

09

Когерентный резонанс в клистронном автогенераторе на пороге самовозбуждения

© Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, С.А. Садовников,
В.Н. Скороходов, А.О. Степанов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: DmitrievBS@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2011 г.

Приводятся данные по экспериментальному исследованию явления когерентного резонанса в нелинейной динамической системе — клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью (ЗОС). Показано, что при работе клистронного автогенератора на пороге самовозбуждения подача внешнего белого шумового сигнала приводит к возбуждению резонансного отклика в системе, максимум которого достигается при вполне определенной мощности шумового воздействия. Впервые экспериментально в СВЧ-диапазоне продемонстрировано, что явление когерентного резонанса при подаче внешнего гармонического сигнала позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум на выходе кольцевого регенеративного усилителя.

Большой интерес в ряде статей по нелинейным динамическим системам вызывает вопрос о конструктивной роли шумов в возбуждении колебаний в этих системах. В частности, в нелинейных динамических системах, управляемых белым шумом, проявляется так называемое явление когерентного резонанса [1]. Это явление наблюдается, когда собственные шумы динамической системы, находящейся на пороге самовозбуждения, малы по отношению к внешнему шуму, и состоит в том, что амплитуда индуцированных шумом колебаний достигает максимума при вполне определенном уровне внешнего шумового сигнала. Когерентный резонанс может наблюдаться вблизи бифуркаций периодических движений [2]. Эффект когерентного резонанса изучен различными авторами численно [1,3] и подтвержден экспериментально в низкочастотных каскадных возбуждаемых электронных цепях [4]. Также были выполнены численные моделирования со связанными нейронами

и для случая упорядоченного отклика связанной сети доказано существование оптимальной интенсивности шумового сигнала [5]. Однако в СВЧ динамических системах этот эффект не исследован. Кроме того, оставалось неясным, какие достоинства имеет когерентный резонанс в эксперименте. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований когерентного резонанса в пятирезонаторном клистронном автогенераторе с ЗОС, описанном в [6,7], работающем на пороге самовозбуждения.

Для исследования эффекта когерентного резонанса была разработана схема источника интенсивного белого шума. Он представляет собой цепочку усилителей СВЧ-шума. В качестве исходного источника шума используется лампа бегущей волны средней мощности с магнитной периодической фокусирующей системой, работающая в режиме отсутствия входного сигнала и усиливающая шум собственного электронного потока. Источником шумовых колебаний со сплошным спектром, в широкой полосе частот является дробовой эффект в ЛБВ. Для повышения общего уровня шумов использовались еще два усилителя: широкополосный транзисторный усилитель фирмы Agilent с коэффициентом усиления 25 dB и пятирезонаторный клистронный усилитель с коэффициентом усиления в оптимальном режиме 30 dB. В такой цепочке на рабочей частоте 2800 MHz в полосе частот 30 MHz была получена интегральная мощность шумов 600 mW.

Для экспериментального исследования когерентного резонанса, возникающего при внешнем шумовом воздействии, использовался клистронный автогенератор с ЗОС, работающий на пороге самовозбуждения. В качестве управляющих параметров выбирались ускоряющее напряжение (в пределах от 1200 до 2500 V), ток электронного пучка (от 5 до 75 mA) и затухание в цепи обратной связи (от 0 до 30 dB). Выбором этих параметров в клистроне с ЗОС можно реализовать различные режимы работы: режим на пороге самовозбуждения, стационарную генерацию, автомодуляцию, развитой хаос. Принципиальная схема установки для исследования изучаемого эффекта в клистронном автогенераторе представлена на рис. 1, а. Цифрами обозначены: 1 — клистроны, 2 — направленные ответвители, 3 — поляризационный аттенуатор, 4 — ферритовые вентили, 5 — генератор стандартных сигналов Г4-80, 6 — ЛБВ, 7 — транзисторный усилитель Agilent 87415A, 8 — тройник, 9 — переключатель, 10 — цифровой запоминающий

