\Gamma$  колебаний и относительного уровня гармоник  $\chi_n(n)$  и  $a_{n1}(n)$ , соответственно. Полученные результаты говорят о том, что в автодинах с одноконтурной колебательной системой формирование автодинного отклика полностью определяется поведением реактивной  $b_{nn}(n)$  и резистивной  $g_{nn}(n)$  составляющих проводимости нагрузки.

Из выполненных исследований можно сделать вывод, что основной причиной искажений автодинного отклика СВЧ-генераторов в случае большого отраженного сигнала при равномерном изменении фазы коэффициента отражения является негармоничность изменения резистивной и реактивной составляющих комплексной проводимости нагрузки генератора. Дополнительным фактором, вызывающим искажения при этом, является влияние внутренних свойств (неизохронность и неизодромность) генератора.

#### Анализ влияния составляющих проводимости колебательной системы генератора на процесс формирования автодинного отклика

Для выяснения влияния характеристик колебательной системы и параметров АЭ стабилизированного генератора на особенности формирования автодин-

ного отклика рассмотрим сначала поведение составляющих относительных проводимостей  $g_{kn}$  и  $b_{kn}$  колебательной системы генератора в зависимости от относительных изменений частоты  $\chi$  в окрестности стационарного режима колебаний, а затем — сам процесс формирования отклика.

Рассчитанные согласно (11) и (12) с учетом (9) и (10) графики частотных зависимостей нормированных проводимостей  $g_{kn}(\chi)$  и  $b_{kn}(\chi)$  представлены на рис. 6. При их расчете было учтено условие согласования линии связи со стабилизирующим резонатором, когда  $\beta_2 = 1$ , и принимались различные значения параметра  $\beta_1$ , определяющего степень связи резонаторов, а также изменялись коэффициенты неизохронности  $\gamma$  и неизодромности  $\rho$  генератора. Отметим здесь, что характеристики, полученные при  $\beta_1 = 0$  (см. кривые 1), соответствуют случаю автодина с одноконтурной колебательной системой.

Анализируя графики рис. 6, а, полученные для изохронного ( $\gamma = 0$ ) и изодромного ( $\rho = 0$ ) генератора, отметим, что характеристики частотной зависимости реактивной  $b_{kn}(\chi)$  составляющей проводимости колебательной системы при условии точной настройки стабилизирующего резонатора, когда  $\nu = 0$ , обладают центральной симметрией, а характеристики резистивной  $g_{kn}(\chi)$  составляющей — осевой. При этом в случае слабой связи между резонаторами, когда  $\beta_1 \leq \beta_{кр}$ , характеристики  $b_{kn}(\chi)$  являются однозначными функциями частоты (см. кривые 1—3), а при сильной связи, когда  $\beta_1 \geq \beta_{кр}$ , на графиках появляются прогибы (см. кривые 4), что было отмечено также в [30]. Участки графиков этих зависимостей, где их производные имеют отрицательный знак, являются неустойчивыми [44]. В первом случае рабочая точка на характеристиках  $b_{kn}(\chi)$  вследствие автодинных изменений частоты перемещается непрерывно, без разрывов траектории. Во втором же случае в движении рабочей точки наблюдается качественно иная картина: в процессе перемещения она минует неустойчи-

