



СИНХРОНИЗАЦИЯ АУТОКОЛЕБАНИЙ В КЛИСТРОННОМ АУТОГЕНЕРАТОРЕ В ПРИСУТСТВИИ ШУМА

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

Приведены результаты экспериментального исследования синхронизации клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью в присутствии шума. Показано, что эффект синхронизации приводит к заметному уменьшению внесенных шумов, увеличению синхронизирующего сигнала и сужению полосы синхронизации. При подаче на вход клистрона аддитивной суммы гармонического и шумового сигналов в результате синхронизации существенно увеличивается отношение сигнал–шум.

Ключевые слова: Клистронный автогенератор с запаздывающей обратной связью, синхронизация в присутствии шума, отношение сигнал–шум.

Введение

Теория синхронизации в генераторах с шумом была развита еще в 20 веке и описана в классических трудах [1,2]. Однако до настоящего времени мало экспериментальных работ по изучению синхронизации автогенераторов СВЧ в присутствии шума, хотя эти вопросы весьма важны для увеличения качества колебаний в СВЧ-диапазоне. В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования явления синхронизации описанного в [3] автогенератора СВЧ на пьезорезонаторном клистроне с запаздывающей обратной связью (ЗОС) в присутствии шума.

1. Описание измерительного комплекса

Для проведения исследований был разработан и откалиброван универсальный измерительный комплекс, позволяющий изучать влияние внешнего сигнала на регулярные колебания в исследуемом клистроне в присутствии шума. Схема комплекса показана на рис. 1.

Основным источником шума в данной схеме является лампа бегущей волны (ЛБВ) с магнитной периодической фокусирующей системой. ЛБВ в качестве основного источника шумового сигнала используется по двум причинам: высокие собственные шумы и широкая полоса частот. Как известно, основным источником шума



Рис. 1. Измерительный комплекс для исследования влияния внешнего сигнала на колебания клистронного генератора в присутствии шума

в ЛБВ является дробовой эффект. На рис. 2 приведен спектр шумового сигнала ЛБВ при токе 50 мА и ускоряющем напряжении 2200 В. Интегральная мощность шумов около 2 мкВт в полосе частот 1200 МГц, спектральная плотность мощности шумов составила $2 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц.

Такой мощности шумов для проведения запланированных исследований явно не достаточно. Для повышения общего уровня шумов используются дополнительно еще два усилителя. Во-первых, транзисторный усилитель А301–04 (УС1), с диапазоном частот от 2 до 4 ГГц и коэффициентом усиления 33 дБ. При этом достигнуто существенное увеличение мощности до 10 мВт в полосе частот 2 ГГц. Для дальнейшего увеличения уровня мощности шумов дополнительно использовался пятирезонаторный клистронный усилитель с коэффициентом усиления 30 дБ. В этом случае в полосе частот 30 МГц можно получить увеличение интегральной мощности шумов до 1.7 Вт. Спектральная характеристика полученного шумового сигнала приведена на рис. 3 (центральная частота 2800 МГц).

Для проведения исследования влияния шумов на синхронизацию внешним периодическим сигналом на вход исследуемого автогенератора кроме шумов подавался сигнал от генератора стандартных сигналов Г4–80 (ГСС). При этом для увеличения мощности синхронизирующего сигнала был дополнительно включён усилитель

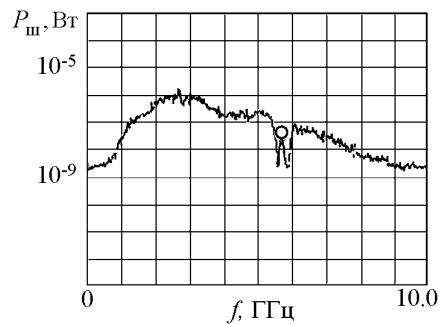


Рис. 2. Спектр шумового сигнала ЛБВ

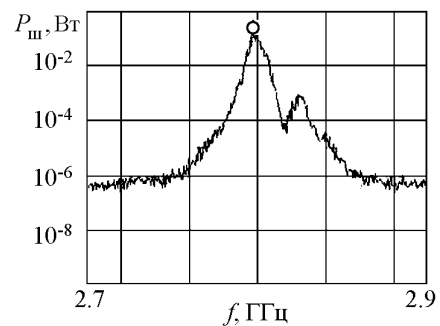


Рис. 3. Вид шумового сигнала в цепочке из трёх усилителей: ЛБВ, транзисторный усилитель, клистрон

