



КОГЕРЕНТНЫЙ РЕЗОНАНС В ПРИБОРАХ СВЧ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

С. А. Садовников

Приводятся результаты экспериментальных исследований явления когерентного резонанса в электронных приборах сверхвысоких частот с длительным взаимодействием. Изучены основные закономерности этого эффекта в таких приборах. Обнаружен и исследован эффект подавления шумового резонансного отклика внешним гармоническим сигналом, который может быть использован для повышения соотношения сигнал/шум на выходе приборов. Отмечены характерные особенности этого эффекта в приборах с длительным взаимодействием.

Ключевые слова: СВЧ, ЛБВ, ЛОВ, автогенератор, когерентный резонанс, подавление шумов, регенерация.

Введение

В нелинейных динамических системах на пороге самовозбуждения проявляется так называемое явление когерентного резонанса (КР), когда высота резонансного отклика, индуцированного внесёнными в систему внешними шумами, достигает максимума, а ширина спектра становится минимальна при вполне определённом уровне шумового сигнала [1–2]. Этот эффект изучен различными авторами численно [1–3] и подтверждён экспериментально в низкочастотном диапазоне [4]. В резонансных СВЧ динамических системах эффект был изучен на примере клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью в режиме регенерации [5–6]. Целью данной работы является изучение основных закономерностей явления когерентного резонанса в СВЧ-приборах с длительным взаимодействием (ЛБВ и ЛОВ).

1. Экспериментальные исследования когерентного резонанса в ЛОВ и ЛБВ

Для проведения экспериментальных исследований когерентного резонанса в ЛОВ и ЛБВ были собраны две многофункциональные установки, схемы которых показаны на рис. 1.

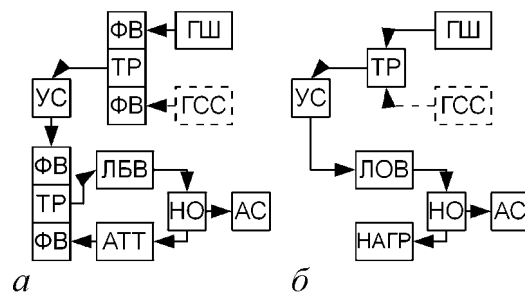


Рис. 1. Принципиальные схемы установок: *а* – ЛБВ, *б* – ЛОВ. ГШ – шумовой генератор Е4438С, ГСС – генератор стандартных сигналов Г4-80 (для схемы с ЛБВ) и серии XGA для схемы с ЛОВ, ФВ – ферритовые вентили, ТР – тройники, АТТ – поляризационный аттенюатор, НАГР – нагрузка, АС – анализатор спектра Е4408В, УС – транзисторные усилители

$I/I_s = 0.95$. Для ЛОВ напряжение на замедляющей системе было равно 140 В, ток 0.8 мА, что также соответствовало отношению рабочего тока к пусковому 0.95.

На рис. 2 показаны спектры шумовых откликов на выходе ЛБВ (*а*) и ЛОВ (*б*). Установлено, что при плавном увеличении мощности шумового сигнала в исследуемых системах возникает шумовой резонансный отклик (кривые 1). При определённой мощности внешних шумов ширина его спектра по уровню половинной мощности минимальна (кривые 2). Дальнейшее повышение мощности шумов приводит к расширению спектра (кривые 3, 4), после чего наблюдалось падение мощности резонансного отклика из-за разгруппировки электронного потока.

На рис. 3 приведены зависимости от интенсивности внешних шумов D : ширины спектра df резонансного отклика по уровню половинной мощности, нормированной высоты h резонансного отклика, отношения величины пускового тока I_s системы при внешнем шумовом воздействии к величине пускового тока без внешнего воздействия $I_{s\text{ авт}}$.