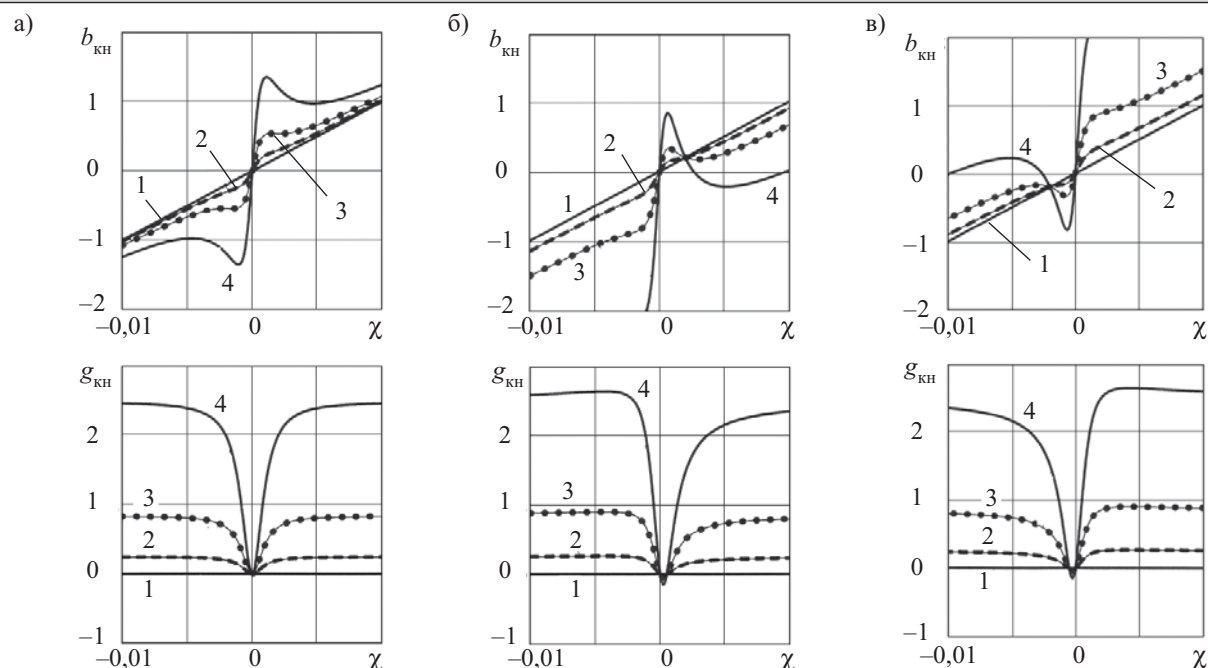


Рис. 6. Зависимости  $b_{\text{кн}}$  и  $g_{\text{кн}}$  от относительных изменений частоты  $\chi$ , рассчитанные при  $Q_{\text{н1}}=100$ ;  $Q_{\text{с2}}=1000$ ;  $\nu=0$  и различных значениях параметра  $\beta_1$  и коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$ :

1 —  $\beta_1=0$ ; 2 —  $\beta_1=1$ ; 3 —  $\beta_1=3,4$ ; 4 —  $\beta_1=10$ ;  
 а —  $\gamma=\rho=0$ ; б —  $\gamma=0,5$ ,  $\rho=0,5$ ; в —  $\gamma=-0,5$ ,  $\rho=-0,5$

вые участки с отрицательной производной скачком с гистерезисными явлениями.

Наличием острого провала на характеристике  $g_{\text{кн}}(\chi)$  объясняется резкий рост активной проводимости колебательной системы при автодинных изменениях частоты генерации в любую сторону — как при ее увеличении, так и при уменьшении относительно  $\chi=0$ . При этом возникает дополнительная модуляция амплитуды колебаний с удвоенной частотой. Данное явление, как установлено в [30], является причиной нелинейности автодинного генератора по «амплитуде».

Как видно из графиков, на рис. 6, б и в, в случае когда АЭ вносит в резонансную систему дополнительную зависимость  $b_{\text{кн}}$  и  $g_{\text{кн}}$  от изменений амплитуды (неизохронность) и частоты (неизодромность) колебаний, наблюдается как центральная, так и осевая асимметрия характеристик. При этом при одном знаке ухода частоты  $\chi$  графики зависимости  $b_{\text{кн}}(\chi)$  неизохронного генератора получают увеличения прогиба, а при другом знаке — спрямление. В значение  $g_{\text{кн}}(\chi)$  за счет неизодромности генератора вносится величина  $\rho b_{\text{кн}}(\chi)$ , вследствие чего изменяется наклон и высота скатов графиков зависимости  $g_{\text{кн}}(\chi)$ . Очевидно, что отмеченные здесь особенности характеристик  $g_{\text{кн}}(\chi)$  и  $b_{\text{кн}}(\chi)$  оказывают существенное влияние на формирование автодинного отклика генератора при сильном отраженном сигнале.

