

Д. т. н. В. Я. НОСКОВ, К. А. ИГНАТКОВ, д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ¹УДК 621.373.122:
621.396.962.23Россия, Уральский федеральный университет (УПИ),
¹Московский энергетический институт – ТУ (МЭИ-ТУ)
E-mail: noskov@oko-ek.ru, SmolskiySM@mail.ruДата поступления в редакцию
18.07 2011 г.

АВТОДИННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ СИЛЬНОМ ОТРАЖЕННОМ СИГНАЛЕ

Выполнены расчеты и анализ характеристик автодинной системы, стабилизированной внешним высокочастотным резонатором, а также спектральных характеристик при условиях точной и неточной настройки резонатора и вариациях расстояния до отражателя.

В [1] нами была разработана математическая модель автодинного генератора при сильном отраженном сигнале, выполнены исследования влияния нагрузки и составляющих проводимости колебательной системы на формирование автодинного отклика. В настоящей работе стояла задача на основе этой модели исследовать влияние на автодинные характеристики внутренних свойств генератора, величины расстройки резонатора и вариаций расстояния до отражающего объекта.

Анализ автодинных характеристик при точной настройке стабилизирующего резонатора

Основными автодинными характеристиками СВЧ-генераторов, находящихся под воздействием собственного отраженного излучения, являются частотная $\chi_n(\tau_n)$ ¹, амплитудная $a_{n1}(\tau_n)$ и амплитудно-частотная $a_{n1}(\chi_n)$ характеристики автодина (сокращенно ЧХА, АХА и АЧХ, соответственно) [2–8]. Эти характеристики, нормированные относительно своих максимальных значений, обеспечивают возможность анализа особенностей формирования автодинного отклика при его выделении в виде полезного сигнала по вариациям амплитуды $a_{n1}(\tau_n)$ и частоты $\chi_n(\tau_n)$ колебаний при изменении нормированного времени τ_n запаздывания отраженного излучения на отдельных фрагментах расстояния s до отражателя. Еще одной важной характеристикой автодина является фазовая $\delta(\tau_n) \equiv \delta(\chi_n, \tau_n)$ характеристика (ФХА), которая, как видно из выражения (13) в [1], зависит также от ЧХА (через относительные изменения частоты χ) и расстояния до отражателя (через целое число полуволн N до отражающего объекта). Рассмотрим первые три характеристики для случая точной настройки частоты стабилизирующего резонатора ω_{c2} на частоту ω_0

колебаний автономного генератора, т. е. когда его относительная расстройка $\nu=0$, а также при условии малого расстояния до отражателя, полагая $N=0$.

Для расчета характеристик χ и a_1 как функций нормированного времени τ_n , учитывающих также особенности поведения нагрузки и частотных зависимостей проводимости колебательной системы в условиях сильного отраженного сигнала, используем систему уравнений (11), (12) из [1]. Решение этой системы ищем с использованием математического пакета программ Mathcad. Для этого сначала находим решение для автодинных изменений частоты $\chi = \chi(\tau_n)$ трансцендентного уравнения (12) методом секущих итерационного алгоритма, реализованного в функции root. После подстановки полученных значений χ в уравнение (11) находим значения для переменной $a_1 = a_1(\tau_n)$. Далее с помощью встроенной функции Maximize (f, x_1, \dots, x_m) в полученных функциях $a_1 = a_1(\tau_n)$ и $\chi = \chi(\tau_n)$ находим локальные экстремумы a_{1m} и χ_m , которые для получения искомого автодинных характеристик используем в качестве нормирующего параметра: $a_{n1}(\tau_n) = a_1(\tau_n)/a_{1m}$ и $\chi_n(\tau_n) = \chi(\tau_n)/\chi_m$. Разработанный алгоритм проверялся на сходимость полученных результатов вычислений автодинных характеристик при малом отраженном сигнале ($\Gamma \ll 1$) с результатами вычислений автодинных характеристик, полученных в [5]. Все приведенные в настоящей статье результаты получены для стабилизированного автодинного генератора при $\beta_2=1$; $Q_{n1}=100$; $Q_{c2}=1000$; $\alpha_{11}=1$; $\xi_{11}=0$.

На рис. 1 представлены ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_{n1}(\tau_n)$ в виде временных диаграмм на интервале $\tau_n=0 \dots 2$, рассчитанные при различных значениях коэффициентов неизохронности γ и неизодромности ρ генератора для случаев слабого ($\Gamma=0,01$) и сильного ($\Gamma=0,5$) отраженного сигнала. На врезках этих характеристик показан вид частотных зависимостей реактивных $b_{кн}(\chi)$ и резистивных $g_{кн}(\chi)$ составляющих проводимости колебательной системы при соответствующих значениях коэффициентов γ и ρ . АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ построены в декартовой системе координат на основании данных, полученных при вычислениях соответствующих ЧХА и АХА и задании значений τ_n в интервале от 0 до 1 как параметрических. Точками на кривых АЧХ отмечены положения изображающих точек с интервалом в одну десятую периода автодинного отклика.

¹ Здесь и далее сохранены все обозначения и понятия, принятые в [1].

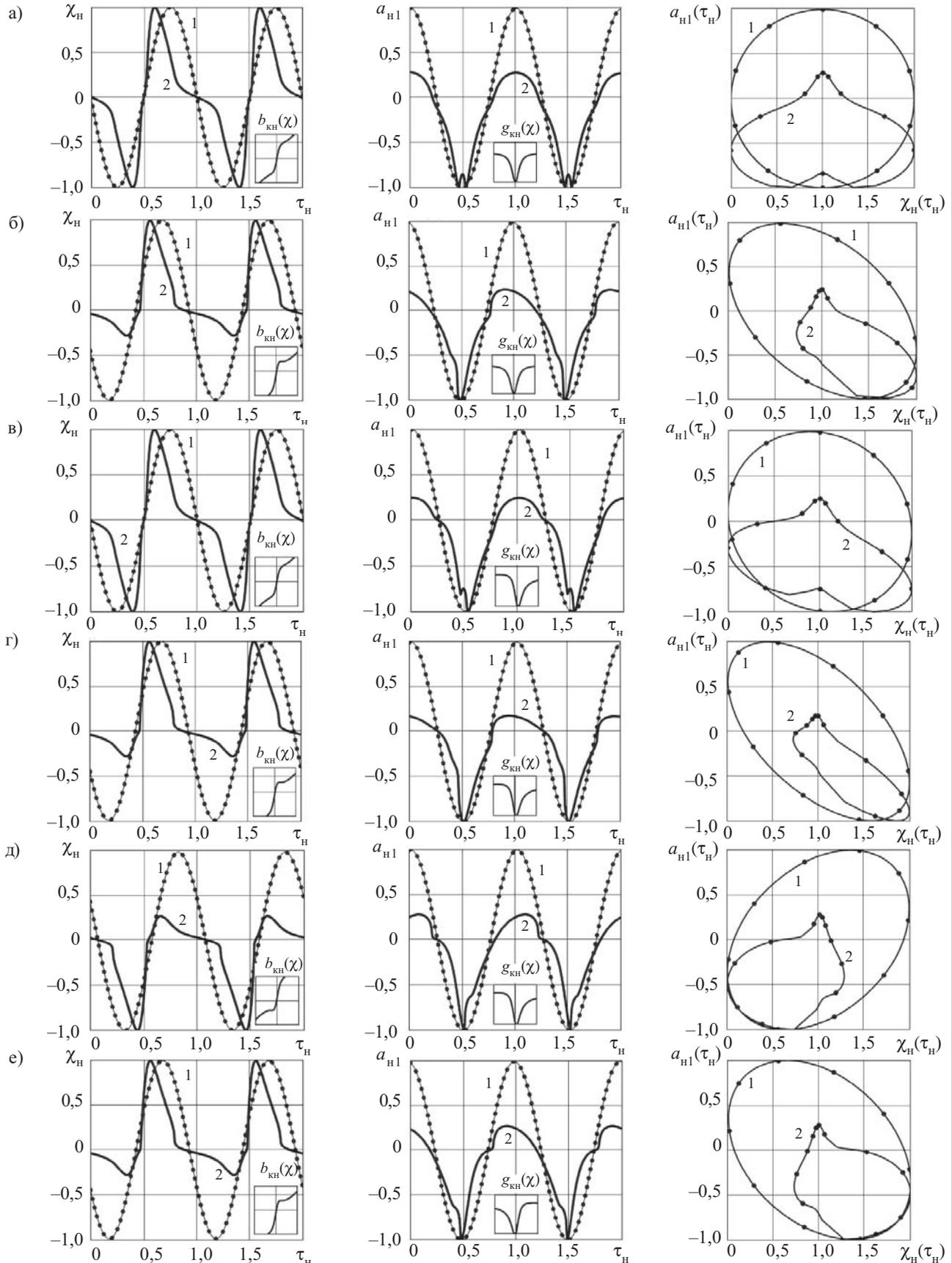


Рис. 1. ЧХА $\chi_H(\tau_H)$, АХА $a_{H1}(\tau_H)$ и АЧХ $a_{H1}(\chi_H)$ генератора со слабой связью, рассчитанные для $\beta_1=1,5$; $\nu=0$; $\Gamma=0,01$ (кривые 1) и $\Gamma=0,5$ (кривые 2) при различных значениях коэффициентов γ и ρ :
 а — $\gamma=\rho=0$; б — $\gamma=0,5$, $\rho=0$; в — $\gamma=0$, $\rho=0,5$; г — $\gamma=\rho=0,5$; д — $\gamma=-0,5$, $\rho=0,5$; е — $\gamma=0,5$, $\rho=-0,5$

Графики зависимостей коэффициентов гармоник частотных K_χ и амплитудных K_Γ изменений, а также уровня гармонических составляющих (с 1 по 5) спектров автодинного отклика по изменению частоты $\chi_n(F_n)$ и амплитуды $a_{n1}(F_n)$ колебаний от величины модуля коэффициента отражения Γ рассматриваемого генератора представлены на **рис 2**.