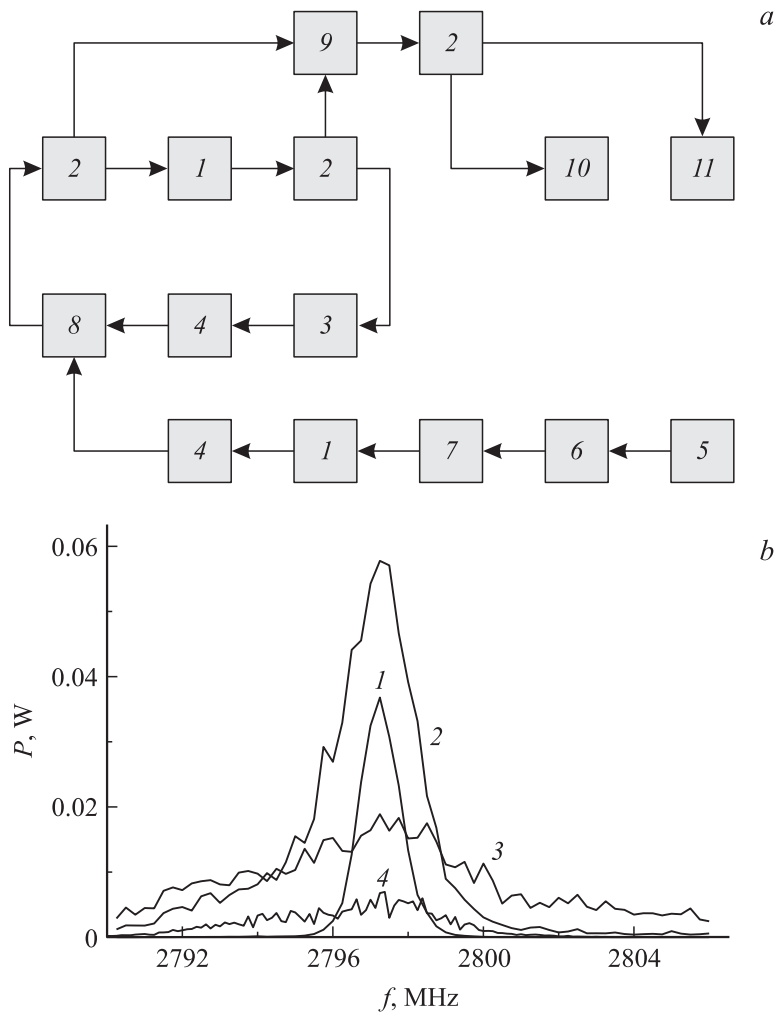


Рис. 1. *a* — принципиальная схема установки; *b* — спектры резонансных откликов на выходе клистрона при различных интенсивностях шумов D (1 — 0.15 мВт, 2 — 20, 3 — 300 мВт) и при закрытом поляризационном аттенуаторе (4 — 20 мВт), когда резонансный отклик не наблюдается.

осциллограф Infiniium DSO81004B, 11 — цифровой анализатор спектра ESA-L E4408B.

В ходе исследования эффекта когерентного резонанса в клистронном автогенераторе с ЗОС было установлено, что плавное увеличение интенсивности шумового сигнала (за счет выбора тока ЛБВ), подаваемого в цепь обратной связи, приводит к появлению резонансного отклика в исследуемой системе на частоте клистрона ω_p уже при малом уровне шумов. Дальнейшее увеличение интенсивности шума приводит одновременно к росту резонансного пика и расширению его спектральной линии. Следует отметить, что клистронный автогенератор при токе меньше пускового является резонансным регенеративным усилителем. В этой кольцевой автоколебательной системе подбором ускоряющего напряжения можно добиться максимума инициированного шумами резонансного отклика. На рис. 1, *b* представлены спектры мощности резонансных откликов на выходе клистрона при различных интенсивностях шумов и при закрытом поляризованном аттенюаторе, когда резонансный отклик не наблюдается. Анализ временных реализаций и распределения вероятностей мгновенных значений резонансных откликов, снятых с помощью цифрового осциллографа серии DSO, показывает, что резонансные отклики соответствуют широкополосному шуму с гауссовым распределением.