Процесс формирования автодинного отклика для случая изохронного и изодромного генератора рассмотрим с помощью рассчитанных на основании уравнений (11) и (12) диаграмм, представленных на рис. 7. В качестве «пробного» сигнала приняты гармонические изменения реактивной и активной про-

водимостей нагрузки с единичной амплитудой:  $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})=b_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})=\sin 2\pi\tau_{\text{н}}$ ;  $g_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})=g_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})=-\cos 2\pi\tau_{\text{н}}$  (см. диаграммы 1 и б). Величину параметра  $\beta_1$  примем равной граничному значению 3,4.

Проводимость  $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$  вызывает, в соответствии с (12), смещение графика результирующей характеристики на  $b_{\text{кн}}(\chi)+b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$  (см. диаграмму 2) по оси ординат. При этом точки пересечения графиком оси абсцисс дают текущие значения автодинного отклика по изменению частоты  $\chi(\tau_{\text{н}})$ , которые в теории автодинов для краткости принято называть частотной характеристикой автодина (ЧХА). Эти изменения  $\chi(\tau_{\text{н}})$ , как видно из диаграммы 3, получаются в целом инвертированными относительно «входного» воздействия  $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$ .

Крутизна центрального участка характеристики  $b_{\text{кн}}(\chi)$ , обусловленного действием стабилизирующего резонатора, (см. диаграмму 2) равна эквивалентной добротности  $Q_{\text{экр}}$  рассматриваемой колебательной системы

$$Q_{\text{экр}} = \omega_0 \left( \frac{db_{\text{кн}}(\omega)}{d\omega} \right)_0 = Q_{\text{н1}} + \frac{\beta_1\beta_2}{(1+\beta_2)^2} Q_{\text{с2}},$$

а за его пределами крутизна характеристики определяется добротностью рабочего резонатора  $Q_{\text{н1}}$ , для которой выполняется сильное неравенство  $Q_{\text{н1}} \ll Q_{\text{экр}}$ . Поэтому при малых изменениях проводимости  $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$  частота колебаний сильнее привязана к колебательной системе, чем при больших отклонениях  $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$ . Этим объясняется наличие излома частотного отклика  $\chi(\tau_{\text{н}})$  на диаграмме 3.