Основные результаты анализа данных, полученных при численном моделировании процессов формирования автодинного отклика в генераторах, состоят в следующем.

В случае малого сигнала (см. кривые 1 на рис. 1) ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_{n1}(\tau_n)$ имеют синусоидальный вид. При этом вариации коэффициентов неизохронности γ и неизодромности ρ вызывают лишь соответствующие изменения относительных углов фазового смещения $\theta = \arctg \gamma$ и $\psi_1 = \arctg \rho$ компонентов автодинного отклика. Эти факты достаточно хорошо изучены и согласуются с результатами известных исследований автодинных СВЧ-генераторов [2—5].

При сильном отраженном сигнале зависящие от величины коэффициентов γ и ρ фазовые смещения автодинных изменений частоты $\chi_n(\tau_n)$ и амплитуды $a_{n1}(\tau_n)$ также имеют место, что хорошо видно по сдвигам кривых 2 на рис. 1. Однако наибольший интерес в этом случае представляет поиск причин, вследствие которых возникают искажения компонентов автодинного отклика, что является важным для обеспечения работоспособности автодинных систем ближней радиолокации при сильном отраженном сигнале.

Из сравнения графиков нормированных зависимостей $b_n(\tau_n)$ и $g_n(\tau_n)$, представленных в [1] на рис. 2, с соответствующими графиками частотной $\chi_n(\tau_n)$ и амплитудной $a_n(\tau_n)$ характеристик при таких же значениях параметров неизохронности γ и неизодромности

р генератора (см. рис. 1, а, д и е) видно, что последние не повторяют первые с инверсией, как это наблюдается у одноконтурных генераторов, а отличаются дополнительными искажениями мгновенных значений. Из сравнения графиков на рис. 1, а и б видно также, что неизохронность генератора оказывает влияние на закон формирования АХА, в то время как из сравнения характеристик рис. 1, з и е следует, что обратное влияние, т. е. неизодромность генератора, отсутствует.

Из сопоставления форм частотных зависимостей реактивной $b_{кн}(\chi)$ и резистивной $g_{кн}(\chi)$ проводимостей колебательной системы, показанных на врезках диаграмм, и характеристик $\chi_n(\tau_n)$ и $a_{n1}(\tau_n)$ на рис. 1 хорошо видно, что положительные и отрицательные полуволны автодинного отклика по изменению частоты $\chi_n(\tau_n)$ имеют одинаковые амплитуды только в случае изохронного генератора ($\gamma=0$), у которого частотная зависимость $b_{кн}(\chi)$ имеет симметричную форму (см. рис. 1, а и в). В случае неизохронного генератора ($\gamma \neq 0$) наблюдается как бы частичный срез одной из полуволн автодинных характеристик $\chi_n(\tau_n)$ (см. рис. 1, б, з—е). Данное явление, а также излом характеристик $\chi_n(\tau_n)$ в области малых значений автодинных изменений частоты объясняются действием стабилизирующего резонатора, который «стремится» удерживать частоту генерации в центральной части частотной зависимости. За пределами его полосы «удержания», где крутизна частотной зависимости $b_{кн}(\chi)$ определяется только добротностью рабочего резонатора $Q_{н1}$, изменения частоты резко увеличиваются, формируя в характеристике отклика асимметричный выход регистрируемого параметра.

Для более полного понимания процесса формирования «искаженных» автодинных характеристик, представленных на рис. 1, необходимо снова обра-

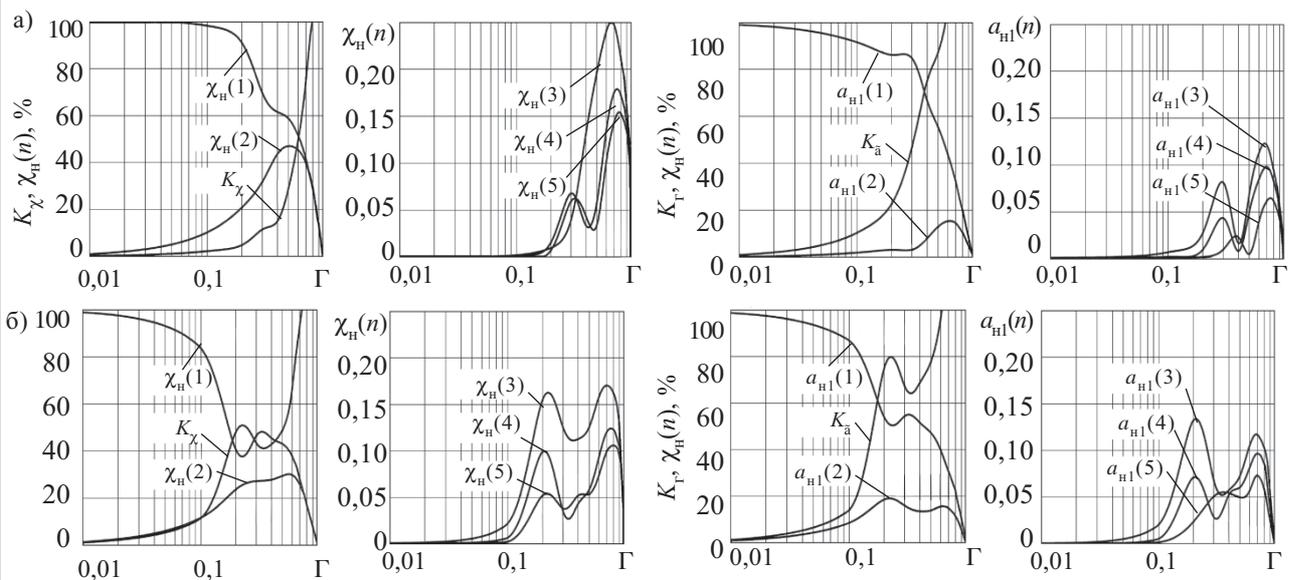


Рис. 2. Зависимости уровня основных гармонических составляющих спектров автодинного отклика генератора со слабой связью по изменению частоты $\chi_n(n)$ и амплитуды $a_n(n)$ колебаний и коэффициентов гармоник K_χ и K_Γ от величины модуля коэффициента отражения Γ , рассчитанные для генератора при $\beta_1=1,5$; $\nu=0$ при различных значениях коэффициентов γ и ρ :

а — $\gamma=\rho=0$; б — $\gamma=0,5$, $\rho=0,5$

таться к работе [1]. Диаграммы 1 и 6 на рис. 7 в [1] заменим соответствующими диаграммами $b_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$ и $g_{\text{нн}}(\tau_{\text{н}})$, представленными там же на рис. 2, а диаграммы 2 и 4 при тех же значениях коэффициентов γ и ρ — зависимостями $b_{\text{кн}}(\chi)$ и $g_{\text{кн}}(\chi)$, которые приведены там на рис. 6. Тогда на диаграммах 3 и 8 получим соответствующие графики автодинных изменений частоты $\chi(\tau_{\text{н}})$ и амплитуды $a_1(\tau_{\text{н}})$, которые после процедуры нормировки становятся именно такими, какими они представлены в настоящей работе на рис. 1.

Чтобы сделать выводы из результатов анализа рис. 2, сравним их с графиками, приведенными на рис. 3 в [1]. (Хотя, как отмечалось в [1], эти графики рассчитаны для изменяющейся части нормированной проводимости нагрузки, они полностью соответствуют характеристикам одноконтурного генератора.)

В целом, ход всех зависимостей на их начальном участке, до значения коэффициента отражения $\Gamma \approx 0,1$, и на их конечном участке, где $\Gamma \approx 0,5, \dots, 1$, качественно совпадает. Исключение составляет область между значениями Γ от 0,1 до 0,5. В этой области наблюдается перегиб графиков, отображающих ход зависимостей уровня первых гармоник $\chi_{\text{н}}(1)$ и $a_{\text{н1}}(1)$, а также заметный рост уровня высших гармоник $\chi_{\text{н}}(n)$ и $a_{\text{н1}}(n)$, где $n > 1$. Кроме того, здесь наблюдается соответствующее изменение хода характеристик коэффициентов гармоник для изменений как частоты K_{χ} , так и амплитуды K_a . Как показали расчеты автодинных характеристик, в этой области значений Γ уровень отраженного сигнала достигает точки перегиба на графике частотной зависимости реактивной проводимости $b_{\text{кн}}(\chi)$ колебательной системы. При дальнейшем увеличении уровня отраженного сигнала влияние нелинейности, обусловленной наличием стабилизиру-

ющего резонатора, уменьшается, поскольку здесь уже начинает превалировать влияние характеристик основного рабочего резонатора. Как раз в этой области значений коэффициента Γ искажения автодинного отклика наблюдаются в наибольшей степени. При дальнейшем увеличении уровня отраженного сигнала влияние нелинейности, обусловленной наличием стабилизирующего резонатора, уменьшается, поскольку здесь уже начинает превалировать влияние характеристик основного рабочего резонатора.

