

УДК 621.373.43

Г.Ф. Коняхин¹, С.И. Клевец², В.Л. Верещагин³, С.Н. Лутай¹¹ Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков² Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков³ Херсонский государственный технический университет, Феодосийский УНКЦ, Феодосия

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАДИОДИАПАЗОНА

Рассмотрены основы генерации шумового сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в радиотехнических и электронных системах. Показано, что в электронных приборах в качестве механизмов появления неустойчивостей выступает черенковское взаимодействие, переходное и тормозное излучения. Проведен анализ лабораторных исследований генераторов шума со стохастической модуляцией в автономной волновой системе за счет шума с сосредоточенными параметрами. Даны рекомендации по выбору параметров автогенераторов хаотических колебаний с распределенным взаимодействием.

Ключевые слова: автогенератор, неустойчивость, хаотические колебания, генератор помех.

Введение

Постановка проблемы. Для подавления современных радиотехнических станций (РТС) с оптимальными методами обработки информации, сложными сигналами и различными методами защиты требуются сравнительно высокие энергетические потенциалы помеховых сигналов, высокие значения спектральной плотности мощности шума и его хорошего качества.

Анализ публикаций. Существующие и разрабатываемые генераторы помех с модуляцией СВЧ сигнала низкочастотным шумом (амплитудной, фазовой, частотной или модуляцией смешанного вида) не удовлетворяют, по крайней мере, одному из перечисленных требований: генерируемый шум отличается от "белого". Наличие внутриспектральных связей не позволяет произвести селекцию сигнала и помехи. Этим же недостатком обладают и генераторы помех на основе многокаскадного усиления флуктуационного шума. В связи с этим изучаются новые методы генерации стохастических излучений [1 – 3].

Целью данной работы является проведение анализа исследований генераторов помех со стохастической модуляцией в автономной волновой системе за счет развития в ней собственной неустойчивости автогенераторов шума с сосредоточенными параметрами.

1. Физические основы генерации шумового СВЧ излучения в радиотехнических и электронных системах

Специфической особенностью автогенераторов шума является возникновение в нем выходного хаотического сигнала без воздействия внешних флуктуаций. Установленный даже нелинейный колебательный контур с диссипацией энергии, находящийся

ся под действием периодической системы, может проявлять свойства автогенератора шума. В такой неавтономной системе хаотические колебания со сплошным спектром возникают за счет энергии нешумовых источников. Появление генераторов нового типа обязано успехам теории нелинейных колебаний, которая предсказывает существование хаотических колебаний в нелинейных системах (в том числе и в автогенераторах радиотехнического диапазона) с малым числом степеней свободы [4].

Случайность в детерминированных системах (автогенераторы периодических колебаний) возникает в результате неустойчивости индивидуальных движений, происходящих внутри ограниченного фазового объема. Сильная нелинейность обуславливает влияние бесконечно малых изменений начальных условий на траектории движения систем в фазовом пространстве, а ограниченность фазового объема приводит к вращаемости этих траекторий внутри объема. Впоследствии этого траектории становятся запутанными, что позволяет ввести понятие ансамбля состояний, энтропию [5]. Рассмотрим эти вопросы более конкретно применительно к нелинейным радиотехническим генераторам.

В электронных приборах в качестве элементарных механизмов, ответственных за неустойчивость (с последующим проявлением нелинейности), выступает черенковское взаимодействие (ЛБВ, ЛОВ, магнетрон), переходное излучение (клистрон, триод), тормозное (гиратрон). Для возбуждения автоколебательных режимов в этих автономных системах необходима организация обратной связи: внешней или внутренней. Внутренняя обратная связь возникает при использовании встречных электронных пучков (лампы с электронно-волновым взаимодействием и черенковским механизмом излучения) за счет отраженных от границы аппаратуры замедлен-

ных волн, если она связана с существованием в периодической замедляющей структуре обратных волн, взаимодействующих с пучком (карсинотроны).

Рассмотрим вначале автогенератор с внешней цепью для создания обратной связи (рис. 1).