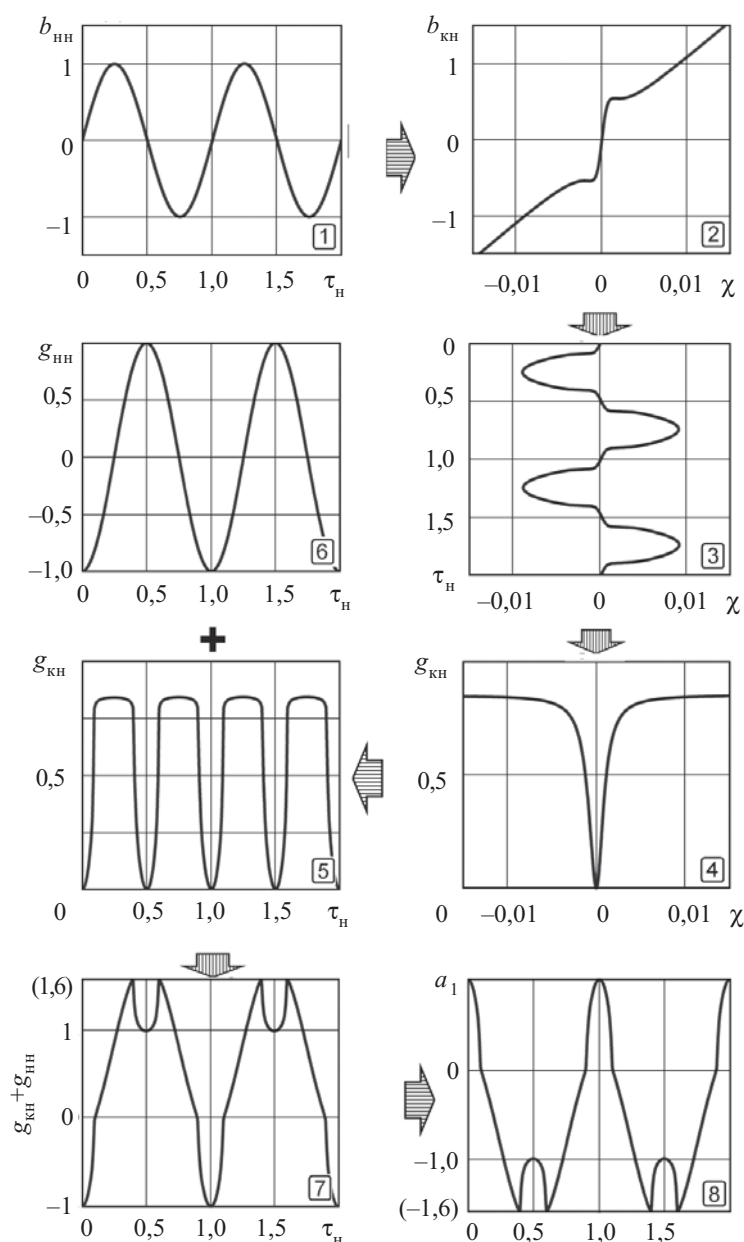


Рис. 7. Процесс формирования автодинного отклика стабилизированного изохронного генератора при сильном отраженном сигнале (порядковые номера диаграмм показаны в нижнем правом углу, стрелками указано функциональное направление процессов преобразования, знак «+» означает их сложение)

Сформированные в соответствии с диаграммой 3 автодинные изменения частоты  $\chi(\tau_h)$  вызывают перемещения рабочей точки по характеристике  $g_{kh}(\chi)$  (диаграмма 4). При этом текущие изменения проводимости  $g_{kh}(\tau_h)$  происходят с удвоенной частотой (диаграмма 5). Сумма гармонических изменений резистивной проводимости  $g_{hh}(\tau_h) = g_h(\tau_h) = -\cos 2\pi\tau_h$ , как отмечалось выше, (диаграмма 6) и сформировавшихся изменений проводимости  $g_{kh}(\tau_h)$  (диаграмма 5) дает закон изменения результирующей проводимости  $g_{hh}(\tau_h) + g_{kh}(\tau_h)$ , показанный на диаграмме 7. Инверсия этого закона в соответствии с (11) при принятой величине прочности предельного цикла  $\alpha_{11} = 1$  дает

для рассматриваемой колебательной системы автодинный отклик по изменению амплитуды колебаний  $a_{h1}(\tau_h)$  (диаграмма 8), который в теории автодинов принято называть амплитудной характеристикой автодина (АХА). Как видим из диаграмм 3 и 8, из-за нелинейности частотных зависимостей резистивной  $g_{kh}(\chi)$  и реактивной  $b_{kh}(\chi)$  проводимостей колебательной системы форма отклика стабилизированного генератора даже при синусоидальных изменениях проводимости нагрузки весьма далека от гармонической. Из анализа результатов разложения функций  $\chi(\tau_h)$  и  $a_1(\tau_h)$  в гармонический ряд Фурье, представленных на рис. 8 в виде спектральных диаграмм  $\chi(F_h)$  и  $a_1(F_h)$ , видно, что в отклике по изменению частоты  $\chi(F_h)$  появляются нечетные гармоники основной частоты, а по изменению амплитуды — постоянная составляющая и четные гармоники. На этих спектрограммах  $F_h = 1/T_h$  — нормированная частота автодинного отклика,  $T_h$  — его период.