Для количественной оценки степени когерентности системы удобно ввести понятие меры когерентности $C(D)$ [2]:

$$C(D) = \frac{h(D)}{W(D)},$$

где D — интенсивность шумового сигнала, $h(D)$ — высота шумового пика, индуцированного в спектре на резонансной частоте ω_p , $W(D) = \Delta\omega_p/\omega_p$ — относительная ширина его спектральной линии.

В ходе эксперимента с помощью анализатора спектра фиксировались значения высоты резонансного отклика $h(D)$, резонансной частоты ω_p и ширины отклика $\Delta\omega_p$ по уровню 3 dB и вычислялась мера когерентности $C(D)$. На рис. 2, *a* представлены зависимости высоты резонансного отклика $h(D)$ и относительной ширины спектральной линии резонансного отклика $W(D)$ от интенсивности шумового сигнала D . Видно, что с ростом D , $h(D)$ сначала резко возрастает, достигает максимума и заметно падает, а $W(D)$ при уровне шумов

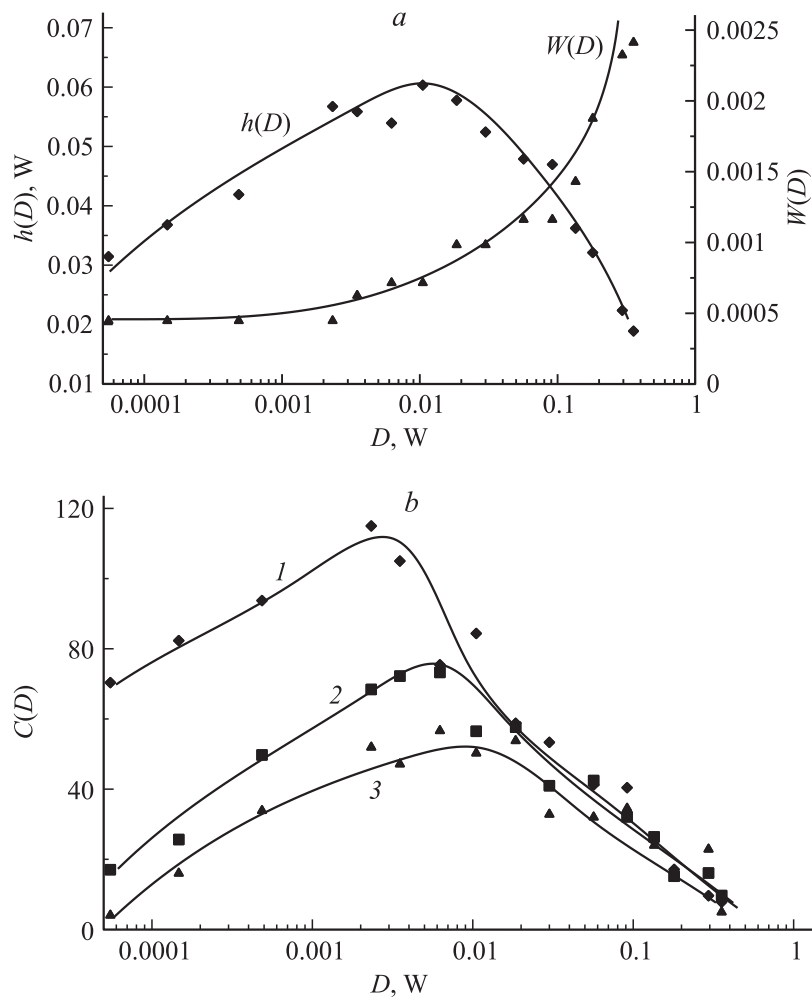


Рис. 2. *a* — зависимости высоты резонансного отклика $h(D)$ и относительной ширины спектральной линии резонансного отклика $W(D)$ от интенсивности шумового сигнала D ; *b* — зависимости меры когерентности $C(D)$ от интенсивности шумов D для разных отношений рабочего тока клистрона к пусковому (*1* — 0.95, *2* — 0.92, *3* — 0.85).

больше 0.1 W начинает резко возрастать. Такой ход зависимости $h(D)$ связан, по-видимому, с нелинейностью системы, обусловленной разгруппировкой электронного потока в клистроне при большой интенсивности шумового сигнала, а поведение $W(D)$ определяется возрастанием диффузии фазы, приводящей к расширению спектральной линии.