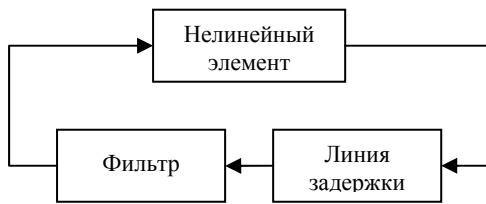


Рис. 1. Генератор с внешней цепью для создания обратной связи

В качестве нелинейного элемента в схеме используется усилительная лампа, выходной сигнал которой через линию задержки со временем τ и фильтр с полосой пропускания Δf , подается на вход этой же лампы. Нелинейность усилителя может быть обусловлена его амплитудной, фазовой или одновременно амплитудно-фазовой характеристики. Наиболее полные результаты получены для случая нелинейной амплитудной характеристики.

Число степеней свободы автогенератора, равное числу собственных частот колебаний, можно определить по формуле

$$N = \Delta f \cdot T.$$

Для аналитического описания перехода в режим генерации стохастических колебаний необходимо исследовать нелинейные процессы с учетом взаимодействия N частот, что практически не всегда возможно. Поэтому для электронных приборов с распределенным взаимодействием анализ проводят для небольшого числа N . Наиболее изученными являются модели автогенераторов, описываемые уравнением Ван-дер-Поля с запаздыванием. Укороченное уравнение этой модели имеет вид

$$\dot{x} + x = F[x'(t' - \Delta f \cdot T)].$$

Для неавтономной системы уравнение Ван-дер-Поля классического автогенератора, но с внешней гармонической силой имеет вид

$$\ddot{x} + \varepsilon \cdot (\dot{x} - \dot{F}) + \begin{cases} x \\ x^3 \\ x + \alpha \cdot x^3 \end{cases} = B \cdot \cos \omega t,$$

где x – переменная, характеризующая состояние генератора; $t' = \Delta f \cdot t$ – медленное время; $F(x)$ – амплитудная характеристика усилителя.

На рис. 2 приведены результаты расчета колебательного процесса автогенератора, описываемого укороченным уравнением Ван-дер-Поля.

Для изображенных кривых глубина обратной связи δ определяет изменение характера процесса колебаний в автогенераторе при переходе его к динамическому хаосу.

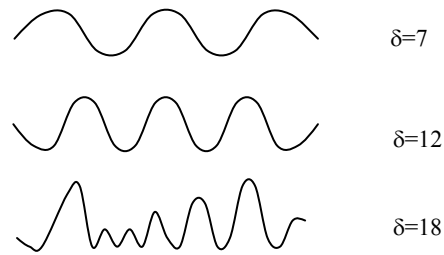


Рис. 2. Эволюция огибающей колебаний в автогенераторе с задержкой

Стационарное состояние автогенератора может быть определено и графически нахождением точки пересечения кривой обратной связи (кривая 1 на рис. 3) с амплитудной характеристикой усилителя (кривая 2).

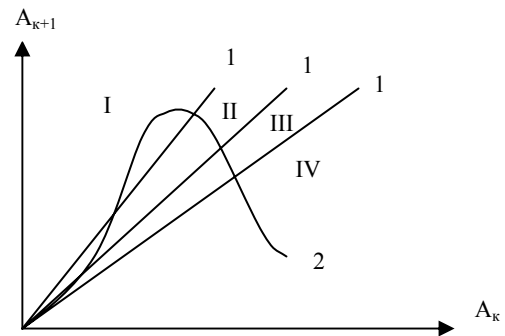


Рис. 3. Амплитудная характеристика нелинейного элемента $A_{k+1} = f(A_k)$

Соответствующие циклы движений для разных величин обратной связи изображены на рис. 3. исследование с помощью диаграммы Ламерея позволили в общем случае выделить следующие характерные режимы работы автогенератора: I – режим усиления сигналов; II – режим одночастотной генерации; III – генерация амплитудно-модулированных колебаний; IV – генерация сложных сигналов.

На фазовой плоскости области I соответствует простой предельный цикл с частотой ω , области II – сложные многопетлевые предельные циклы, переходящие в пределе к множеству, в котором нет устойчивых траекторий и циклов (странный аттрактор). Дробление масштаба прекратится, когда ширина спектра сигнала окажется соизмеримой с шириной полосы усилителя. Переход из одной области генерации в другую может быть осуществлен путем изменения глубины обратной связи.