Для удобства представления свойств неавтономных автоколебательных систем и автодинов широко используется упоминавшаяся выше амплитудно-частотная характеристика, которая строится в декартовой системе координат  $a_1(\tau_h), \chi(\tau_h)$ . По своей сути АЧХ  $a_1(\chi)$  представляет собой «фазовый портрет» автодинной системы, поскольку любая (изображающая) точка на этих кривых отображает ее состояние. Для построения АЧХ  $a_1(\chi)$  необходимо в (13) задать требуемое значение  $N$  и рассмотреть особенности формирования отклика по  $a_1(\tau_h)$  и  $\chi(\tau_h)$  на интервале  $0 < \tau_h < 1$ . Данная характеристика для слабого отраженного сигнала обычно имеет форму эллипса. Поэтому в теории явления затягивания генераторов внешней нагрузкой она известна как «эллипс затягивания» [45]. Для рассматриваемого на рис. 7 случая при  $N = 0$  и при использовании частотной  $\chi(\tau_h)$  и амплитудной  $a_1(\tau_h)$  характеристик (см. диаграммы 3 и 8) получена представленная на рис. 9 АЧХ  $a_1(\chi)$ , которая, как видим, по форме весьма далека от эллипса.

Выполненные расчеты показали, что в случае неизохронного и неизодронного генератора, когда у частотных зависимостей реактивной  $b_{kh}(\chi)$  и резистивной  $g_{kh}(\chi)$  составляющих проводимости колебательной системы появляются отмеченные выше асимметрии (см. рис. 6, б и в), в компонентах автодинного отклика  $\chi(\tau_h)$  и  $a_1(\tau_h)$  (см. рис. 7) возникают дополнительные искажения, а также асимметрия представленной на рис. 9 АЧХ. При этом в спектрограммах автодинного отклика (см. рис. 8) появляется постоянная составляющая в спектре  $\chi(F_h)$  и увеличивается уровень как четных, так и нечетных гармоник

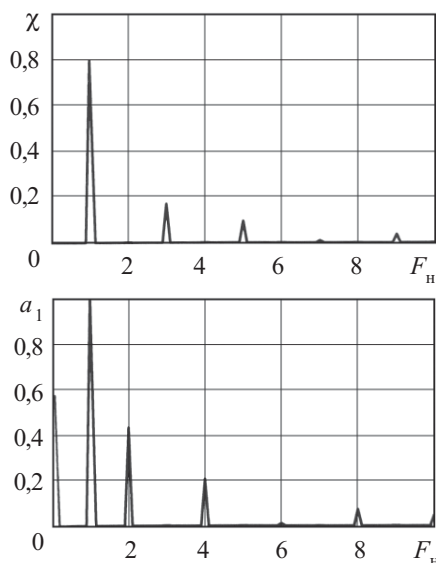


Рис. 8. Спектрограммы автодинного отклика по изменению частоты  $\chi(F_n)$  и амплитуды  $a_1(F_n)$

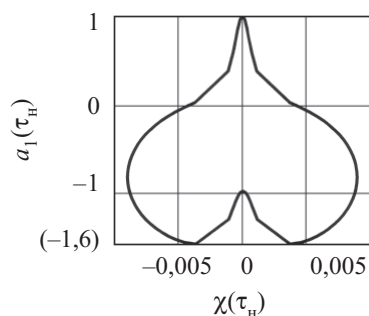


Рис. 9. АЧХ стабилизированного изохронного генератора при слабой связи

в спектрах отклика по изменению частоты  $\chi_n(F_n)$  и амплитуды  $a_1(F_n)$  колебаний.

### Заключение

Таким образом, разработанная математическая модель стабилизированного автодинного генератора позволила установить, что нелинейность частотных зависимостей реактивной и резистивной проводимостей колебательной системы, а также внутренние свойства генератора (неизохронность и неизодромность) являются, наряду с «нелинейностью» нагрузки, причинами искажений автодинного отклика при сильном отраженном сигнале в стабилизированном автодинном генераторе. Эта модель может использоваться для численного анализа основных характеристик как при слабом, так и при сильном отраженном сигнале с учетом внешних условий работы автодина и внутренних свойств СВЧ-генератора.

Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований стабилизированных автодинов на предмет изучения их характеристик и интерпретации экспериментальных данных.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Huntoon R. D., Miller B. J. Generator-powered proximity fuze // *Electronics*.— 1945.— № 12.— P. 98—103.