В случае малого сигнала эллипсы АЧХ $a_{\text{н1}}(\chi_{\text{н}})$ стабилизированного автодинного генератора, как и в случае одноконтурного генератора, при любых значениях коэффициентов γ и ρ полностью заполняют квадрат в нормированной системе координат относительных изменений частоты и амплитуды колебаний, который образован линиями $\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) \in [-1; +1]$, $a_{\text{н1}}(\tau_{\text{н}}) \in [-1; +1]$ (кривые 1 на рис. 1). Причем в случае изохронного и изодромного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$, эллипс вырождается в окружность (см. рис. 1, а). Данные результаты, известные как в теории одноконтурных, так и двухконтурных (стабилизированных) генераторов [5], представлены здесь с целью проверки сходимости разработанной модели для большого сигнала с известной и хорошо изученной моделью для малого сигнала.

АЧХ $a_{\text{н1}}(\chi_{\text{н}})$ в случае сильного отраженного сигнала имеет очень сложную форму, которая значительно отличается от эллиптической, а поперечные размеры ее полностью не заполняют отведенный для построения квадрат (кривые 2 на рис. 1). Причем при $\gamma = 0$ (изохронный генератор) АЧХ иногда имеет как бы раздвоенную форму, такую как на рис. 1, а и в. Ориентация АЧХ зависит преимущественно от знака

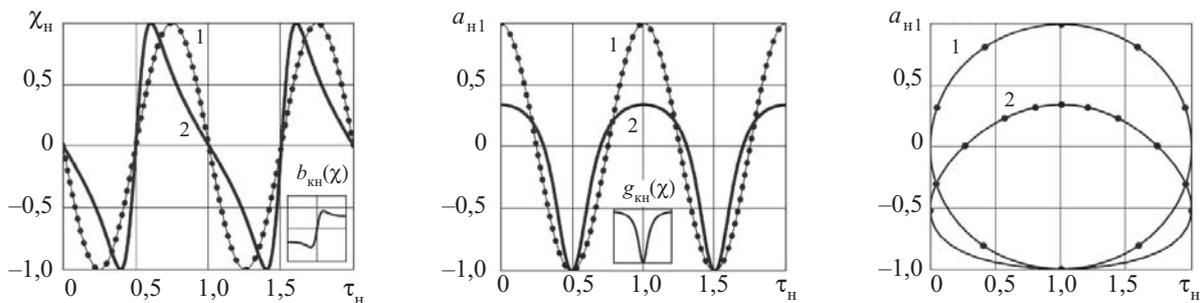


Рис. 3. ЧХА $\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$, АХА $a_{\text{н1}}(\tau_{\text{н}})$ и АЧХ $a_{\text{н1}}(\chi_{\text{н}})$ генератора с сильной связью, рассчитанные для $\beta_1=10; \nu=0; \Gamma=0,01$ (кривые 1) и $\Gamma=0,5$ (кривые 2)

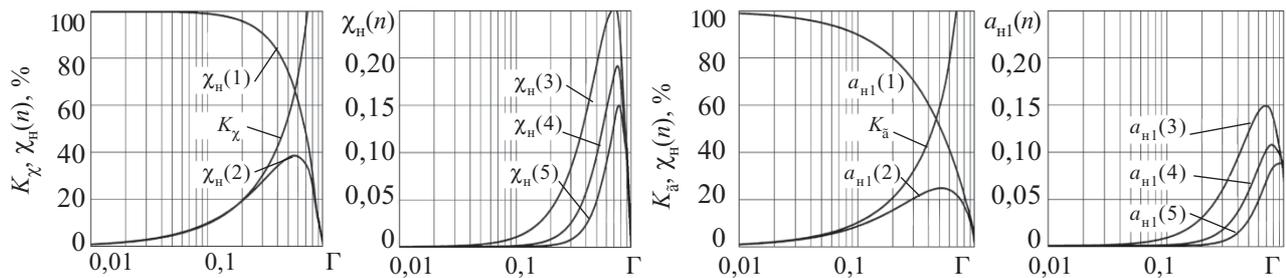


Рис. 4. Те же зависимости, что и на рис. 2, для генератора с сильной связью при $\beta_1=40; \nu=0; \gamma=\rho=0$

при коэффициенте неизохронности γ : при знаке «+» она ориентирована слева направо вниз, а при знаке «-» — слева направо вверх. К сожалению, ограниченность численных методов анализа пока еще не позволила выявить закономерности формирования этой характеристики, снятие которой на экспериментальном стенде не представляется достаточно сложным [4, 5].

Из представленных результатов исследований видно, что при слабой связи между резонаторами автодинный отклик генератора со стабилизирующим резонатором при сильном отраженном сигнале подвержен искажениям в большей степени, чем автодинный отклик обычного нестабилизированного генератора.

Рассмотрим случай сильной связи, когда одновременно сочетались бы достоинства одноконтурного и стабилизирующего генераторов, представляющий практический интерес.

В результате анализа ряда характеристик при различных значениях параметра связи β_1 установлено, что поставленное условие удовлетворяется при $\beta_1 \geq 10$. На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов характеристик изохронного генератора для случая, когда $\beta_1 = 10$. Из сравнения этих зависимостей с зависимостями $b_n(\tau_n)$ и $g_n(\tau_n)$, приведенными на рис. 2, а в [1], соответствующими ЧХА, АХА и АЧХ, представленными на рис. 1, а, а также с графиками рис. 3, а и рис. 2, а, видно следующее. В случае сильной связи автодинный отклик похож на отклик одноконтурного генератора, т. е. наблюдается монотонность графиков гармонических составляющих $\chi_n(n)$, $a_n(n)$ и коэффициентов гармоник K_χ и K_a в диапазоне изменений коэффициента отражения $0 < \Gamma < 0,5$.

Резюмируя результаты проведенного анализа, еще раз отметим, что при сильном отраженном сигнале для уменьшения уровня искажений автодинного отклика предпочтительно использование сильной связи между резонаторами. При таком условии одновременно реализуются достоинства одноконтурного генератора (линейность частотных зависимостей составляющих проводимости резонансной системы) и стабилизирующего генератора, у которого благодаря действию внешнего резонатора обеспечивается сильная привязка к частоте стабилизирующего резонатора.

Влияние расстройки стабилизирующего резонатора на автодинные характеристики

Представленные выше результаты анализа получены для случая точной настройки резонатора, когда его собственная частота ω_{c2} совпадает с частотой ω_0 стационарных колебаний автономного генератора. Наличие расстройки, т. е. когда $\nu > 0$, вызывает смещение рабочей точки по частотной характеристике реактивной $b_{кн}(\chi)$ и резистивной $g_{кн}(\chi)$ составляющих проводимости колебательной системы (см. рис. 6, [1]). В свете описанных выше результатов исследований очевидно, что данное явление способно оказывать существенное влияние на особенности формирования автодинного отклика, особенно при сильном отраженном сигнале. В связи с этим для такого случая были выполнены исследования влияния расстройки частот ω_{c2} и ω_0 на процесс формирования автодинно-

го отклика. При этом, как и в предыдущем разделе, расстояние до отражателя полагали достаточно малым, так что $N=0$. Для сравнения также были проведены расчеты автодинного отклика для случая слабого отраженного сигнала.

Результаты расчетов ЧХА, АХА и АЧХ, проведенных в соответствии с выражениями (11), (12) из [1] при различных значениях параметра расстройки, представлены на рис. 5 и 6. На рис. 6, з приведены также характеристики для случая точной настройки ($\nu=0$). Точками на кривых АЧХ отмечены положения изображающих точек через одну десятую периода автодинного сигнала.

Из графиков на рис. 5 видно, что при слабом отраженном сигнале (см. кривые 1) автодинный отклик независимо от величины и знака расстройки является гармонической функцией времени. При этом начальный сдвиг фаз для изменений частоты $\chi_n(\tau_n)$ остается неизменным, а для изменений амплитуды $a_{n1}(\tau_n)$ получают дополнительные фазовые смещения, зависящие от величины и знака расстройки ν . Эти изменения фазовых смещений отклика $a_{n1}(\tau_n)$ являются причиной смены ориентации одноименных осей эллипсов АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$.

В случае сильного отраженного сигнала указанная для слабого сигнала зависимость фазового смещения отклика $a_{n1}(\tau_n)$ также заметна. При этом у изохронного генератора (см. рис. 5, а, б), имеющего слабую связь со стабилизирующим резонатором ($\beta_1=1,5$), при изменении знака расстройки наблюдается «симметрия» в характере искажений ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_{n1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$. У неизохронного и неизодромного генератора (см. рис. 5, в, з) такая «симметрия» характера искажений отсутствует. В этом случае можно отметить только изменение степени этих искажений при изменении расстройки. Такая особенность формирования отклика связана с асимметрией частотных зависимостей реактивной $b_{кн}(\chi)$ и резистивной $g_{кн}(\chi)$ составляющих проводимости колебательной системы у неизохронного и неизодромного генератора.

В случае сильной связи рабочего резонатора со стабилизирующим ($\beta_1=10$) характер изменений фазовых сдвигов ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_{n1}(\tau_n)$ при вариациях величины и знака расстройки ν (см. рис. 6) качественно такой же, как и при слабой связи (см. рис. 5). При этом зависимость размеров и углов ориентации осей эллипсов АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ от расстройки ν практически аналогичны. При сильном отраженном сигнале в случае $\nu=-1$ (см. рис. 6, в) рабочая точка смещается в середину линейного участка частотной зависимости $b_{кн}(\chi)$, поэтому степень искажения автодинного отклика $\chi_n(\tau_n)$ в этом случае заметно меньше, чем у изохронного генератора (см. рис. 6, а, б). В то же время на характеристике $g_{кн}(\chi)$ эта точка смещена на середину ее «левого» ската, где формируемый отклик по изменениям амплитуды $a_{n1}(\chi_n)$ получает характерные искажения (см. рис. 6, в).