Обобщение результатов исследований по изложенному методу позволяет сделать следующий вывод: возникновение стохастических режимов в автогенераторе определяется тремя факторами:

1. Формой нелинейной характеристики усилительной лампы. Хаотические колебания возникают только на падающем участке амплитудной характеристики.

2. Глубиной обратной связи δ . Стохастический

режим возможен при $\delta \cdot \left| \frac{\partial A_{\text{ВЫХ}}}{\partial A_{\text{ВХ}}} \right| \geq -3$.

3. Числом степеней свободы автогенератора $N = \Delta f \cdot T$. При $N = 1$ и учете переходных процессов в фильтре возникновение хаотических движений в фильтре затрудняется.

Расчеты показали, что при фазовой нелинейности усилителя стохастические колебания будут иметь более равномерную спектральную характеристику. В действительности фазовые и амплитудные процессы связаны между собой и существуют совместно. Поэтому стохастический режим может наступить и при $\delta \cdot \left| \frac{\partial A_{\text{ВЫХ}}}{\partial A_{\text{ВХ}}} \right| < 3$.

Более подробные теоретические исследования нелинейных диссипативных систем показали, что при дальнейшем увеличении управляющего параметра после стохастических режимов возможно появление сложных периодических движений. Установлено, что последовательность точек бифуркаций подчиняется закону Фейгенбаума

$$\lambda_m = \lambda_\phi - K \cdot \delta_\phi^{-m},$$

где $\delta_\phi = 4,6692$ – постоянная Фейгенбаума; λ_ϕ , K – постоянные, зависящие от типа системы.

Для большинства радиотехнических систем, нелинейные свойства которых описываются первыми членами ряда Тейлора: $\lambda_\phi = 2,3$; $K = 0,83$.

Поэтому при настройке автогенератора неизбежно будут встречаться области излучения, отличающиеся от генерации шума с нормальным распределением. Остается добавить, что наличие связи между нелинейными диссипативными системами (система Фейгенбаума), приводит к увеличению путей перехода к хаосу. Кроме удвоения периода, соответствующего изолированной системе, появляется переход через разрушение квазипериодических движений, а также через перемежаемость.

Дальнейшее продвижение в области теоретических исследований автогенераторов стало возможным благодаря конкретизации рассматриваемой схемы прибора, учитывающей внутренние процессы и явления. Для модели электронных генераторов с инерционным механизмом группировки частиц при использовании системы самосогласованных уравнений для поля и пучка получен параметр задачи

$$z = \beta \cdot l \cdot \left(\frac{I \cdot K}{4U} \right)^{\frac{1}{3}},$$

определяющий режим работы автогенератора. В соотношении для z использованы следующие соотношения: β – волновое число замедленной волны, синхронной с пучком; l – длина замедляющей структуры; I – ток пучка; U – ускоряющее напряжение; K – параметр системы с размерностью сопротивления.

При увеличении параметра z (например, за счет тока I) имеет место последовательность бифуркаций, в результате которых существовавшие ранее

режимы теряют устойчивость и переходят в новые. Стохастические колебания возникают и при критических $z_{\text{кр}}$. Величина параметра $z_{\text{кр}}$ зависит от типа лампы (величины K). Для карсинотронов автомодуляция (с периодом $2T$ прохождение сигнала ε обратной связи) возникает при $z = 2$. Режим автостохастической модуляции устанавливается при $z > 5,5$. Аналогичные исследования для релятивистских карсинотронов показали возможность генерации сложных сигналов. Однако для этого требуются большие длины структуры l и токи электронных пучков [6].

Явление стохастизации колебаний в электронном потоке, движущимся в поперечном магнитном поле, описано в работе [7]. Там показано, что физическим механизмом, приводящим к хаотизации движения изолированного электрона, является перекрытие резонансов, возникающих в нелинейных системах со многими степенями свободы

$$\frac{1}{C \cdot \beta} \cdot \omega_n \leq 4 \left[\rho_\perp \cdot I'_s(\mu_s) \cdot \varepsilon_0 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где ω_n – циклотронная частота вращения электрона в магнитном поле напряженности H ; ρ_\perp – составляющая импульса электрона, перпендикулярная H ;

$\mu_s \equiv \frac{\rho_\perp}{H} \cdot C \cdot K$; $I'_s(\mu)$ – функция Бесселя порядка “s”.