2. Page C. H. and Astin A. V. Survey of Proximity Fuze Development // *American Journal of Physics*.— 1947.— V. 15, № 2.— P. 95—110.

3. Коган И. М. Ближняя радиолокация. Теоретические основы.— М.: Сов. радио, 1973. [Kogan I. M. Moscow. Sov. radio. 1973]

4. Носков В. Я. Радиолокационный датчик для автономной системы управления грузовым парашютом // Тезисы докладов конф. «Радиотехнические системы (навигации, связи), средства измерения и новые информационные технологии».— Россия, Красноярск, 1992.— Ч. 2.— С. 56—57. [Noskov V. Ya. // Tezisy dokladov konf. «Radiotekhnicheskie sistemy (navigatsii, svyazi), sredstva izmereniya i novye informatsionnye tekhnologii». Russia, Krasnoyarsk, 1992. Part 2. P. 56]

5. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов.— Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. [Usanov D. A., Skripal' Al. V., Skripal' An. V. Saratov. Izd-vo Sarat. un-ta. 2003.]

6. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний.— М.: Горячая линия. Телеком, 2010. [Komarov I. V., Smol'skii S. M. Moscow. Goryachaya liniya. Telekom. 2010]

7. Закарлюк Н. М., Носков В. Я., Смольский С. М. Бортовые автодинные датчики скорости для аэробаллистических испытаний // Тр. 20-й Междунар. крымской микроволновой конф. «КрыМиКо-2010».— Украина, Севастополь, 2010.— С. 1065—1068. [Zakarlyuk N. M., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Tr. 20-i Mezhdunar. krymskoi mikrovolnovoi konf. «KryMiKo-2010». Ukraine, Sevastopol'. 2010. P. 1065]

8. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн.— Харьков: Институт радиофизики и электроники АН Украины, 1991. [Buzykin V. T., Noskov V. YA. Avtodiny. // Radiotekhnicheskie sistemy millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov voln. Khar'kov: Institut radiofiziki i elektroniki AN Ukrainy. 1991]

9. Закарлюк Н. М., Носков В. Я., Смольский С. М. Автодинные датчики для железнодорожных поездов // Тр. 20-й Междунар. крымской микроволновой конф. «КрыМиКо-2010».— Украина, Севастополь, 2010.— С. 1072—1076. [Zakarlyuk N. M., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. Avtodinnye datchiki dlya zheleznodorozhnykh perezhdov // Tr. 20-i Mezhdunar. krymskoi mikrovolnovoi konf. «KryMiKo-2010». Ukraine. Sevastopol'. 2010. P. 1072]

10. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M. et al. New direction-of-motion Doppler detector // *Electron. Lett.*— 1980.— V. 16, № 25.— P. 953—954.

11. Гершензон Е. М., Туманов Б. М., Бузыкин В. Т. и др. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах // Радиотехника и электроника.— 1982.— Т. 27, № 1.— С. 104—112. [Gershenzon E. M., Tumanov B. M., Buzykin V. T. i dr. // Radiotekhnika i elektronika. 1982. Vol. 27. N 1. P. 104]

12. Носков В. Я., Смольский С. М. Автодинный эффект в генераторах с амплитудной модуляцией // Радиотехника.— 2011.— № 2.— С. 21—36. [Noskov V. Ya., Smol'skii S. M. // Radiotekhnika. 2011. N 2. P. 21]

13. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники.— 2007.— № 7.— С. 3—33. [Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smol'skii S. M. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2007. N 7. P. 3]

14. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 4. Исследования многочастотных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники.— 2008.— № 5.— С. 65—88. [Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smol'skii S. M. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2009. N 3. P. 3]

15. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. — 2009. — № 3. — С. 3—50. [Votoropin S. D., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. 2009. N 3. P. 3]
16. Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2009. — № 6. — С. 3—51. [Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2009. N 6. P. 3]
17. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 3. Функциональные особенности автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 11. — С. 25—49. [Votoropin S. D., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2007. N 11. P. 25]
18. Носков В. Я. Исследование особенностей автоколебаний бигармонического автодина при воздействии отраженного излучения // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1991. — № 10. — С. 44—50. [Noskov V. Ya. // Izv. vuzov. Radioelektronika. 1991. N 10. P. 44]
19. Носков В. Я. Стабилизированный бигармонический автодин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1991. — № 11. — С. 61—64. [Noskov V. Ya. // Izv. vuzov. Radioelektronika. 1991. N 11. P. 61]
20. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Применение внешней синхронизации для исследования внутренних СВЧ генераторов по их автодинным характеристикам // Изв. вузов. Физика. — 2008. — Т. 51, № 9/2. — С. 159—163. [Votoropin S. D., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Izv. vuzov. Fizika. 2008. Vol. 51, N 9/2. P. 159]
21. Носков В. Я., Смольский С. М. Основные свойства двухдиодных автодинов и их применение // Тр. 20-й Междунар. крымской микроволновой конфер. «КриМиКо-2010». — Украина, Севастополь, 2010. — С. 1055—1054. [Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Tr. 20-i Mezhdunar. krymskoi mikrovolnovoi konfer. «CriMiCo-2010». Ukraine, Sevastopol', 2010. P. 1055]
22. Носков В. Я., Смольский С. М. Связь нелинейных искажений сигналов и процесса установления автодинного отклика СВЧ генераторов // Радиотехника. — 2010. — № 1. — С. 55—66. [Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Radiotekhnika. 2010. N 1. P. 55]
23. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 1. Конструкторско-технологические достижения // Успехи современной радиоэлектроники. — 2006. — № 12. — С. 3—30. [Votoropin S. D., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2006. N 12. S. 3]
24. Соловьев Ю. Л., Ковтуненко Г. Ф., Рудаков А. В. Модуль Доплера и антенна с фазокорректирующими зонными пластинами Френеля // Тр. 17-й Междунар. крымской микроволновой конфер. «КриМиКо-2007». — Украина, Севастополь, 2007. — С. 51. [Solov'ev Yu. L., Kovtunenno G. F., Rudakov A. V. // Tr. 17-i Mezhdunar. krymskoi mikrovolnovoi konfer. «CriMiCo-2007». Ukraina, Sevastopol', 2007. P. 51]
25. Егуннов М. С., Воторопин С. Д. Приемно-передающий модуль 5-мм диапазона длин волн с частотной модуляцией для систем ближней радиолокации // Техника и приборы СВЧ. — 2008. — № 1. — С. 18—22. [Egunov M. S., Votoropin S. D. // Tekhnika i pribory SVCh. 2008. N 1. P. 18]
26. Туманов Б. Н., Бузыкин В. Т. Особенности автоколебаний в автодинных генераторах СВЧ // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. — 1983. — № 2. — С. 3—9. [Tumanov B. N., Buzykin V. T. // Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh. 1983. N 2. P. 3]
27. Туманов Б. Н., Закарлюк Н. М. Фазовые портреты и особенности автоколебаний автодина на диоде Ганна // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. — 1985. — № 10. — С. 6—13. [Tumanov B. N., Zakarlyuk N. M. // Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh. 1985. N 10. P. 6]
28. Игнатков К. А., Носков В. Я., Смольский С. М. Основные соотношения для анализа особенностей автодинных сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // Сб. трудов III ВНТК «Радиовысотометрия-2010». — Россия, Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2010. — С. 139—143. [Ignatkov K. A., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Sb. trudov III VNTK «Radiovysotometriya-2010». Russia, Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2010. P. 139]