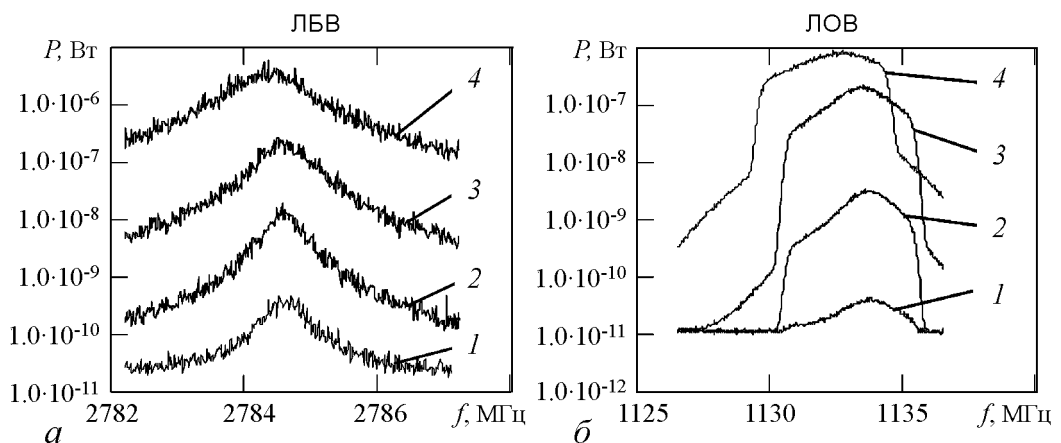


Рис. 2. Спектры шумовых откликов на выходе при различных мощностях входного шумового сигнала D . *а* – для ЛБВ: 1 – 20 мкВт, 2 – 120 мкВт, 3 – 7 мВт, 4 – 0.2 Вт. *б* – для ЛОВ: 1 – 50 нВт, 2 – 0.17 мкВт, 3 – 16 мкВт, 4 – 150 мкВт

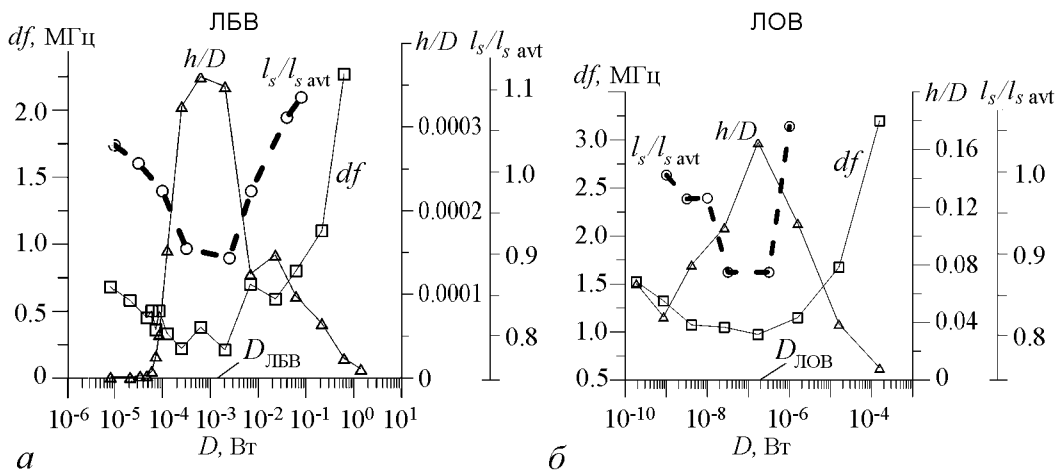


Рис. 3. Зависимость df , h/D и пускового тока от внешних шумов D

Пусковой ток системы определялся при помощи ВЧ-осциллографа, подключённого вместо анализатора спектра. Для каждого значения мощности внешних шумов при плавном увеличении рабочего тока фиксировались гистограммы выходного сигнала. Ток, при котором гистограмма теряла вид гауссова распределения и начинала принимать характерную для гармонического сигнала «двурогую» форму, считался пусковым.