Agilent 87415A (UC2). Наблюдение спектра проводилось с помощью цифрового анализатора спектра Agilent E4408B. Универсальность такого измерительного комплекса заключалась в том, что он дает возможность исследования характеристик как самих внешних шумов, так и влияния этих шумов на динамику исследуемого автогенератора с ЗОС, а также синхронизацию колебаний гармоническим сигналом в присутствии шума.

2. Методика и результаты измерения влияния внешнего воздействия на автоколебания в резонансных автогенераторах СВЧ в присутствии шума

Изучение поведения автоколебательной системы в присутствии шума при внешнем гармоническом воздействии имеет большое значение для науки и техники [4]. В зависимости от вида нелинейной характеристики автоколебательной системы, уровня внешнего гармонического воздействия, соотношения частоты внешнего воздействия и частоты колебаний автоколебательной системы будут наблюдаться различные результирующие эффекты, обусловленные внешними шумами.

В рамках исследования влияния внешних шумов на синхронизацию клистронного автогенератора внешним периодическим сигналом были поставлены эксперименты по изучению данного явления при определенной мощности одночастотных колебаний в системе для различных интенсивностей внешнего шума и мощностей синхронизирующего сигнала.

Как известно, классическая картина эффекта синхронизации в исследуемой системе без внешних шумов имеет следующий вид. При определенных параметрах в системе наблюдается одночастотная генерация. При введении в систему внешнего (синхронизирующего) сигнала мощность одночастотного сигнала начинает уменьшаться до полного его исчезновения, а синхронизирующего – увеличиваться. Частоту, при которой происходит полное исчезновение одночастотного сигнала, можно считать частотой начала синхронизации. Далее при изменении частоты синхронизирующего сигнала одночастотный сигнал вновь возникает в спектре колебаний исследуемой системы. Это можно считать окончанием эффекта синхронизации. По разности частот, при которых происходит окончание и начало синхронизации, можно определить полосу синхронизации.

До проведения экспериментального изучения синхронизации в системах с шумом предварительно было исследовано влияние внешних шумов на автоколебания клистронного автогенератора в режиме одночастотной генерации. На рис. 4 приведены спектрограммы клистронного автогенератора для различных уровней интегральной мощности внешнего шума. Как видно из рис. 4, *а*, при отсутствии шума клистрон генерирует единственную частоту 2796.1 МГц с мощностью сигнала 860 мВт и шириной спектральной линии порядка 0.1 МГц. При последовательном увеличении шумов до значения $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}} = 0.3$ (рис. 4, *б*) мощность в максимуме падает до 600 мВт, а ширина спектральной линии расширяется до 0.3 МГц.

При $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}} = 0.4$ (рис. 4, *в*) мощность падает до 270 мВт, а спектральная линия расширяется до 0.6 МГц. Явно видно, что шум приводит к резкому падению мощности и к диффузии фазы, приводящей к тому, что мгновенная частота (скорость изменения фазы) есть случайная функция времени. Диффузия фазы свидетельствует о том, что колебания не являются более строго периодическими. При дальнейшем увеличении $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}} = 1.8$ (рис. 4, *е*) происходит полное подавление регулярных автоколебаний внешним шумом. Этот эффект подавления физически объясняется силь-