29. Игнатков К. А., Носков В. Я., Смольский С. М. Исследование особенностей автодинных сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // Сб. трудов III ВНТК «Радиовысотометрия-2010». — Россия, Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2010. — С. 144—149. [Ignatkov K. A., Noskov V. YA., Smol'skii S. M. // Sb. trudov III VNTK «Radiovysotometriya-2010». Rossiya, Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2010. P. 144]
30. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Нелинейные искажения сигналов в стабилизированных автодинных СВЧ генераторах // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — № 1. — С. 31—39. [Noskov V. YA., Ignatkov K. A., Smol'skii S. M. // Tekhnika i pribory SVCh. 2011. N 1. P. 31]
31. Ланда П. С. Автоколебания в распределенных системах. — М.: Наука, 1983. [Landa P. S. Moscow. Nauka. 1983]
32. Рубаник В. П. Колебания квазилинейных систем с запаздыванием. — М.: Наука, 1969. [Rubanik V. P. Moscow. Nauka. 1969]
33. Минакова И. И. Неавтономные режимы автоколебательных систем. — М.: Изд-во МГУ. — 1987. [Minakova. I. I. Moscow. Izd-vo MGU. 1987]
34. Кузнецов С. П. Динамический хаос. — М.: Физматлит, 2001. [Kuznetsov S. P. Moscow: Fizmatlit. 2001]
35. Рыскин Н. М., Шигаев А. М. Сложная динамика простой модели распределенной автоколебательной системы с запаздыванием // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, № 7. — С. 1—8. [Ryskin N. M., Shigaev A. M. Slozhnaya dinamika prostoi modeli raspredelennoi avtokolebatel'noi sistemy s zapazdyvaniem // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2002. Vol. 72, N 7. P. 1]
36. Дамгов В. Н., Ланда П. С., Перминов С. М., Шаталова Г. Г. Стохастические колебания в генераторе с дополнительной обратной связью // Радиотехника и электроника. — 1986. — Т. 31, № 4. — С. 730—733. [Damgov V. N., Landa P. S., Perminov S. M., Shatalova G. G. // Radiotekhnika i elektronika. 1986. Vol. 31, N 4. S. 730]
37. Kulik V. V., Lukin K. A., Rakityansky V. A. Autodyne effect in the Weak-Resonant BWO with chaotic dynamics // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 1998. — Vol. 19, N 3. — P. 427—440.
38. Новожилова Ю. В., Сергеев А. С. параметрическая неустойчивость в автогенераторе с отражением от удаленной нагрузки // Тр. 19-й Междунар. крымской микроволновой конфер. «КриМиКо-2009». — Украина, Севастополь, 2009. — С. 675—676. [Novozhilova Yu. V., Sergeev A. S. // Tr. 19-i Mezhdunar. krymskoi mikrovolnovoi konfer. «CriMiCo-2009». Ukraine, Sevastopol', 2009. P. 675]
39. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. — Севастополь: Вебер, 2006. [Kasatkin L. V., Chaika V. E. Sevastopol'. Veber, 2006]
40. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Автодинный отклик при сильном отраженном сигнале // Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сб. науч. тр. — Харьков: ИРЭ АН Украины, 1992. — С. 52—56. [Buzykin V. T., Noskov V. Ya. // Primenenie radiovoln millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov. Sb. nauch. tr. Khar'kov: IRE AN Ukrainy, 1992. P. 52]
41. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. О влиянии неизоднородности СВЧ генераторов на их автодинные характеристики // Сб. докл. XVII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2008). — Россия, Воронеж, 2011. — Т. 2. — С. 1595—1607. [Noskov V. YA., Ignatkov K. A., Smol'skii S. M. // Sb. dokl. XVII MNTK «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'» (RLNC\*2008). Rossiya, Voronezh, 2011. Vol. 2. P. 1595]
42. 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. [Noskov V. Ya., Smol'skii S. M. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 1. P. 14]
43. Бычков С. И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. — М.: Сов. радио, 1967. [Bychkov S. I. Moscow. Sov. radio. 1967]
44. Половков И. П. Стабилизация частоты генераторов СВЧ внешним объемным резонатором. — М.: Сов. радио, 1967. [Polovkov I. P. Moscow. Sov. radio. 1967]
45. Малышев В. А., Роздобудько В. В. Использование затягивания частоты и мощности автогенератора СВЧ внешней нагрузкой для измерения параметров нелинейности его электронной проводимости // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1977. — Т. 20, № 1. — С. 45—51. [Malyshev V. A., Rozdobud'ko V. V. // Izv. vuzov. Radioelektronika. 1977. Vol. 20, N 1. P. 45]