На рис. 3 видны характерные точки $D_{\text{ЛБВ}} = 0.4$ мВт (a) и $D_{\text{ЛБВ}} = 0.1$ мкВт (b), где зависимости имеют выраженные экстремумы, соответствующие режиму КР, когда максимум h/D совпадает с минимумом значений df . Кроме того, в режиме КР наблюдается интересное явление – уменьшение пускового тока приборов. Следует отметить, что при уменьшении отношения рабочего тока к пусковому точка КР сдвигается в сторону больших шумов, что было характерно и для резонансных СВЧ-систем.

2. Исследование влияния внешнего гармонического сигнала на шумовой резонансный отклик

Были проведены исследования влияния внешнего гармонического сигнала на амплитуду резонансного отклика в исследуемых системах. Для этого на вход систем вместе с шумами, необходимыми для достижения режима КР, подавался гармонический сигнал с ГСС (см. схемы на рис. 1). Так же, как и для клистронного автогенератора [5], был обнаружен эффект подавления внешним гармоническим сигналом шумового резонансного отклика, инициированного внешними шумами. На рис. 4 приведены выходные спектры ЛБВ и ЛОВ при различных мощностях и фиксированной частоте (a) гармонического сигнала, а также при различной частоте и фиксированной мощности (b) гармонического сигнала. Метками $s1$ и $s2$ отмечены уровни гармонического сигнала, метками $o1$ и $o2$ – уровни шумовых откликов.

Из рисунков видно, что при повышении мощности внешнего гармонического сигнала и при настройке частоты внешнего гармонического сигнала на частоты резонансного отклика уровень шумов уменьшается на порядок.