В случаях отсутствия расстройки ($\nu=0$) и, тем более, при $\nu=1$ рабочая точка переходит ближе к излому частотной зависимости $b_{кн}(\chi)$, к участку, где ее

производная имеет отрицательный знак. Поэтому при вариациях фазы τ_n коэффициента отражения нагрузки при попадании рабочей точки на этот неустойчивый участок возникают скачкообразные изменения мгновенных значений отклика, которые теряют периодичность формирования и напоминают квазистахостический режим работы (см. рис. 6, з, д).

Из результатов анализа полученных характеристик следует, что расстройка частоты стабилизиру-

ющего резонатора в СВЧ-генераторах вызывает такие же изменения в формировании автодинных характеристик, как и явление неизохронности генератора. Отсюда следует, что с помощью некоторой расстройки резонатора относительно частоты собственных колебаний генератора можно добиться компенсации его неизохронности, что обеспечит уменьшение искажений автодинного отклика и, соответственно, расширение динамического диапазона автодинной системы.

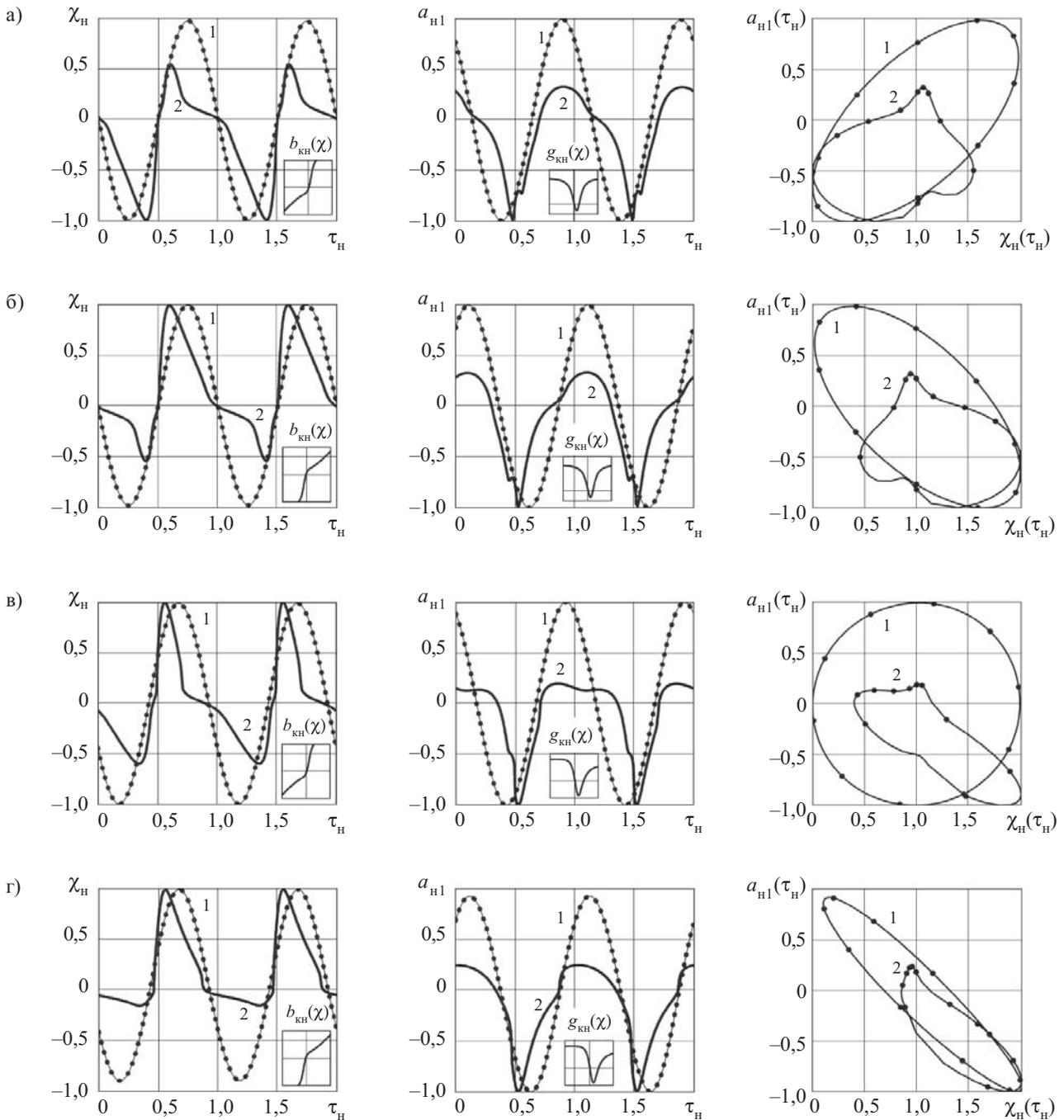


Рис. 5. ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_{n1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ генератора со слабой связью, рассчитанные для $\beta_1=1,5$; $\Gamma=0,01$ (кривые 1) и $\Gamma=0,5$ (кривые 2) при различных значениях коэффициентов γ и ρ и величины расстройки резонатора: а — $\gamma=\rho=0$, $v=-1$; б — $\gamma=\rho=0$, $v=1$; в — $\gamma=\rho=0,5$, $v=-1$; г — $\gamma=\rho=0,5$, $v=1$

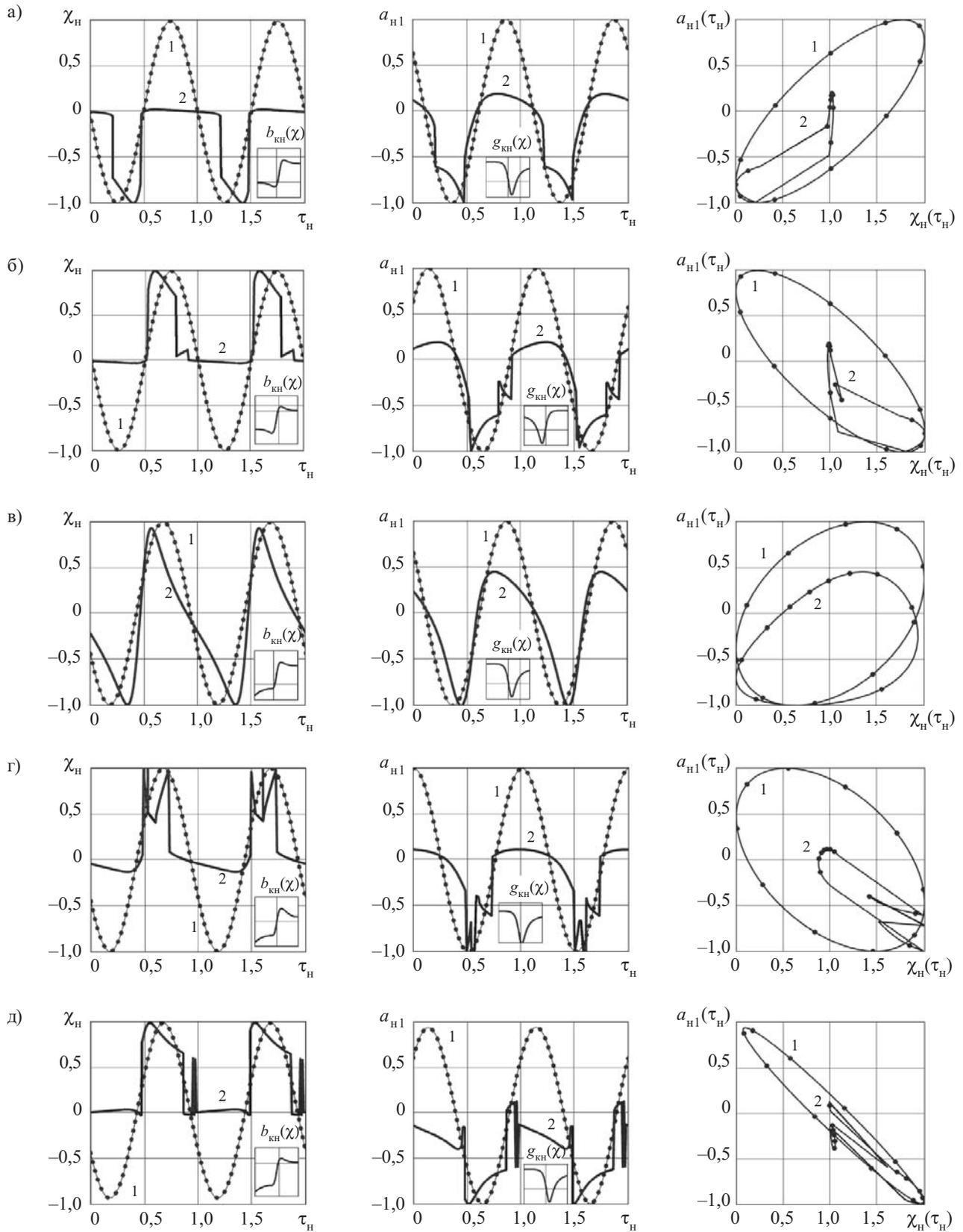


Рис. 6. ЧХА $\chi_H(\tau_H)$, АХА $a_{H1}(\tau_H)$ и АЧХ $a_{H1}(\chi_H)$ стабилизированного автодинного генератора, рассчитанные при $\beta_1=10$; $\beta_2=1$; $Q_{H1}=100$; $Q_{c2}=1000$; $N=0$; $\alpha_{11}=1$; $\xi_{11}=0$; $\Gamma=0,01$ (кривые 1) и $\Gamma=0,5$ (кривые 2) при различных значениях коэффициентов γ и ρ и величины расстройки резонатора:

a — $\gamma=\rho=0$, $v=-1$; б — $\gamma=\rho=0$, $v=1$; в — $\gamma=\rho=0,5$, $v=-1$; г — $\gamma=\rho=0,5$, $v=0$; д — $\gamma=\rho=0,5$, $v=1$