Таким образом, стохастические процессы возможны и в приборах с магнитотормозным излучением (например, в гиротронах).

Стохастический характер колебаний может быть создан в плазме при возбуждении ее электронным пучком. Плазму с возбужденными в ней волнами сравнительно большой амплитуды и произвольными фазами называют турбулентной. Возбужденные потенциальные колебания за счет различных механизмов трансформируются в поперечные электромагнитные волны. Для расчета спектра колебаний используют квазилинейное приближение, при котором возникшие колебания оказывают обратное воздействие на функцию распределения частиц пучка. Основной эффект обратного воздействия волны на частицы заключается в захвате резонансных частиц волной и их фазовых колебаний в потенциальной яме. Фазовое размешивание частиц происходит из-за зависимости периода колебаний от энергии частиц.

При наличии нескольких волн, что легко осуществимо в плазме, происходит своеобразная коллективизация резонансных частиц между волнами. При случайном значении фаз волн движение частиц пучка похоже на броуновское движение.

Из дисперсионного уравнения плазменного столба в продольном магнитном поле следует, что возбуждение колебаний в области собственных (ленгловских) частот плазмы ω_p обусловлено эффектом Вавилова-Черенкова и аномальным эффектом

Доплера (на прямой волне). Для монохроматического пучка линейная теория дает следующее значение инкремента нарастания колебаний для черенковского взаимодействия.

$$\gamma \sim \omega \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sim 2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$$

при $n_1 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $n_p = 10^{10} \text{ см}^{-3}$,

где n_1 , n_p – плотности электронов соответственно в пучке и плазме.

2. Основные результаты экспериментальных исследований генераторов шума и электронных генераторов со стохастической модуляцией

По-видимому, одним из первых экспериментальных исследований автогенераторов с сильно задержанной обратной связью была работа. Используемые ЛБВ и цепь обратной связи создавали большое число степеней свободы автогенератора, и при работе на падающем участке амплитудной характеристики была обнаружена шумовая компонента в выходном сигнале. Однако происхождение хаотического сигнала автор указанной работы связывал с усилением флуктуационных шумов. Должного внимания генерации шума уделено не было и в работе [8], где исследовались автогенераторы с обратной связью на основе отечественной ЛБВ. Полученные данные свидетельствовали о больших потенциальных возможностях этого направления.

В работе [6] изучались автоколебания и переходы (биолокация), в результате которых происходило последовательное усложнение колебаний вплоть до появления хаотических сигналов. Исследуемая система представляла из себя карсинотрон, собранный из согласованного на концах отрезка электродинамической замедляющей системы, пронизываемой электронным пучком. Взаимодействие электронов пучка осуществлялось с одной из обратных гармоник, фазовая скорость которой была равна скорости электронов, и подтвержден теоретический вывод о влиянии безразмерного параметра z на режим генерации колебаний. Установлено несколько бифуркационных изменений режимов, которые возникали только за счет изменения тока пучка I . Для указанной конструкции стохастические колебания возникали при $z \geq 2$. Исследования показали, что при импульсном включении карсинотрона режим стохастической модуляции возникает при токах, превышающих шумовой не менее чем в 3 раза.

Наиболее полно исследование автогенераторов с задержанной обратной связью на лампах бегущей волны проведено в работе [9]. Установлено, что спектр стохастических колебаний может занимать всю полосу усиления ЛБВ (для спиральных замедляющих структур полоса порядка октавы). Интегральная мощность стохастических колебаний на

выходе ЛБВ того же порядка, что и максимальная мощность, которую обеспечивает ЛБВ в режиме усиления гармонического сигнала. Сужение спектра излучения могло достигаться за счет уменьшения коэффициента обратной связи. При этом последовательно из режима генерации хаотических сигналов генератор переходит в режим создания сложного полигармонического сигнала, а затем и в режим генерации моночастоты в соответствии с данными рис. 2. Управление шириной спектра может проводиться и путем изменения полосы пропускания Δf фильтра цепи обратной связи.