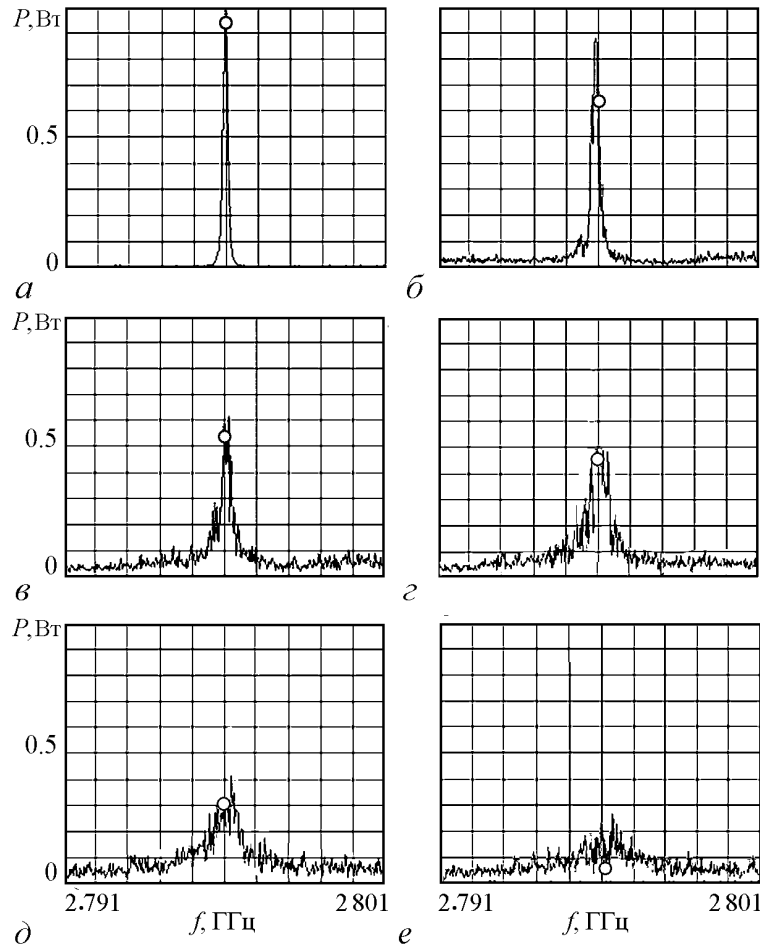


Рис. 4. Спектры выходного сигнала P клистронного автогенератора для разных уровней мощности внешнего шума $P_{\text{ш}}$:
 $a - P_{\text{ш}} = 0$,
 $b - P_{\text{ш}}/P_c = 0.1$,
 $в - P_{\text{ш}}/P_c = 0.3$,
 $г - P_{\text{ш}}/P_c = 0.4$,
 $д - P_{\text{ш}}/P_c = 0.9$,
 $e - P_{\text{ш}}/P_c = 1.8$

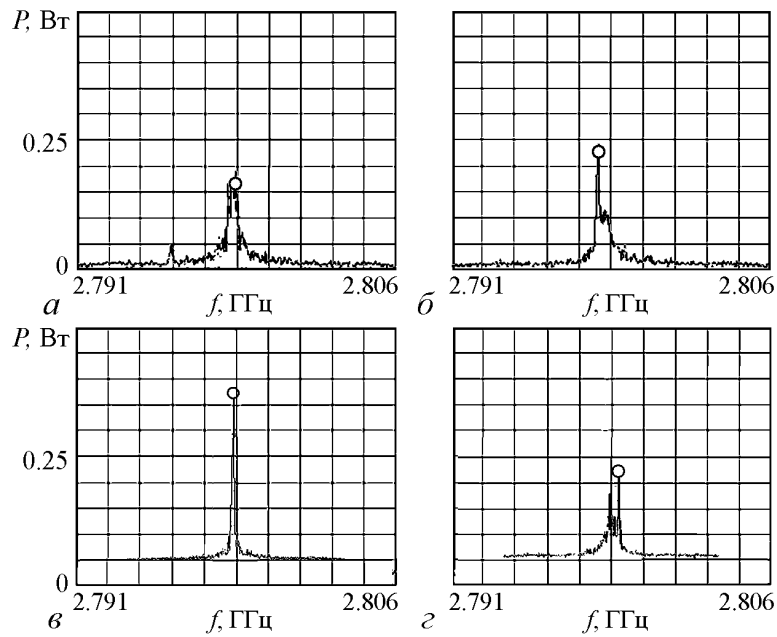


Рис. 5. Характерная картина эффекта синхронизации колебаний зашумленного клистронного автогенератора при воздействии внешнего одночастотного сигнала: a – спектр колебаний отдельных сигналов: синхронизирующего и сигнала клистрона над шумовым пьедесталом; $б$ – начало синхронизации; $в$ – максимальная мощность автоколебаний и минимальная мощность шумов при синхронизации (мощность сигнала увеличилась до 400 мВт); $г$ – окончание синхронизации