Влияние изменения расстояния до отражателя на автодинные характеристики

Эквивалентом автодина, взаимодействующего с собственным отраженным излучением, как отмечалось во введении [1], является СВЧ-генератор, работающий на длинную линию переменной длины. Известно, что «количество состояний равновесия в такой системе определяется произведением коэффициента отражения на длину линии» [9], что эквивалентно в наших понятиях параметру искажений p_a , определяемому как произведение величины автодинной девиации частоты $\Delta\omega_{ам} = \chi_m \omega_0$ на время запаздывания τ отраженного излучения: $p_a = \Delta\omega_{ам} \tau$ [5]. Данное выражение, справедливое для случая слабого отраженного сигнала, с учетом (13) и результатов работ [1, 5] представим в виде

$$p_a = \frac{2\pi\Gamma N}{Q_{эвб}} \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{1-\gamma\rho} \quad (1)$$

Для нормальной работы большинства автодинных систем необходимо обеспечивать устойчивость режима одночастотных колебаний генератора и отсутствие скачков автодинного отклика. Условием обеспечения такого режима является выполнение для параметра искажений неравенства $p_a < p_{пр}$, где для случая слабого отраженного сигнала предельное значение параметра искажений $p_{пр} = 1$. Тогда из (1) получим соотношение между «внешними» условиями работы системы ближней радиолокации (СБРЛ) и «внутренними» параметрами автодинного генератора, при которых отсутствуют скачкообразные изменения характеристик:

$$\Gamma N \leq \frac{Q_{эвб}}{2\pi} \frac{1-\gamma\rho}{\sqrt{1+\gamma^2}} \quad (2)$$

Из условия (2) видно, что при увеличении расстояния до отражателя N предельное значение коэффициента отражения $\Gamma_{пр}$, при котором возникают скачки, уменьшается и, соответственно, сужается динамический диапазон d_a автодинной СБРЛ по напряжению выходного сигнала. Как можно показать,

$$d_a = \Gamma_{пр} \sqrt{\Pi_{ш}} = \frac{Q_{эвб} \sqrt{\Pi_{ш}}}{2\pi N} \frac{1-\gamma\rho}{\sqrt{1+\gamma^2}}, \quad (3)$$

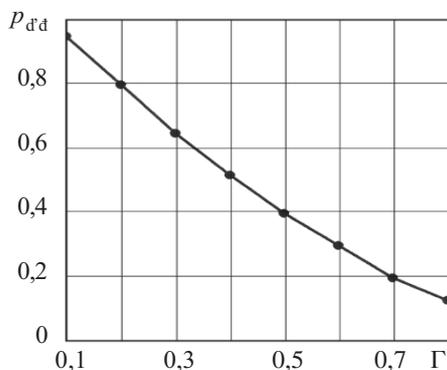


Рис. 7. Зависимость предельного значения параметра искажений $p_{пр}$ от величины модуля коэффициента отражения Γ

где $\Pi_{ш}$ — энергетический потенциал автодина как радиолокатора в заданной полосе частот, который может быть измерен на экспериментальной установке, описанной в [4, 5], по величинам предельного ослабления аттенюатора $D_{ат}$, потерь в волноводном тракте $D_{вт}$ и имитаторе доплеровского сигнала $D_{им}$:

$$\Pi_{ш} = 2(D_{ат} + D_{вт} + D_{им}).$$

В случае сильного сигнала величина $p_{пр}$, как правило, меньше единицы. На рис. 7 представлен график зависимости $p_{пр}(\Gamma)$, полученный путем численного моделирования автодинных откликов согласно уравнениям (11), (12) из [1] при различных значениях Γ и N и поиском тех значений $p_{пр}$, при которых начинаются скачки. Из этого графика видно, что при коэффициенте отражения $\Gamma=0,1$ значение $p_{пр}$ мало отличается от единицы, и в этом случае для определения «внешних» условий работы автодина (Γ и N) и динамического диапазона d_a можно пользоваться выражениями (2) и (3). Однако при дальнейшем увеличении коэффициента отражения Γ величина $p_{пр}$ резко уменьшается. Поэтому для условий сильного отраженного сигнала при расчетах Γ , N и d_a это необходимо учитывать и использовать следующие формулы:

$$\Gamma N \geq p_{пр} \frac{Q_{эвб}}{2\pi} \frac{1-\gamma\rho}{\sqrt{1+\gamma^2}}; \quad (4)$$

$$d_a = p_{пр} \Gamma_{пр} \sqrt{\Pi_{ш}} = p_{пр} \frac{Q_{эвб} \sqrt{\Pi_{ш}}}{2\pi N} \frac{1-\gamma\rho}{\sqrt{1+\gamma^2}}. \quad (5)$$

Графики предельного числа полувольт $N_{пр}$, при котором начинаются скачки, в зависимости от вели-

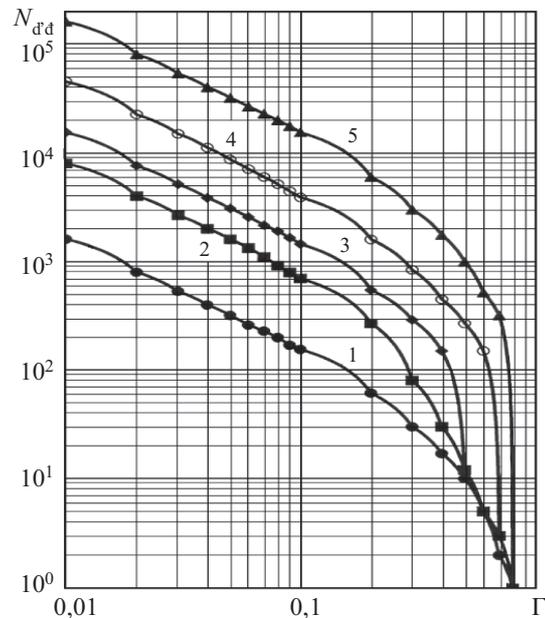


Рис. 8. Зависимость предельного значения числа полувольт $N_{пр}$ от величины модуля коэффициента отражения Γ , рассчитанные при $\beta_2=1$; $Q_{н1}=100$; $Q_{с2}=10000$; $\alpha_{11}=1$; $v=\xi_{11}=\gamma=\rho=0$ и различных значениях β_1 : 1 — $\beta_1=0$; 2 — $\beta_1=1,5$; 3 — $\beta_1=3,4$; 4 — $\beta_1=10$; 5 — $\beta_1=40$