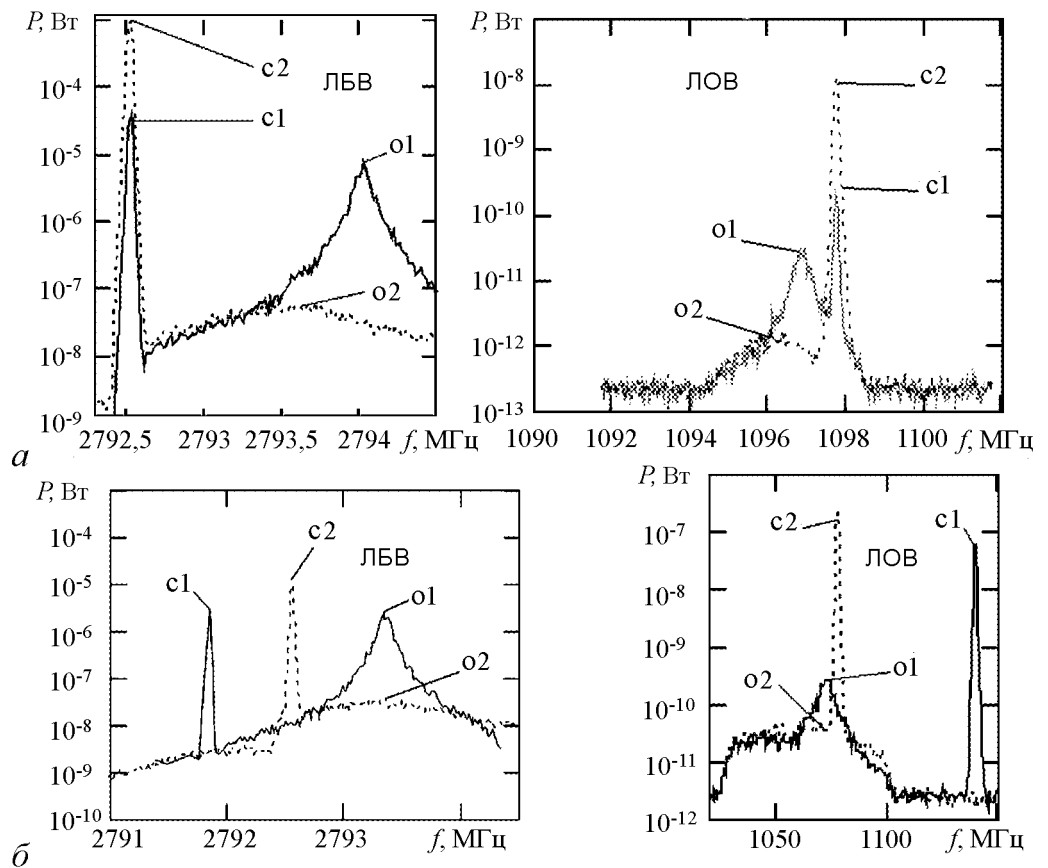


Рис. 4. Спектры выходного сигнала ЛБВ и ЛОВ в режиме КР под внешним воздействием различной мощности (а) и частоты внешнего гармонического сигнала (б)

Приведённые спектры позволяют оценить изменение такого важного параметра для радиотехнических систем, как соотношение сигнал–шум (SNR). Подавление резонансного отклика приводит к увеличению соотношения сигнал–шум на выходе, которое определялось как соотношение мощностей сигнала и отклика. На рис. 5 показаны изменения соотношения сигнал/шум на выходе и входе ($SNR_{\text{вых}}/SNR_{\text{вх}}$) в зависимости от мощности и частоты гармонического сигнала.

Характерная особенность явления когерентного резонанса в электронных приборах с длительным взаимодействием О-типа (ЛОВ и ЛБВ) состоит в том, что значение SNR на выходе этих приборов существенно выше, чем у клистронных автогенераторов в режиме регенерации. В ЛБВ, например, оно составляет 30, а у клистронного автогенератора – 4. Эта особенность, на наш взгляд, связана с тем, что эффект подавления шумового резонансного отклика внешним гармоническим сигналом, напоминающий классический эффект синхронизации [1], в ЛБВ и ЛОВ происходит на значительной длине взаимодействия электронного потока с бегущей волной, существенно превышающей длину взаимодействия в клистронах даже с большим числом резонаторов.

Другая отличительная особенность указанного явления в приборах с длительным взаимодействием заключается в том, что шумовой резонансный отклик на внешний шумовой сигнал в приборах без локального поглотителя из-за сильной дисперсии замедляющей системы имеет характерный для взаимодействия с бегущей волной