В процессе исследований эффекта когерентного резонанса была снята серия зависимостей меры когерентности $C(D)$ от интенсивности шумов D для разных отношений рабочего тока клистрона к пусковому. Значение пускового тока составляло 8.2 mA . Эти зависимости приведены на рис. 2, *b*. Следует отметить, что собственные шумы клистронного автогенератора, работающего на пороге самовозбуждения, составляют всего $120 \mu\text{W}$ в полосе частот 5.6 MHz . Отчетливо видна оптимальная мощность внешних шумов, при которой мера когерентности максимальна. Подобная картина поведения системы, по-видимому, может быть объяснена из следующих соображений: внешние шумы, вносимые в цепь обратной связи автогенератора, находящегося на пороге самовозбуждения, инициируют резонансный отклик в нем. При увеличении мощности подаваемых шумов мера когерентности таких колебаний увеличивается до определенного значения интенсивности внешнего шумового сигнала, после которого мера когерентности начинает падать вследствие уменьшения высоты флуктуационного пика из-за разгруппировки электронного потока и увеличения относительной ширины спектральной линии, обусловленного внешними шумами. Как видно из рис. 2, *b*, оптимальное значение интенсивности шума D , при котором достигается максимум меры когерентности, при увеличении отношения рабочего тока к пусковому несколько смещается в сторону меньших значений интенсивности шумов. Такое поведение системы можно объяснить следующим образом: чем больше ток пучка (и соответственно отношение рабочего тока к пусковому), тем выше коэффициент усиления резонансного клистронного усилителя и тем меньшее значение интенсивности шума нужно для достижения максимума резонансного отклика.

В ходе эксперимента было исследовано также влияние внешнего гармонического сигнала от генератора стандартных сигналов, вводимого наряду с шумами на вход ЛБВ, на явление когерентного резонанса и отношение сигнал/шум SNR на выходе регенеративного клистронного усилителя с ЗОС. Значение пускового тока составляло 8.2 mA , отношение рабочего тока к пусковому — 0.95 . На рис. 3, *a* представлены

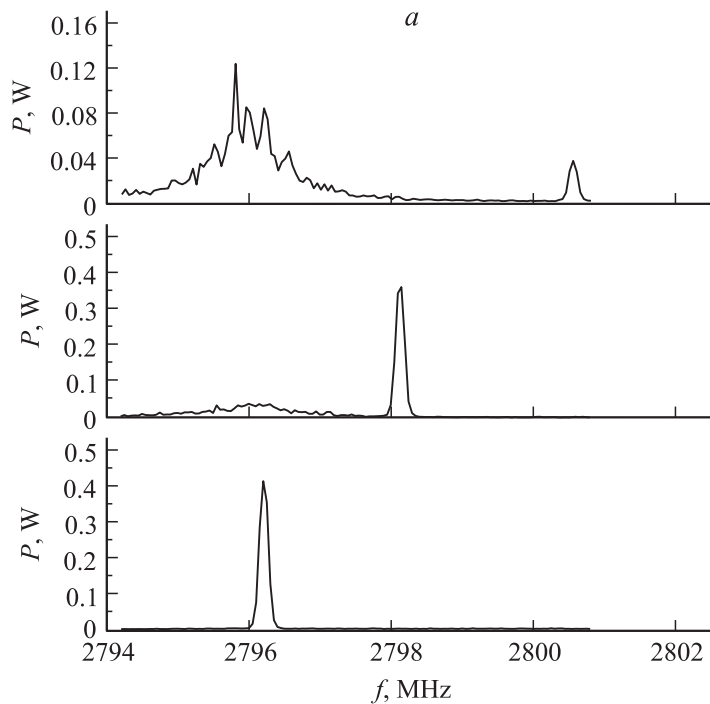


Рис. 3. *a* — спектрограммы сигналов на выходе усилителя при разных частотных отстройках гармонического сигнала от шумового резонансного отклика; *b* — отношения сигнал/шум на входе (кривая 1) и на выходе (кривая 2) клистронного регенеративного усилителя с ЗОС в зависимости от частоты гармонического сигнала.