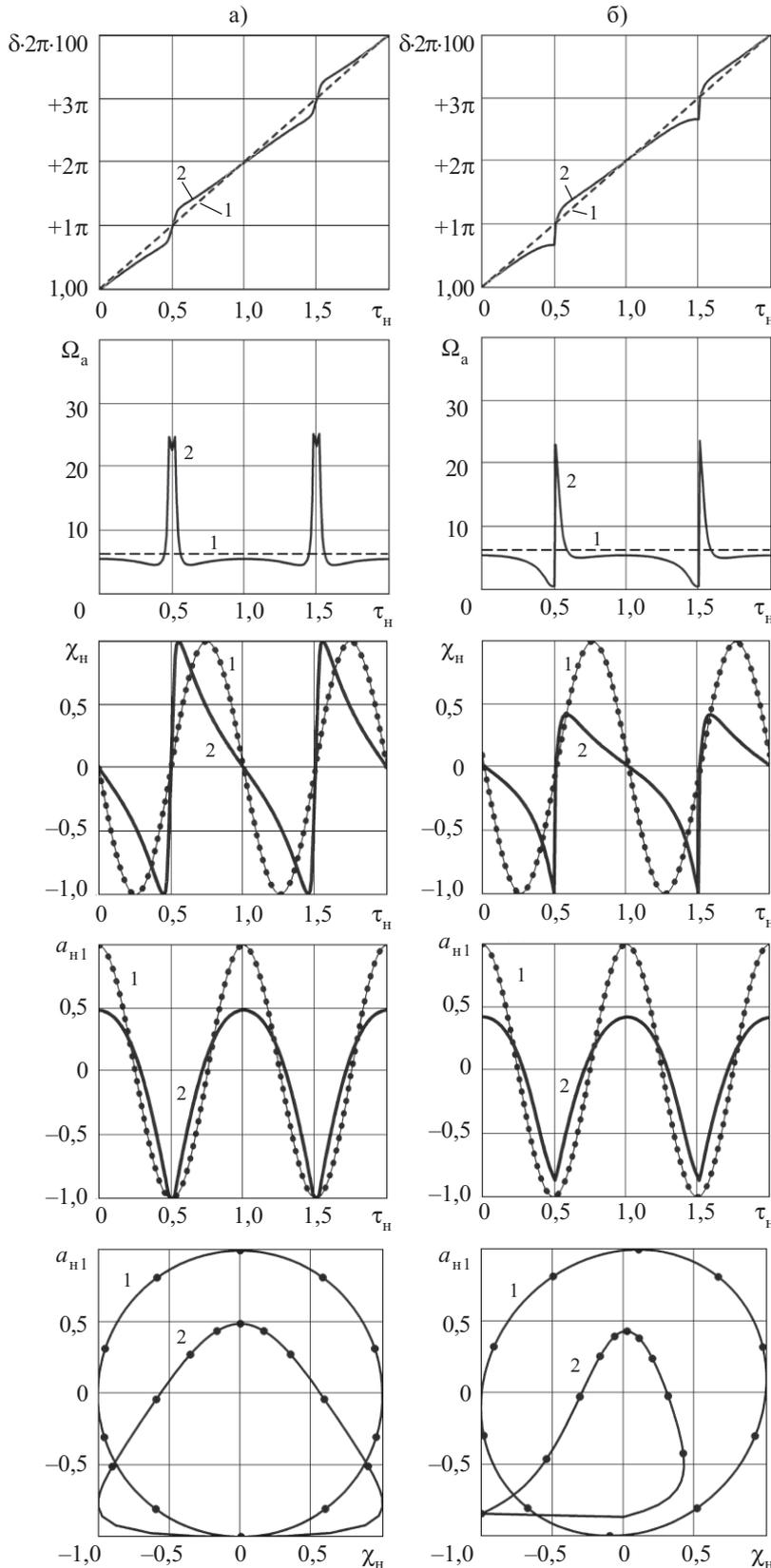


Рис. 9. ФХА $\delta(\tau_n)$, $\Omega_a(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_{n1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ стабилизированного автодинного генератора, рассчитанные при $\beta_1=2,5$; $\beta_2=\alpha_{11}=1$; $Q_{n1}=100$; $Q_{c2}=1000$; $\xi_{11}=0$; $N=100$; $\Gamma=0,01$ (кривые 1); $\Gamma=0,36$ (кривые 2) и различных значениях иных параметров:
 а — $\gamma=\rho=0$, $v=0$; б — $\gamma=-0,1$, $\rho=0$, $v=0$

чины модуля коэффициента отражения Γ для изохронного и изодромного генератора при различных значениях параметра связи β_1 , представлены на рис. 8. Ход этих графиков в диапазоне значений Γ от 0 до 0,1 описывается соотношением (2). При больших значениях коэффициентов отражения Γ , где справедлива обсуждавшаяся выше графическая зависимость $p_{пр}(\Gamma)$ (см. рис. 7), характеристики описываются выражением (4).

Зависимость 1 на рис. 8, соответствующая случаю генератора с одноконтурной колебательной системой, отличается монотонностью и малыми величинами $N_{пр}$. Зависимости 2—5, построенные для стабилизированного генератора, имеют значительно большие значения $N_{пр}$ благодаря фиксирующему действию стабилизирующего резонатора, который обеспечивает высокие значения $Q_{экр}$. При этом необходимо отметить на кривых 2—5 наличие «граничных значений» $\Gamma_{гр}$, после которых с увеличением Γ наблюдается резкое уменьшение предельного числа полувольт $N_{пр}$. Данная неоднородность зависимости, как это отмечалось при анализе рис. 2, обусловлена тем, что уровень отраженного сигнала достигает точки перегиба на графике частотной зависимости реактивной проводимости $b_{кн}(\chi)$ колебательной системы, после чего фиксирующая способность стабилизирующего резонатора уже не обеспечивается. На этом участке характеристик, где $Q_{экр} \approx Q_{н1}$, причем $Q_{н1} \ll Q_{н2}$, параметр искажений p_a резко увеличивается (см. формулу (1)), вызывая соответствующий рост искажений автодинного отклика и появление скачков. Значения $\Gamma_{гр}$ с увеличением параметра связи β_1 , как видно из рис. 8, перемещаются в сторону больших значений Γ . Отсюда следует, что для расширения рабочего диапазона дальности автодинной СБРЛ предпочтительно применение стабилизированных СВЧ-генераторов при сильной связи.

Для анализа влияния расстояния до отражателя (через число полувольт N) и других параметров на форму автодинного отклика в случае слабой связи рабочего и стабилизирующего резонаторов на рис. 9 представ-

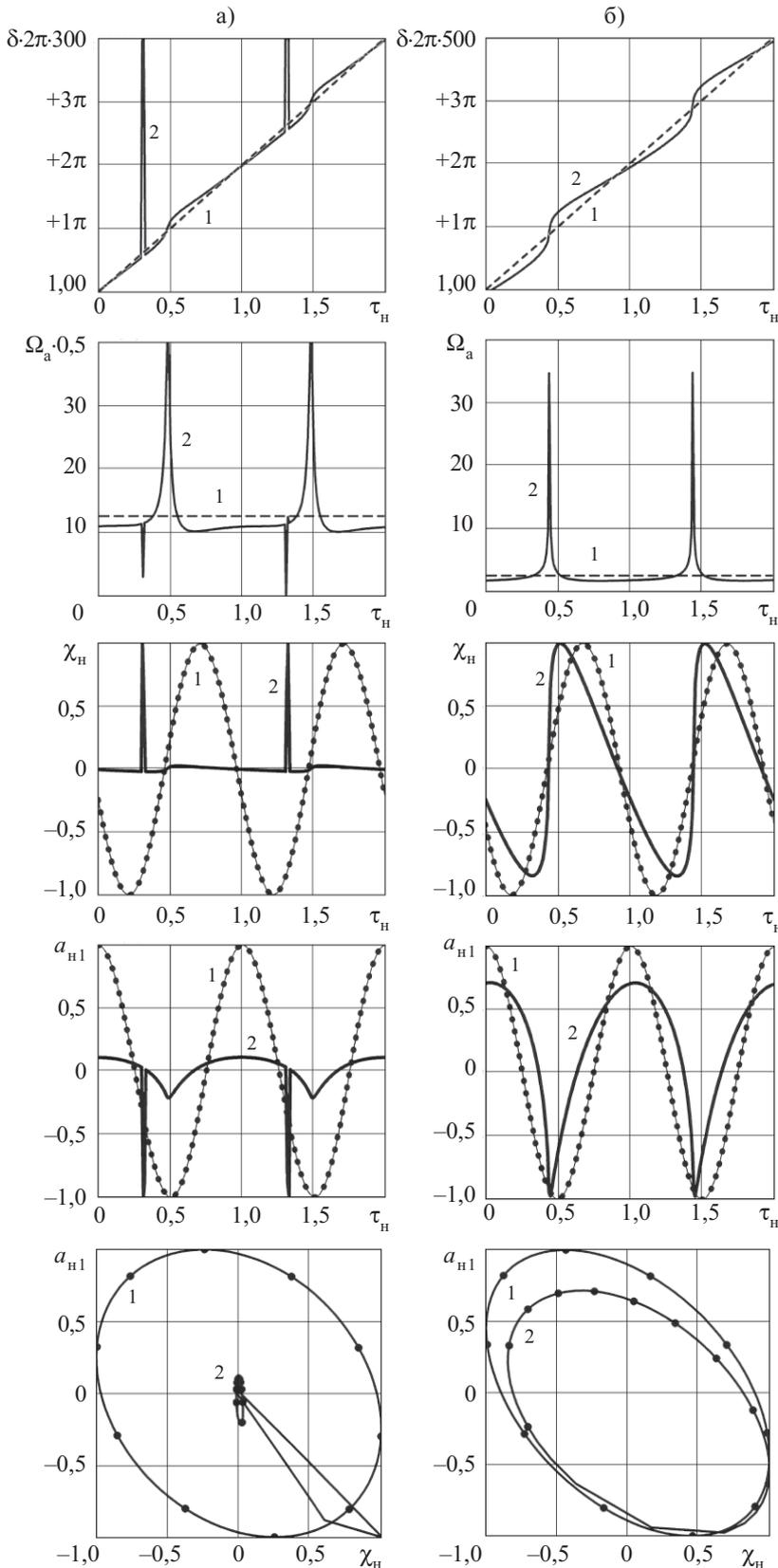


Рис. 10. ФХА $\delta(\tau_n)$, $\Omega_a(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_{n1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ стабилизированного автодинного генератора, рассчитанные при $\beta_2 = \alpha_{11} = 1$; $Q_{n1} = 100$; $Q_{c2} = 1000$; $\nu = 0$; $\xi_{11} = 0$; $\Gamma = 0,01$ (кривые 1), $\Gamma = 0,36$ (кривые 2 на а), $\Gamma = 0,2$ (кривые 2 на б) и различных значениях иных параметров: а — $\beta_1 = 10$, $\gamma = 0,25$, $\rho = 0,1$, $\nu = 0$, $N = 300$; б — $\beta_1 = 40$, $\gamma = 0,5$, $\rho = -0,5$, $\nu = 0$, $N = 5500$

лены графики ФХА $\delta(\tau_n)$, производной от ФХА $\Omega_a(\tau_n) = d\delta(\tau_n)/dt$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_{n1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$. Отметим также, что при расчетах характеристик вносились вариации в параметры расстройки частоты стабилизирующего резонатора. Эти вариации вызывали такие же изменения в поведении этих характеристик, как и неизохронность генератора. Так, например, при величине расстройки резонатора $\nu = -0,15$ для изохронного генератора получены характеристики, приведенные на рис. 9, б, а в случае неизохронного генератора — на рис. 9, а. Данное свойство стабилизированных автодинов обеспечивает возможность коррекции «искажения» характеристик, вызванных неизохронностью генератора.