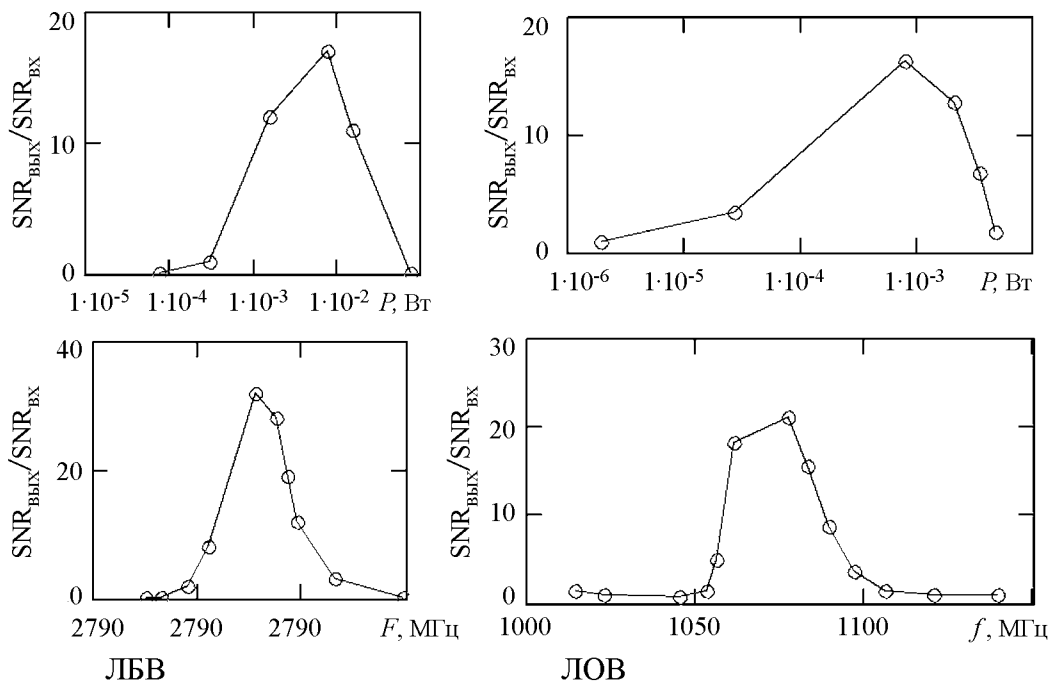


Рис. 5. Изменение соотношения сигнал-шум под влиянием внешнего гармонического сигнала в режиме КР

вид, когда для одного узкого частотного интервала происходит усиление сигнала, а для другого соседствующего узкого частотного интервала (внешнего шумового сигнала) имеет место поглощение.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование явления когерентного резонанса в СВЧ-системах с длительным взаимодействием на пороге самовозбуждения. Показано, что основные свойства явления КР в них совпадают с наблюдаемыми явлениями в резонансных приборах клистронного типа. Отмечены характерные особенности этого явления в приборах с длительным взаимодействием. Обнаружен и исследован эффект подавления шумового резонансного отклика как при увеличении мощности внешнего гармонического сигнала, так и при уменьшении расстройки частот внешнего гармонического сигнала и резонансного отклика, который может быть использован для повышения соотношения сигнал/шум на выходе систем с длительным взаимодействием.

Автор выражает благодарность профессору Б.С. Дмитриеву и профессору Ю.Д. Жаркову за постановку задачи и полезные обсуждения, а также заведующему лабораторией В.Н. Скороходову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-02-00057, 11-02-00047) и в рамках Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-1430.2012.2).

Библиографический список

1. *Pikovsky T.A. and Kurths J.* Coherence resonance in a noise-driven excitable system // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78. P. 775.
2. *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е.* Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 544 с.
3. *Casado J.M.* Noise-induced coherence in an excitable system // *Phys. Lett. A.* 1007. Vol. 235. P. 489.
4. *Феоктистов А.В., Астахов С.В., Анищенко В.С.* Когерентный резонанс и синхронизация стохастических автоколебаний в системе ФитцХью–Нагумо// *Изв. вузов. ПНД.* 2010. Т. 18, № 5.
5. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н., Степанов А.О.* Когерентный резонанс в клистронном автогенераторе на пороге самовозбуждения // *Письма в ЖТФ.* 2011 Т. 37, вып. 22. С. 86.
6. *Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M.* Chaotic dynamics of delayed feedback klystron oscillator and its control by external signal // *IEEE Trans. On Electron Devices.* 2005. Vol. 52, № 5. P. 790.
7. *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны // *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 5-я Зимняя школа-семинар инженеров.* Саратов: Изд-во СГУ, 1980. С. 25.

*Саратовский госуниверситет
им. Н.Г. Чернышевского*

Поступила в редакцию 21.03.13

COHERENCE RESONANCE IN UHF DEVICES WITH LONG INTERACTION

S. A. Sadovnikov

This work presents results of experimental studies of coherence resonance phenomenon in UHF devices with long interaction (TWT and BWO). Basic properties of this phenomenon were investigated. Discovered suppression effect of resonant response on external noise by external harmonic signal. This suppression effect can be used to increase signal-to-noise ratio in system's output. Specific features of coherence resonance phenomenon in long-interaction devices also noted.

Keywords: UHF, TWT, BWO, self-oscillator, coherence resonance, noise suppression, regeneration.



Садовников Сергей Александрович – родился в 1986 году. Окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2008). В настоящее время – аспирант кафедры нелинейной физики СГУ. Область научных интересов – экспериментальные исследования нелинейной динамики в СВЧ автогенераторах. Имеет 6 публикаций.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: zzfz@inbox.com