спектрограммы сигналов на выходе усилителя при разных частотных отстройках гармонического сигнала от шумового резонансного отклика. В этой серии спектрограмм частота внешнего гармонического сигнала, находящегося справа от резонансного отклика, уменьшается. Видно, что при отстройке гармонического сигнала от шумового резонансного отклика в 2 МГц и менее наблюдается синхронизация шумового резонансного отклика внешним сигналом, состоящая в захвате частоты и подавлении шумов. Подавление шумов максимально при совпадении ча-

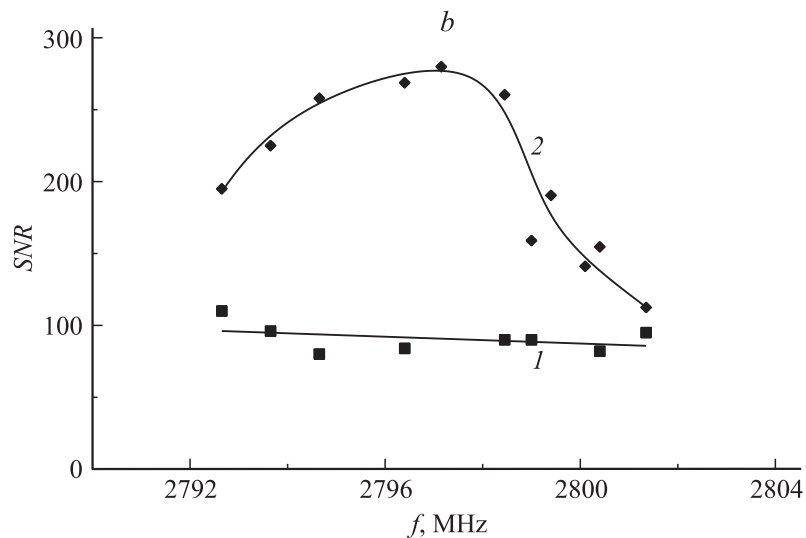


Рис. 3 (продолжение).

стот шумового резонансного отклика и гармонического сигнала. На входе и выходе регенеративного клистронного усилителя было проведено измерение соотношения сигнал/шум. В эксперименте SNR определяется как отношение высоты спектральной линии гармонического сигнала над шумовым основанием к высоте шумового основания в спектре выходного сигнала. На рис. 3, *b* представлены отношения сигнал-шум на входе и на выходе клистронного регенеративного усилителя с ЗОС в зависимости от частоты. Видно, что при частоте 2795 MHz, при которой наблюдается максимальное подавление шумового резонансного отклика, SNR на выходе усилителя в 3 раза превышает эту величину на входе усилителя.

Это важное достоинство регенеративного кольцевого клистронного усилителя в режиме когерентного резонанса связано с совместным действием двух эффектов: во-первых, за счет подавления флуктуаций, возбуждаемых внешними шумами, гармоническим сигналом вследствие синхронизации; во-вторых, за счет усиления внешнего гармонического сигнала из-за регенерации в клистронном усилителе.

В заключение отметим, что явление когерентного резонанса является первым этапом исследования влияния внешних шумов на нелинейные динамические системы. Обнаружено, что в СВЧ-кольцевых автогенераторах, находящихся на пороге самовозбуждения, подача внешнего шумового сигнала приводит к резонансному отклику в системе. Показано, что мера когерентности индуцированных внешними шумами колебаний максимальна при вполне определенной интенсивности шумового сигнала. Впервые экспериментально продемонстрировано, что подача внешнего гармонического сигнала позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум на выходе кольцевого регенеративного усилителя в режиме когерентного резонанса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-02-00057 и 11-02-00047) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-3407.2010.2).

Список литературы

- [1] *Pikovsky A., Kurths J.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 775–778.
- [2] *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Г.* Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. С. 446.
- [3] *Casado J.M.* // Phys. Lett. A. 1997. V. 235. P. 489–492.
- [4] *Postnov D.E., Han S.K., Yim T.Y., Sosnovtseva O.V.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. R3791–3794.
- [5] *Kurrer Ch., Schulten K.* // Phys. Rev. E. 1995. V. 51. P. 6213–6218.
- [6] *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 7. С. 105–110.
- [7] *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 2. С. 62–69.