Из анализа полученных графиков видно, что при слабом отраженном сигнале, когда параметр искажений $p_a \ll 1$ (см. кривые 1 на рис. 9 и 10), ФХА $\delta(\tau_n)$ автодина имеет практически линейную зависимость от нормированного времени τ_n , как у систем гомодинного типа. При этом ее производная $\Omega_a(\tau_n)$, физический смысл которой — мгновенная разность частот зондирующего и отраженного излучений, слабо осциллирует в окрестности нормированной частоты Доплера ($\Omega_{нд} = 2\pi$). Характеристики ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_{n1}(\tau_n)$ при слабом отраженном сигнале являются гармоническими, при этом изменения частоты и амплитуды имеют лишь относительные фазовые смещения, зависящие от внутренних параметров генератора (значений γ и ρ).

При увеличении уровня отраженного излучения до величины, соизмеримой с уровнем зондирующего излучения, наблюдаются искажения автодинных характеристик ЧХА, АХА и АЧХ (см. кривые 2 на рис. 9 и 10). Характер этих искажений за счет влияния числа полупериодов N несколько отличается от рассмотренных ранее симметрично отраженных графиков зависимостей $b_n(\tau_n)$ и $g_n(\tau_n)$ (см. рис. 2, а [1]), а также ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_{n1}(\tau_n)$ стабилизированного автодинного генератора с сильной связью, рассчитанные при $\beta_1 = 10$ и $N = 0$ (см. рис. 2).

Как видно из графиков рис. 9, *а*, здесь представлен случай, предшествующий началу формирования скачка по частоте при величине параметра искажений $p_a=0,56$.

В случае неизохронного генератора (см. рис. 9, *б*) этот параметр составляет уже 0,76, но скачок все еще отсутствует из-за уменьшения амплитуды ЧХА. Специфическая форма изменения ЧХА в этих случаях вызывает формирование ФХА с протяженным почти линейным участком изменения набега фазы δ между участками с резким изменением набега фазы в середине периода, где мгновенная разность частот $\Omega_a(\tau_n)$ имеет пик. Вид такой ФХА $\delta(\tau_n)$ значительно отличается от «волнообразных» графиков характеристик, полученных для случая, когда автодинные изменения частоты находятся в пределах линейного участка частотной зависимости реактивной проводимости (см. рис. 4, [8]). В этом, как нам представляется, заключается причина, по которой нарушается выполнение соотношения (1) при вычислении предельного значения параметра искажений $p_{пр}$ в случае сильного отраженного сигнала. При этом «волны» АХА $a_{н1}(\tau_n)$ вследствие изохронности генератора имеют почти симметричный вид и небольшой специфический наклон, свойственный автодинным сигналам при малом отраженном сигнале [2—7]. При дальнейшем увеличении уровня отраженного излучения ЧХА и АХА получают настолько сильные искажения, что отмеченные выше наклоны волн становятся малозаметными. Следует отметить, что при наличии неизохронности или расстройки частоты стабилизирующего резонатора АЧХ имеют осевую асимметрию. Кроме того, из результатов анализа характеристик рис. 9 следует, что за счет некоторой расстройки частоты стабилизирующего резонатора можно компенсировать асимметрию частотной зависимости реактивной проводимости колебательной системы генератора, вызванную неизохронностью генератора, что также отмечалось выше при анализе влияния расстройки при $N=0$.

На графиках рис. 10, *а* представлены аналогичные характеристики при том же, что и на рис. 9, *а*, значении коэффициента отражения ($\Gamma=0,36$), но при другом параметре связи ($\beta_1=10$) и числе полуволн ($N=300$). Качественные отличия этих характеристик состоят в появлении скачка частоты на характеристике ЧХА в виде короткого импульса большой амплитуды, что обусловлено неоднозначностью частотной зависимости реактивной составляющей проводимости колебательной системы. С учетом амплитуды этих скачков величина параметра искажений $p_a=7,4$, что указывает на появление у системы до семи степеней свободы, из которых кроме основного рабочего состояния она пока (т. е. при этих параметрах) «выбирает» в качестве дополнительного еще одно состояние. Этот импульс является причиной формирования аналогичных пиков на остальных характеристиках: ФХА $\delta(\tau_n)$, АХА $a_{н1}(\tau_n)$ и АЧХ $a_{н1}(\chi_n)$.

Дальнейшее увеличение уровня отраженного сигнала при сохранении числа полуволн (N) приводит к формированию сплошной хаотической генерации скачкообразных импульсов характеристик, что ука-

зывает на более широкий выбор, который «делает» автодинная система из числа рабочих состояний. Избавиться от такого режима работы генератора можно при дальнейшем увеличении параметра связи между резонаторами, что продемонстрировано на рис. 10, *б* для слабого (кривые 1) и сильного (кривые 2) отраженного сигнала при величине параметра связи стабилизирующего резонатора $\beta_1=40$. В этом случае, как видно из характеристик, генератор 8-мм диапазона длины волны обеспечивает вполне удовлетворительный уровень искажений сигнала при расстоянии до отражающего объекта 22 м. Такой результат может представлять интерес, например, при использовании автодинных СВЧ-генераторов в устройствах контроля параметров волноводных трактов большой протяженности [10, с. 49].

Из анализа полученных результатов следует, что в случае слабой связи между резонаторами в стабилизированном генераторе при воздействии на него сильного отраженного сигнала в условиях больших расстояний до отражающего объекта весьма сложно обеспечить устойчивое формирование автодинного отклика с сохранением его информативных свойств (т. е. при малых искажениях). Однако в случае сильной связи автодинный генератор может вполне устойчиво работать в более широком динамическом диапазоне изменений дальности и уровня отраженного излучения.

Результаты экспериментальных исследований

Целью проведенных экспериментальных исследований не была абсолютная проверка выполненного выше анализа. В представленных ниже результатах мы ограничились демонстрацией лишь качественной стороны эволюции происходящих процессов в стабилизированном автодинном генераторе при увеличении уровня отраженного излучения, поскольку полная экспериментальная проверка требует немалых финансовых и временных затрат.

Экспериментальные исследования, как и в [8], выполнялись на примере модифицированного генераторного модуля 8-мм диапазона «Тигель-08М». Модуль изготовлен по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна и детекторного диода с барьером Шоттки, смонтированных вместе со целевым резонатором на поликорковой подложке в виде вставки, которая помещается в корпус генератора [11]. Автодинный отклик снимался с выхода детекторного диода, нагруженного на сопротивление 2 кОм.

В работе использовался экспериментальный стенд, описанный в [8]. Автодинный генератор непосредственно состыковывается с входным фланцем аттенюатора (см. рис. 7, [8]). К выходному фланцу последнего подключается без использования дополнительного волноводного тракта имитатор доплеровского сигнала. Расстояние от СВЧ-генератора до штыревого отражателя имитатора, когда этот штырь находится в точке запуска импульса синхронизации (см. рис. 8, [8]), составляет 0,3 м.

Выходной сигнал детектора после усиления и фильтрации в блоке аналоговой обработки следует в блок цифровой обработки, где подается на один из кана-

лов аналогового ввода модуля NI-9205 в составе платформы DAQ-9172. Далее оцифрованный сигнал поступал по интерфейсу USB в персональный компьютер для обработки с помощью виртуального прибора, созданного в LabView 8.6.

После настройки автодинного модуля на режим максимального энергетического потенциала по изложенной в [4, 5, 8] методике при изменении аттенуатором величины затухания в тракте были сняты зависимости коэффициента гармоник K_T и уровня гармонических составляющих ($n=1, \dots, 5$) спектров автодинного отклика исследуемого генератора по изменению амплитуды $a_1(n)$ колебаний от величины модуля коэффициента отражения Γ , вычисляемого по формуле $\Gamma=(10^{-0,1D})^{1/2}$, где $D=2(D_{ат}+D_{вт}+D_{им})$ — общее затухание излучения от генератора до имитатора и обратно; $D_{ат}$, $D_{вт}$, $D_{им}$ — выраженные в дБ затухания в аттенуаторе, волноводном тракте и имитаторе соответственно.

Суммарные потери в имитаторе и волноводном тракте составили около 1,5 дБ. Графики этих зависимостей представлены на рис. 11. В ходе снятия этих характеристик были получены также представленные на рис. 12 осциллограммы и спектрограммы автодинного отклика при различных значениях коэффициента отражения. Окружная скорость движения отражателя поддерживалась постоянной на уровне 1,5 м/с, что соответствует доплеровской частоте сигнала около 320 Гц при направлении его перемещения — от генератора.