В случае экспериментальных приборов с пучково-плазменным взаимодействием, когда имела место обратная связь, получены широкие спектры излучения (от 0,7 до 5,4 ГГц) при временной корреляции между колебаниями не более 5 нс (рис. 4).

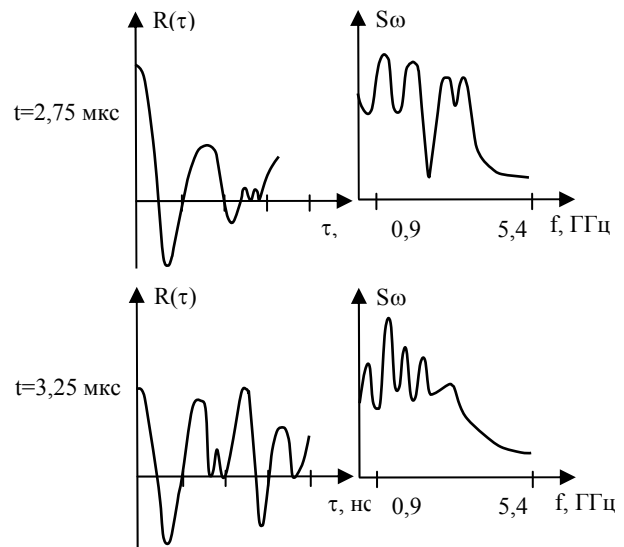


Рис. 4. Осциллограммы колебаний, их автокорреляционные функции $R(\tau)$ и сигнала $S\omega$ для немодулированного пучка с током $I = 25 \text{ А}$ и энергией $U = 25 \text{ кВ}$ (t – время измерения после начала инжекции)

Изменение спектра излучения достигалось путем изменения тока пучка или предварительной модуляцией электронного тока пучка. Для модуляции требовался внешний источник мощностью $1 \dots 10^3 \text{ Вт}$. Уровень максимальной мощности внешнего модулирующего воздействия был необходим, когда нужная частота генерации наибольшим образом отличалась от плазменной частоты ω_p . Внешней модуляцией удавалось получить излучение с полосой 30 МГц при сохранении интегральной мощности излучения. Эксперименты позволили определить инкременты развития неустойчивости $\gamma_3 \sim 8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$, который оказался ниже теоретического. В импульсных режимах в течение $10 \dots 100 \text{ мкс}$ удавалось получить мощность излучения $100 \dots 200 \text{ кВт}$.

В литературе рассматриваются различные методы стабилизации плазмы с целью увеличения мощности инжекции электронного пучка. По этой причине в экспериментах с открытой плазменной

структурой в режиме непрерывной инжекции электронного пучка были получены интегральные мощности излучения не более 10 Вт (при генерации широкополосного сигнала). В импульсном режиме инжекции релятивистского электронного пучка в плазму возможно получение широкополосного шумового излучения. Однако этот вопрос требует дальнейших глубоких исследований.

Отметим, что автостохастические режимы существуют в автогенераторах с сосредоточенными параметрами. Известно много схем таких генераторов, но мы остановимся на классическом генераторе Ван-дер-Поля, в котором в цепь обратной связи последовательно с индуктивностью введен нелинейный элемент (туннельный диод). Стохастические колебания в такой схеме возникали даже в случае, когда вакуумная лампа (триод) работала в линейном режиме. Спектральные характеристики колебаний в основном зависели от омического сопротивления в цепи обратной связи и вида нелинейной характеристики диода. При уменьшении сопротивления заметно возрастал инкремент неустойчивости и более равномерной становилась спектральная характеристика.

Выводы

1. Теоретически и экспериментально показана возможность получения стохастических колебаний в радиотехнических автогенераторах различных схем построения с различными электронными приборами.
2. Получение хаотического выходного сигнала не связано с использованием флуктуаций, а обусловлено внутренней динамикой системы.
3. Наиболее эффективным средством перевода автогенератора в автостохастический режим является увеличение коэффициента связи в нелинейной системе. При внешней цепи обратной связи энергия, передаваемая на вход лампы, должна быть одного порядка с энергией выходного сигнала.