ной разгруппировкой электронных сгустков в клистроне под действием внешнего шумового сигнала и резким падением амплитуды первой гармоники сгруппированного тока в выходном резонаторе клистрона.

В рамках исследования влияния внешних шумов на синхронизацию была выбрана зона генерации клистронного автогенератора при токе пучка $I = 17$ мА, ускоряющем напряжении $U = 2080$ В и затухании в цепи обратной связи $L = 9$ дБ. Эта зона соответствует точке амплитудной характеристики на восходящем ее участке ($P_c = 200$ мВт). Сначала на вход клистронного автогенератора подавался шумовой сигнал с интегральной мощностью около 100 мВт и средней частотой, совпадающей с частотой клистрона. В результате сигнал клистрона располагался над шумовым пьедесталом. Затем на вход автогенератора вводился синхронизирующий сигнал с мощностью 10 мВт (на рис. 5, а приведены отдельные сигналы: синхронизирующий (слева) и клистронный над шумовым пьедесталом (в центре)) и плавно менялась частота синхронизирующего сигнала.

Характерная картина эффекта синхронизации клистронного автогенератора с поданными на его вход шумовым сигналом (интегральная мощность шума $P_{ш} = 100$ мВт) и внешним гармоническим сигналом приведена на рис. 5. Как видно из спектрограмм, эффект синхронизации приводит к заметному уменьшению уровня внесенных шумов и резкому увеличению синхронизирующего сигнала. Интересный эффект уменьшения шумов в наблюдаемом сигнале можно объяснить подавлением флуктуаций, вызванных шумами, вследствие синхронизации.

Для внешнего шума различных интенсивностей целесообразно привести серию зависимостей мощности автоколебаний от расстройки частот Δf (разности между частотой одночастотного сигнала в автономном режиме автогенератора и частотой синхронизирующего сигнала, при котором производится измерение мощности), позволяющую определить полосу синхронизации. Такая серия зависимостей приведена на рис. 6.

Представляется интересным построить зависимость полосы синхронизации df от мощности внешних шумов. Данная зависимость приведена на рис. 7. Видно, что с увеличением мощности шумов, подаваемых на вход исследуемой системы, происходит сужение полосы синхронизации (при увеличении мощности шумов она сузилась более чем в 2 раза).

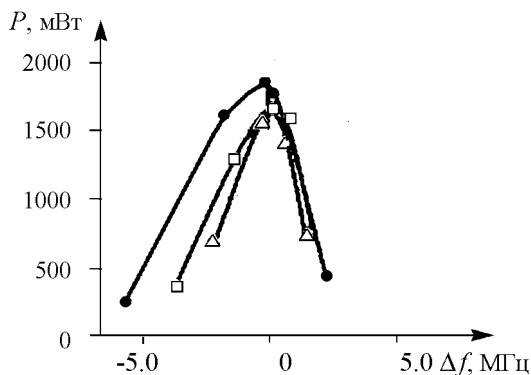


Рис. 6. Поведение мощности автоколебаний от расстройки частот автономного генератора ($P_c = 570$ мВт, $I = 20$ мА, $U = 1907$ В) и синхронизирующего сигнала (57 мВт) для разных интенсивностей внешнего шума: \circ — в автономном случае $P_{ш} = 0$ мВт; \square — для мощности шума $P_{ш} = 2$ мВт; \triangle — для мощности шума $P_{ш} = 13$ мВт