При сравнительно малом уровне отраженного сигнала ($\Gamma < 0,1$) форма осциллограммы автодинного отклика $a_1(\tau)$ весьма близка к синусоидальной и имеет сравнительно малые искажения. С увеличением величины Γ форма искажается заметно сильнее. Так, при $\Gamma=0,2$ коэффициент гармоник K_T составляет 30%, уровень второй гармоники всего на 8 дБ ниже уровня первой гармоники (см. рис. 12, а). Как видно из графиков рис. 11, при дальнейшем увеличении коэф-

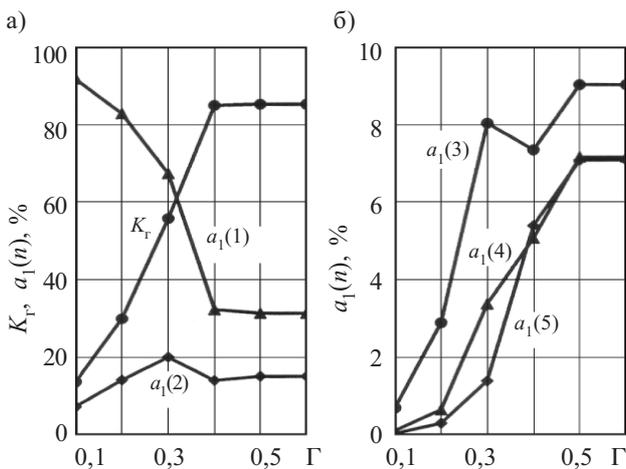


Рис. 11. Зависимости коэффициента гармоник K_T (а) и уровня гармонических составляющих (с первой по пятому: 1, 2 — на а, 3, 4, 5 — на б) спектров автодинного отклика генератора на диоде Ганна по изменению амплитуды $a_1(n)$ колебаний от величины модуля коэффициента отражения Γ

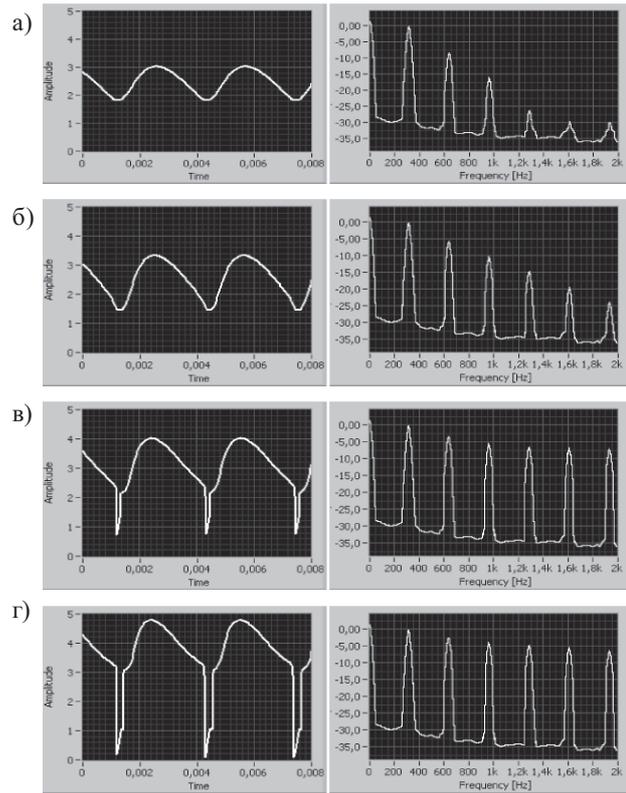


Рис. 12. Осциллограммы (слева) и спектрограммы (справа) выходных сигналов $a_1(\tau)$ по изменению амплитуды колебаний, полученные от движущегося отражателя при различных значениях модуля коэффициента отражения Γ :

а — 0,2; б — 0,3; в — 0,4; г — 0,5

фициента отражения Γ в диапазоне до 0,4 уровень первой гармоники $a_1(1)$ резко уменьшается, а уровень высших гармоник — резко растут. При этом коэффициент гармоник достигает 85%. Это связано, прежде всего, с «нелинейностью» нагрузки, а также с нелинейностью генератора по амплитуде, которая связана с процессом преобразования автодинных изменений частоты в изменения амплитуды колебаний. Последнее подтверждается ростом уровня второй гармоники $a_1(2)$ автодинного отклика. Немонотонный рост третьей гармоники $a_1(3)$ на этом же участке характеристик объясняется наличием некоторой расстройки стабилизирующего резонатора и собственной частоты генератора.

При достижении коэффициентом отражения Γ значения 0,4 происходят качественные изменения в автодинном отклике. Как видно из осциллограммы рис. 12, в, при этом значении Γ в автодинном отклике появляется пичок, который обусловлен переходом частоты за границы линейного участка частотной зависимости реактивной проводимости. Дальнейшее увеличение Γ вызывает лишь рост амплитуды этого пичка (см. рис. 12, г) и, соответственно, значительный рост уровня высших гармоник автодинного отклика. Данные особенности формирования автодинного отклика значительно отличаются от таковых для случая одноконтурной колебательной системы [12].

Сравнение представленных на рис. 11 и 12 опытных данных с соответствующими данными расчетов, приведенных на рис. 5 и 7 в [1], показывает качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Заключение

Выполненные исследования автодинных СВЧ-генераторов, стабилизированных внешним высокодобротным резонатором, позволили определить особенности формирования частотных, амплитудных, амплитудно-частотных, а также фазовых характеристик в условиях высокого уровня воздействия собственного отраженного излучения. Основные результаты этих исследований состоят в следующем.

Основной причиной искажений автодинного отклика СВЧ-генераторов в случае большого отраженного сигнала является негармоничность изменения резистивной и реактивной составляющих комплексной проводимости нагрузки при равномерном изменении фазы отраженной волны, а также нелинейность частотных зависимостей резистивной и реактивной составляющих колебательной системы генератора. Внутренние свойства генератора, такие как его неизохронность и неизодромность, а также наличие расстройки частот стабилизирующего резонатора и собственной частоты генерации являются дополнительными факторами, вызывающими искажения. При этом, однако, с помощью этой расстройки можно несколько скомпенсировать влияние внутренних свойств на искажения и тем самым добиться расширения динамического диапазона автодинной системы.

Для уменьшения уровня искажений автодинного отклика при высоком уровне отраженного излучения предпочтительней использовать сильную связь между резонаторами. При таком условии одновременно реализуются достоинства одноконтурного генератора, имеющего линейные частотные зависимости составляющих проводимости резонансной системы, и стабилизированного генератора, обеспечивающего высокую фиксирующую способность частоты.

Величины автодинной девиации частоты и времени запаздывания отраженного излучения, определяющие величину параметра искажений автодинного отклика, также вызывают дополнительные искажения в этом случае, как и в случае слабого отраженного сигнала. Установлено, что при сильном отраженном сигнале граничное значение параметра искажений получается меньше единицы, что отличает его от случая слабого сигнала. Причины такого отклонения от известного условия обусловлены особенностями нелинейного поведения коэффициента отражения нагрузки генератора.

Результаты работы представляются полезными при интерпретации результатов экспериментальных исследований стабилизированных автодинных генераторов, взаимодействующих с собственным отраженным излучением, при анализе особенностей формирования сигналов автодинов, расчетах характеристик, а также при оптимизации параметров СВЧ-генераторов, предназначенных для автодинных систем ближней радиолокации и других целей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Влияние внутренних параметров стабилизированных СВЧ генераторов на формирование автодинного отклика при сильном отраженном сигнале // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. — 2011. — № 4. — С. 43 — 53. [Noskov V. Ja., Ignatkov K. A., Smol'skij S. M. // *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoj Apparature*. 2011. N 4. P. 43]
2. Гершензон Е. М., Туманов Б. Н., Бузыкин В. Т. и др. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах // *Радиотехника и электроника*. — 1982. — Т. 27, № 1. — С. 104—112. [Gershenzon Ye. M., Tumanov B. N., Buzykin V. T. i dr. // *Radiotekhnika i elektronika*. — 1982. — Vol. 27, N 1. — P. 104]
3. 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., Zakarljuk N. M. // *Elektronnaja tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*. 1985. N 10. P. 6]
4. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Исследование автодинных характеристик СВЧ-генераторов на полупроводниковых диодах // *Электронная техника. Сер. СВЧ-техника*. — 1992. — № 7. — С. 9—14. [Buzykin V. T., Noskov V. Ja. // *Elektronnaja tekhnika. Ser. SVCh-tekhnika*. 1992. N 7. P. 9]
5. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2007. — № 7. — С. 3—33. [Votoropin S. D., Noskov V. Ja., Smol'skij S. M. // *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 2007. N 7. S. 3]
6. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2009. — № 3. — С. 3—50. [Votoropin S. D., Noskov V. Ja., Smol'skij S. M. // *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 2009. N 3. P. 3]
7. Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2009. — № 6. — С. 3—51. [Noskov V. Ja., Smol'skij S. M. // *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 2009. N 6. P. 3]
8. 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. Ja., Ignatkov K. A., Smol'skij S. M. // *Tekhnika i pribory SVCh*. 2011. N 1. P. 31]
9. Новожилова Ю. В., Сергеев А. С. Параметрическая неустойчивость в автогенераторе с отражением от удаленной нагрузки // *Труды 19-ой Международной Крымской Микроволновой Конференции «КРЫМИКО-2009»*. — Севастополь, 2009. — С. 675—676. [Novozhilova Ju. V., Sergeev A. S. // *Trudy 19-oy Mezhdunarodnoj Krymskoj Mikrovolnovoju Konferencii «KRYMIKO-2009»*. Sevastopol', 2009. P. 675]
10. Барташевский Е. Л., Острейковский А. В., Привалов Е. Н. Контроль стабильности характеристик СВЧ-трактов с помощью автодина на диоде Ганна // *Измерительная техника*. — 1985. — № 10. — С. 49—51. [Bartashevskij Ye. L., Ostrejkovskij A. V., Privalov Ye. N. // *Izmeritel'naja tekhnika*. 1985. N 10. P. 49]
11. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 1. Конструкторско-технологические достижения // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2006. — № 12. — С. 3—30. [Votoropin S. D., Noskov V. Ja., Smol'skij S. M. // *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 2006. N 12. P. 3]
12. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Автодинный отклик при сильном отраженном сигнале // *Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сборник научных трудов*. — Харьков: ИРЭ АН Украины. — 1992. — С. 52—56. [Buzykin V. T., Noskov V. Ja. // *Primenenie radiovoln millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov. Sbornik nauchnykh trudov. Kharkov: IRJe AN Ukrainy*. 1992. P. 52]