4. Максимальная ширина спектра хаотического выходного сигнала определяется частотной полосой усилителя.

5. Изменение спектра выходного сигнала достигается изменением коэффициента обратной связи или внешней модуляцией электронного пучка.

Список литературы

1. Небабин В.Г. Средства постановки активных шумовых помех ВВС США / В.Г. Небабин // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1985. – № 4. – С. 71-75.
2. Lukin K.A. *The principles of Noise Radar Technology* / K.A. Lukin // *Proc of the First international Workshop on the Noise Radar Technology, Yalta, 18-20 Sept. 2002*. – P. 13-22.
3. Elmakil A.S. Inductorless hyper chaos generator / A.S. Elmakil, M.P. Kennedy // *Microelectronics Journal*. – 1999. – V. 30. – P. 739-743.
4. Кислов В.Я. Авто модуляционный механизм стохастических колебаний автогенераторов с запаздыванием / В.Я. Кислов, В.Б. Дихтяр // *Радиотехника и электроника*. – 1979. – № 8. – С. 1564-1572.
5. Странные аттракторы: пер. с англ. / Под ред. Я.Г. Синая, Л.П. Шильникова. – М.: Мир, 1981. – 254 с.
6. Безручко Б.П. Экспериментальное наблюдение стохастических колебаний в динамической системе электронный пучок-обратная электромагнитная волна / Б.П. Безручко // *Письма в ЖЭТФ*. – 1979. – Т. 29. – P. 180-184.
7. Земляной О.В. Корреляционные свойства хаоса в нелинейной динамической системе с запаздыванием / О.В. Земляной, К.А. Лукин // *Радиофизика и Электроника*. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 406-414.
8. Котырев Е.А. Исследование автогенератора с обратной связью на основе ЛБВ / Е.А. Котырев, Л.Е. Плисс // *Радиотехника и электроника*. – 1965. – Т. 10, № 9. – С. 1628.
9. Кислов В.Я. О нелинейной стохастизации автоколебаний / В.Я. Кислов, Е.А. Мясин, Н.Н. Залогин // *Радиотехника и электроника*. – 1980. – Т. 10, № 9. – С. 2160-2168.

Поступила в редколлегию 9.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДЕЯКІ ПИТАННЯ РОЗРОБКИ АВТОГЕНЕРАТОРІВ ХАОТИЧНИХ КОЛИВАНЬ РАДІОДІАПАЗОНУ

Г.Ф. Коняхін, С.І. Клівець, В.Л. Верещагін, С.М. Лутай

Розглянуто основи генерації шумового надвисоко частотного (НВЧ) випромінювання в радіотехнічних і електронних системах. Показано, що в електронних приладах в якості механізмів появи нестійкостей виступають черенковська взаємодія, перехідне й гальмове випромінювання. Проведено аналіз лабораторних досліджень генераторів шуму зі стохастичною модуляцією в автономній хвильовій системі за рахунок шуму із зосередженими параметрами. Дано рекомендації з вибору параметрів автогенераторів хаотичних коливань із розподіленою взаємодією.

Ключові слова: автогенератор, нестійкість, хаотичні коливання, генератор завад.

SOME QUESTIONS OF DEVELOPMENT OF OSCILLATORS OF CHAOTIC VIBRATIONS OF RADIORANGE

G.F. Konyahin, S.I. Klivets, V.L. Vereshchagin, S.N. Lutay

The principles of generation of noise microwave radiation in radiotechnical and electronic systems are considered. It is shown that in electronic devices the shanking interaction, the transition and braking radiation act as the mechanisms of instabilities appearance. The analysis of laboratory investigations of noise oscillators with stochastic modulation in autonomous wave system at the expense of growth of own instability of noise self-excited oscillators in it with lumped parameters is conducted. The recommendations as to the choice of self-excited oscillators parameters of random oscillations with distributed interaction are given.

Keywords: self-excited oscillator, instability, random oscillations, noise oscillator.