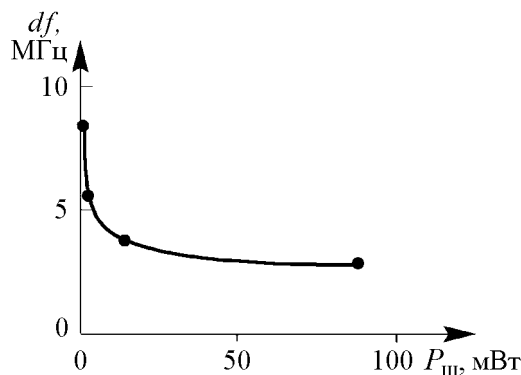


Рис. 7. Зависимость полосы синхронизации от мощности внешних шумов на восходящем участке амплитудной характеристики

Полученные результаты (см. рис. 6, 7) можно объяснить следующими физическими представлениями: при добавлении внешних шумов в систему происходит диффузия фазы колебаний, и мощность одночастотного сигнала снижается, а как известно, при уменьшении мощности одночастотного сигнала полоса синхронизации сужается.

Полученные результаты согласуются с приведенными в литературе результатами (см., например, [4, 5]). В частности, в [4] показано, что при ограниченном шуме полоса синхронизации есть монотонно убывающая функция интенсивности внешнего шума. Данное утверждение подтверждается и приведенными результатами.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование синхронизации автоколебаний в клистронном автогенераторе в присутствии внешних шумов позволяет сделать вывод, что синхронизация зашумленных автоколебаний приводит к двум интересным эффектам, проявляющимся одновременно. Во-первых, при определенных уровнях мощности зашумленных собственных автоколебаний и синхронизирующего сигнала за счет эффекта синхронизации при совпадении частот наблюдается существенное увеличение амплитуды синхронизируемого сигнала на частоте внешнего воздействия (например, в автономном режиме – от 57 до 1700 мВт). Во-вторых, вследствие синхронизации происходит значительное уменьшение уровня шумового пьедестала наблюдаемого сигнала при совпадении частот за счет подавления автоколебаний, индуцированных внешними шумами.

Приведенные результаты позволяют предложить еще одно важное с практической точки зрения направление экспериментальных исследований влияния внешнего воздействия на автоколебания в системах СВЧ в присутствии шума. Суть этого предложения заключается в следующем. На вход клистронного автогенератора, работающего в режиме периодических колебаний, подается внешний зашумленный синхронизирующий сигнал и подбором частоты этого внешнего сигнала и средней частоты полосы шума осуществляется синхронизация колебаний. В этом режиме можно получить увеличение амплитуды синхронизирующего сигнала с одновременным некоторым понижением уровня шумового пьедестала. В итоге следует ожидать увеличения отношения сигнал–шум на выходе этого своеобразного усилителя по сравнению с отношением на входе.

Для проведения этих исследований был собран специальный измерительный комплекс, схема которого представлена на рис. 8.

На собранном измерительном комплексе была исследована синхронизация клистронного автогенератора с ЗОС внешним периодическим сигналом генератора стандартных сигналов (ГСС) Г4-80 и шумовым пьедесталом, создаваемым перестраиваемым генератором шума Agilent E4438C. Основные характеристики генератора шума: диапазон частот от 250 кГц до 6 ГГц; мощность 100 мВт на частоте 3 ГГц, ширина частот шумового сигнала до 80 МГц. Зашумлённый синхронизирующий сигнал усиливался усилителем Agilent 87415A (УС) и подавался через тройник в цепь обратной связи клистронного автогенератора. Спектр фиксировался с помощью цифрового анализатора спектра Agilent E4408B. Автономный сигнал клистронного автогенератора имел мощность 230 мВт, а входной синхронизирующий сигнал ГСС –

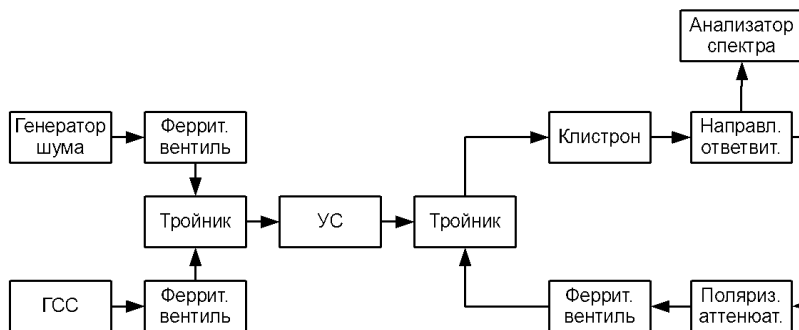


Рис. 8. Измерительный комплекс для исследования влияния шумов на колебания клистронного автогенератора

12 мВт над шумовым пьедесталом с полосой 2 МГц и уровнем мощности 2 мВт. В ходе эксперимента измерялось отношение сигнал – шум (SNR) как отношение высоты спектральной линии сигнала над шумовым основанием к высоте шумового основания в спектре сигнала на выходе и входе клистрона [6]. Кроме того, измерялся коэффициент усиления K в режиме синхронизации этого своеобразного усилителя.

Результаты измерений спектров колебаний при различной расстройке Δf_p синхронизирующего сигнала относительно сигнала клистронного автогенератора приведены на рис. 9.

На рис. 10 дана зависимость коэффициента усиления K от частоты синхронизирующего сигнала f , а на рис. 11 – зависимость SNR на входе (а) и выходе (б) клистрона также от частоты f . Коэффициент усиления и SNR вычислялись по оцифрованным спектрограммам.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что внешнее воздействие на автоколебания в СВЧ автогенераторах в присутствии шума, приводящее к явлению синхронизации, вызываемому, с одной стороны, увеличением амплитуды поданного на вход клистронного автогенератора сигнала (коэффициент усиления

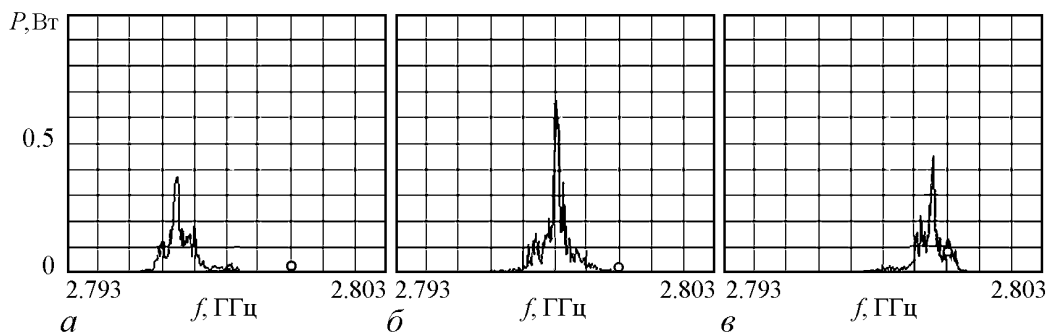


Рис. 9. Спектр колебаний при расстройке синхронизирующего сигнала относительно сигнала клистронного автогенератора: а – $\Delta f_p = -1.63$ МГц – начало синхронизации; б – $\Delta f_p = 0$ МГц – полная синхронизация; в – $\Delta f_p = +1.47$ МГц – конец синхронизации

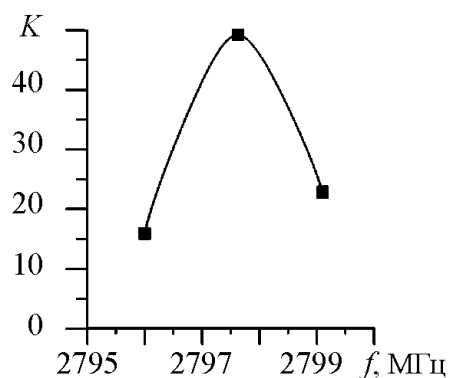


Рис. 10. Зависимость коэффициента усиления K от частоты f

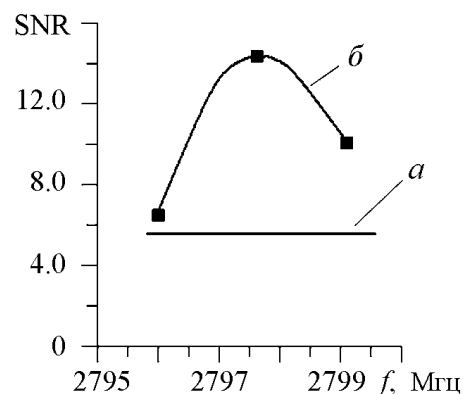


Рис. 11. Зависимость SNR на входе (а) и выходе (б) от частоты f

по мощности достигает 17 дБ), а с другой – росту SNR в 2.5 раза. Таким образом, существенно повышается качество внешнего зашумленного сигнала.

Эффективность предлагаемого способа улучшения отношения сигнал–шум на выходе клистрона определяется высоким значением SNR (порядка 15) и значительной выходной мощностью (порядка 0.6 Вт), полученными даже без оптимизации за счет выбора уровня внешних шумов и соотношения мощностей синхронизирующего и синхронизированного сигналов.

Заключение

Разработана методика измерения влияния внешнего воздействия на автоколебания в клистронном автогенераторе в присутствии шума, состоящая в изучении эволюции спектров колебаний зашумленного клистрона в результате действия гармонического сигнала.

Показано, что эффект синхронизации приводит к заметному уменьшению уровня внесенных шумов и резкому увеличению синхронизирующего сигнала, при этом полоса синхронизации с ростом мощности шумов заметно сужается.

Предложено новое использование клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью как своеобразного усилителя при подаче на его вход аддитивной суммы гармонического и шумового сигналов. В результате такой синхронизации получен коэффициент усиления по мощности 17 дБ и увеличено отношение сигнал–шум на выходе этого усилителя в 2.5 раза.

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

Библиографический список

1. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука. 1979.
2. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука. 1980.
3. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клоков Д.В., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 7. С. 105.
4. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
5. Лоскутов А. Нелинейная динамика, теория динамического хаоса и синергетика (перспективы и приложения) // Компьютерра. 1998. № 4.
6. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию
После доработки

9.06.2011
12.10.2011

SYNCHRONIZATION OF KLYSTRON OSCILLATOR WITH DELAYED FEEDBACK IN THE PRESENCE OF NOISE

B.S. Dmitriev, Ju.D. Zharkov, S.A. Sadovnikov, V.N. Skorokhodov

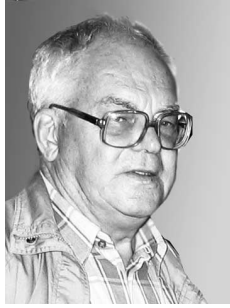
This work presents experimental results of synchronization of klystron oscillator with delayed feedback in the presence of noise. It was shown, that synchronization effect significantly decreases noise level, leads to amplifying of synchronizing signal and shortening of synchronization wideband. When additive sum of harmonic and noise signal are directed to klystron input, signal-to-noise ratio significantly increases due to synchronization.

Keywords: Klystron oscillator with delayed feedback, synchronization in the presence of noise, signal-to-noise ratio.



Дмитриев Борис Савельевич – родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского университета (1959). В настоящее время – профессор кафедры нелинейной физики СГУ, доктор физ.-мат. наук. Читает лекции по общему курсу физики, радиофизике и электронике, концепциям современного естествознания. Область научных интересов – микроволновая электроника и радиофизика, нелинейная динамика распределённых систем. Опубликовал более 150 научных работ и учебных пособий, монографию «Относительность – время, пространство, поля» (с грифом учебного пособия для вузов), автор 16 изобретений и патентов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: DmitrievBS@info.sgu.ru



Жарков Юрий Дмитриевич – родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время – профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями, исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал более 200 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского



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



Скороходов Валентин Николаевич – родился в 1959 году. Окончил физический факультет СГУ в 1982 году. В настоящее время является заведующим лабораторией кафедры электроники, колебаний и волн. Область научных интересов: нелинейная динамика в СВЧ-электронике. Автор более 15 статей в отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского