

УДК 621.385.632

Настоящий обзор является третьей частью аналитического обзора, посвященного исследованиям широкополосных сигналов в СВЧ системах. Обзор составлен по материалам отечественной и зарубежной печати за 1949-1984 гг. Рассмотрены вопросы генерирования непрерывных (детерминированных и случайных) и импульсных колебаний в ЛБВ О-типа. Представленный материал предназначен для исследователей и разработчиков в области СВЧ электроники и радиотехники, а также для студентов старших курсов и аспирантов радиотехнических специальностей.

Ключевые слова: ЛБВ-генератор, автоколебания, стохастические колебания, внешняя обратная связь, непрерывный сигнал, импульсный сигнал, нестационарная теория.

Научный редактор к.ф.-м.н. А. Г. ЛАЗЕРСОН

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 1. Электроника СВЧ

ВЫПУСК 6 (1083)

И. А. Манькин, В. Г. Школьников

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ
В СВЧ СИСТЕМАХ

Часть III

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.
ГЕНЕРИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В ЛБВ

(по данным отечественной и зарубежной печати
за 1949—1984 гг.)

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛБВ-ГЕНЕРАТОРА	4
1.1. Генерирование непрерывных сигналов в ЛБВ с внешней обратной связью в автономном режиме работы	4
1.2. Генерирование непрерывных сигналов в неавтономном режиме работы	6
1.3. Генерирование широкополосных импульсов	10
1.4. Формирование сложных сигналов в ЛБВ без внешней обратной связи	11
II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛБВ-ГЕНЕРАТОРЕ	12
11.1. Радиофизическая модель ЛБВ-генератора с внешней обратной связью	13
11.1.1. Анализ системы, состоящей из одного автогенератора	13
11.1.2. Система нескольких автогенераторов и неавтономный режим работы	17

П.2. Электронная модель ЛБВ-генератора с внешней обратной связью	
П.2.1. Приближенные модели	
П.2.2. Численное моделирование на основе нестационарной нелинейной теории	
П.2.2.1. Анализ непрерывных автоколебаний	
П.2.2.2. Анализ импульсных автоколебаний	
П.3. Генерирование сложных сигналов в ЛБВ без внешней обратной связи.	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ЛИТЕРАТУРА	

В современных радиотехнических системах СВЧ широко используются сложные детерминированные и случайные сигналы [1], поэтому значительный интерес представляют способы эффективного генерирования таких колебаний. Эти вопросы помимо чисто прикладного значения представляют также большой методологический и научный интерес в связи с изучением закономерностей возникновения стохастического поведения динамических систем [2,3].

В настоящее время широко используются генераторы, состоящие из усилителей с запаздывающей обратной связью, теория которых базируется в основном на моделях различной степени сложности [4]. В частности, простой и достаточно полно разработанной является модель генератора в виде замкнутой в кольцо цепочки из безынерционного нелинейного усилителя и линии задержки. Несмотря на то, что эти генераторы исследуются уже давно, начиная с 30-х гг., только в 60-е годы начало формироваться современное представление о сложных процессах в простых динамических системах, в частности, стохастическом поведении таких систем. Оказалось, что динамика даже простейших моделей может носить очень сложный характер, правда подчиняющийся зачастую некоторым общим закономерностям, таким как существование стационарных и многотактных режимов, сменяющихся в соответствии с бесконечной последовательностью бифуркаций удвоения периода [4].

Для целей генерирования широкополосных СВЧ колебаний наиболее перспективными в качестве усилителя являются ЛБВО. Генераторы на основе ЛБВО и рассматриваются в настоящем обзоре. Отметим, что теория таких генераторов в ряде работ построена на основе элементарной радиобфизической модели без учета специфики взаимодействия электронов с бегущей волной. Однако наиболее полно процессы развития и установления колебаний, перехода из одного режима в другой могут быть изучены на основе численного моделирования на ЭВМ с использованием нестационарной нелинейной теории ЛБВ [5].

В обзоре помимо упомянутых наиболее распространенных генераторов рассмотрено также формирование СВЧ колебаний на основе ударного возбуждения их фронтом импульса тока электронов.

Наряду с обзором устоявшихся представлений приводится и ряд оригинальных результатов, полученных авторами на основе численного моделирования на ЭВМ по разработанной ими нестационарной нелинейной теории ЛБВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛБВ-ГЕНЕРАТОРА

1.1. Генерирование непрерывных сигналов в ЛБВ с внешней обратной связью в автономном режиме работы

В главе рассмотрены различные способы генерирования сложных СВЧ сигналов. Проанализированы экспериментальные данные по построению различных принципиальных схем генераторов, а также специфика колебаний в них. Приводятся экспериментальные данные по характеристикам спектра и формы колебаний в зависимости от конструкции и режима работы генераторов. Большое внимание уделяется вопросам перехода регулярных колебаний в стохастические.

В одной из первых экспериментальных работ, продемонстрировавшей автогенерационные явления в ЛБВ с внешней обратной связью [6], была получена генерация широкополосных колебаний, спектр которых состоял из большого числа компонент на собственных частотах $f_k = k/T$, $k = 1, 2, \dots$, где T - время распространения сигнала по системе. Там же впервые наблюдались стохастические режимы. Несколько ранее в США был запатентован генератор шума на ЛБВ с внешней обратной связью с выходной мощностью 200 Вт в полосе частот выше 2 ГГц [7].

Впервые детальное обследование ЛБВ-генератора в шумовом режиме было проведено группой сотрудников под руководством В.Я. Кислова. Ими, в частности, было показано в [8,9] существование чередующихся регулярных и стохастических областей при изменении глубины обратной связи, определяемой параметром $\chi = 10 \lg (P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}})$, где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ - мощность сигнала на входе и выходе ЛБВ. Было выявлено, что стохастическое поведение возможно только когда ЛБВ работает в сильно нелинейном режиме на падающем участке амплитудной характеристики (имеется в виду убывающая зависимость $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$). Полоса частот системы в [8] ограничивалась узкополосным фильтром до величины Δf так, что возбуждалась одна собственная частота, то есть $\Delta f \cdot T = 1$.

В [9] эксперимент проводился в отсутствие фильтра. В последнем случае спектр стохастического сигнала занимает всю полосу усиления ЛБВ, а интегральная мощность стохастических колебаний на ее выходе того же порядка, что и максимальная мощность в режиме усиления гармонического сигнала.

Влияние ускоряющего напряжения, прикладываемого к спираль-

ной ЗС, на характер спектра генерируемых колебаний изучалось в [10]. Было обнаружено чередование зон генерации шумовых и многочастотных сигналов при монотонном изменении потенциала спирали. Данный факт объясняется влиянием ускоряющего напряжения на нелинейность амплитудной характеристики ЛБВ.

Следует отметить, что статистика сигнала в режимах с достаточно равномерным сплошным спектром близка к гауссовской [11].

Ряд вопросов экспериментальной проверки теории стохастических процессов рассматривался в [11-13]. Переход из одного режима колебаний в другой осуществлялся изменением глубины обратной связи, причем продемонстрировано большое разнообразие типов перехода к стохастическим колебаниям [12].

На рис. 1 показана характерная эволюция спектра сигнала с ростом глубины обратной связи [11]. Генерация возникла при

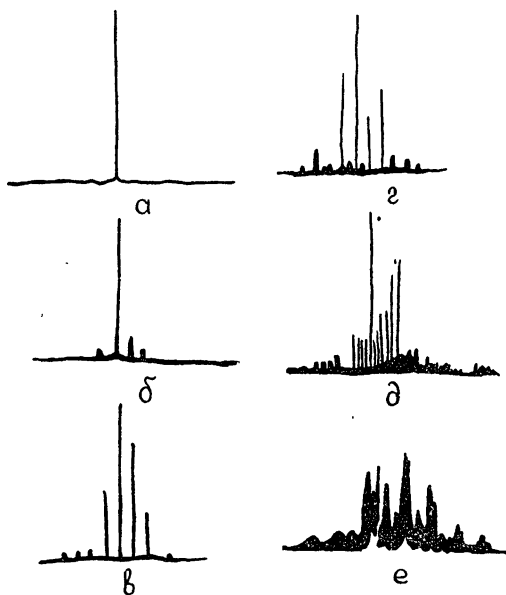


Рис. 1. Эволюция спектра сигнала в ЛБВ-генераторе при увеличении глубины обратной связи

$\gamma \approx -32$ дБ на одной из частот, несмотря на то, что условие баланса фаз $\varphi = 2\pi n$, где φ - суммарный фазовый сдвиг в системе; n - целое число, выполнялось для всех частот, попавших в полосу прозрачности. Режим генерации монохроматического колебания существ-

вовал при увеличении γ вплоть до $-17,1$ дБ. Начиная с этого значения, возбуждались другие моды и в спектре появлялись составляющие, характерное расстояние между которыми $\Delta f \sim 1/T$ (рис. 1б, в). Характер спектра не меняется до $\gamma = -13,1$ дБ, после чего период огибающей процесса удваивается, а в спектре появляются компоненты с частотами $f_i \pm \Omega/2$ (рис. 1г), где f_i - частоты собственных мод. Далее, при $\gamma = -12,2$ дБ происходит новое удвоение периода огибающей, и в спектре появляются составляющие с частотами $f_i \pm \Omega/4$. Этот этап развития спектра состоит из двух бифуркаций удвоения периода огибающей процесса и сходен с началом последовательности бифуркаций удвоения Фейгенбаума. Генерация сигнала со сплошным спектром возникает в системе при $\gamma = -11,2$ дБ.

Переход к сплошному спектру начинался с зашумления составляющих $f_i \pm \Omega/2$ и $f_i \pm \Omega/4$, затем собственных колебаний, после чего шумовой фон размывался по всему спектру. При дальнейшем увеличении γ изрезанность спектра несколько уменьшалась, причем его максимумы оставались расположенными в области собственных частот (рис. 1е).

1.2. Генерирование непрерывных сигналов в неавтономном режиме работы

Неавтономные режимы ЛБВ-генератора с внешней обратной связью исследовались в [10, 13-16]. В [14] анализировалась неавтономная работа ЛБВ-генератора при одночастотном и двухчастотном внешнем воздействии, а также работа с двумя петлями запаздывающей обратной связи (ЗОО) без ввода внешнего сигнала. На рис. 2 приведены амплитудные характеристики ЛБВ-генератора при различных коэффициентах обратной связи $\rho = P_{вх} / P_{вых}$ в режиме синхронизации внешним сигналом с частотой f_1 , равной частоте автоколебаний f_0 [14]. Для сравнения штриховой линией показана амплитудная характеристика обычного усиления в ЛБВ без обратной связи ($\rho = 0$). Видно, что приращение мощности автоколебаний при внешнем воздействии имеет место лишь при слабой обратной связи ($\rho = 2 \cdot 10^{-3}$), когда электронный поток недогруппирован при автономных колебаниях. В этом случае внешний сигнал улучшает формирование электронных сгустков, и уровень выходной мощности возрастает, достигая максимума при мощности внешнего сигнала $P_1 = -7$ дБ от 1 мВт ($P_1 = -7$ дБм). При дальнейшем увеличении P_1 возникает перегруппировка электронов и интенсивность колебаний

на выходе падает.

При подаче на вход ЛЕВ-генератора сигнала частоты ($f_1 \neq f_0$) [I4] мощность колебаний на частоте f_0 постепенно уменьшается, а на частоте f_1 растет (см. рис. 3). На уровне мощности входного сигнала $P_1 \approx -4,5$ дБм происходит срыв автоколебаний (гашение). При этом мощность на частоте внешнего сигнала скачком достигает величины, имеющей место при обычном усилении на этой частоте.

Срыв колебаний внешним сигналом автор объясняет изменением амплитудных характеристик на частоте f_0 при воздействии на частоте f_1 , аналогично случаю усиления двух сигналов в ЛЕВ [I7, I8].

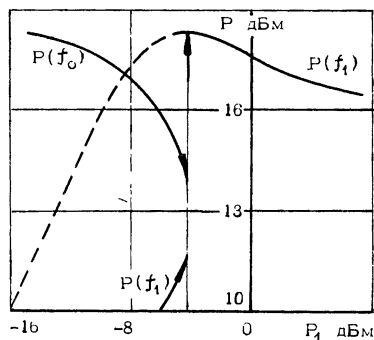
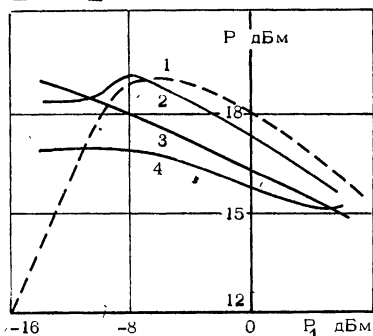


Рис. 2. Амплитудные характеристики ЛЕВ-генератора в синхронном режиме (частота внешнего сигнала равна частоте автоколебаний) для различных коэффициентов обратной связи φ : 1 - $\varphi = 0$; 2 - $\varphi = 2 \cdot 10^{-3}$; 3 - $\varphi = 4 \cdot 10^{-3}$; 4 - $\varphi = 5 \cdot 10^{-2}$

Рис. 3. Амплитудные характеристики ЛЕВ-генератора в несинхронном режиме работы

По мере увеличения мощности воздействия на частоте f_1 амплитудные характеристики на частоте f_0 как бы смещаются вниз. При этом коэффициент усиления на частоте f_0 уменьшается за счет переформирования сгустков электронного потока внешним сигналом и при определенных P_1 нарушаются амплитудные условия возбуждения - стартовый ток превышает величину тока луча, что приводит к срыву автоколебаний.

Исследования [I4] также показали, что срыв автоколебаний происходит при тем большем уровне входного сигнала, чем больше глубина обратной связи.

В [I5] приведены результаты экспериментальных исследований

неавтономной работы ЛБВ-генератора с широкополосной ЗОС при стимулировании стохастических колебаний внешним сигналом, когда автономно генерация осуществляется на одной частоте, и, наоборот, стимулировании дестохастизации, когда автономно генерируется шум.

Изучение роли внешнего сигнала в стимулировании шумовых колебаний проводилось в одночастотном режиме работы ЛБВ-генератора с широкополосной петлей ЗОС (без фильтра) при относительно слабой обратной связи, когда автономно выполняются условия возбуждения на какой-либо одной f_k из многих собственных частот. Процесс стохастизации при воздействии внешнего гармонического сигнала иллюстрируется рис. 4 [15], откуда видно, что стохастизация колебаний наблюдается при определенном значении мощности ($P_{вн} \approx 9$ дБм) внешнего сигнала. При этом максимумы спектральной плотности шума находятся вблизи собственных частот (рис. 4в). Уровень суммарной выходной мощности при стохастизации падает.

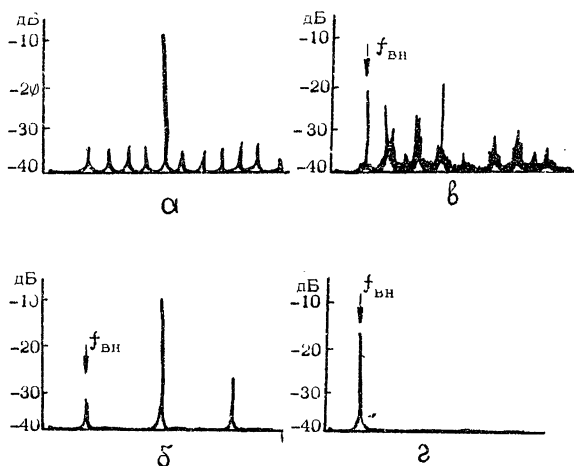


Рис. 4. Спектрограммы выходных колебаний в ЛБВ-генераторе при стимулировании стохастизации внешним гармоническим сигналом: а - мощность внешнего сигнала $P_{вн} = 0$; б - $P_{вн} = -5$ дБм; в - $P_{вн} = 9$ дБм; г - $P_{вн} = 12$ дБм

Как отмечается в [15], наряду со стохастизацией при внешнем воздействии возможно возбуждение многочастотных колебаний с различными интервалами эквидистантно расположенных составля-

ющих, аналогично наблюдавшимся в [6] при изменении степени обратной связи автономного ЛВВ-генератора. Каждая форма спектра при изменении частоты или мощности внешнего сигнала устанавливается "жестко", скачком и сохраняется в некоторой области расстройек внешнего сигнала, зависящей от уровня мощности последнего.

Роль внешнего сигнала, стимулирующего возбуждение сложных колебаний в ЛВВ-генераторе с широкополосной ЗОС при малых ρ , могут выполнять автоколебания того же генератора, формируемые с помощью дополнительной (второй) петли, содержащей высокочастотный фильтр, обеспечивающий большое ослабление на соседних с выделяемой собственными частотами [15]. Из экспериментов следует, что стимулирование стохастических колебаний облегчается с увеличением обратной связи или коэффициента усиления, а также с ростом времени задержки, когда уже при автономной работе ЛВВ-генератора с одной петлей генерируются сложные колебания.

Наряду с усложнением спектра выходных колебаний ЛВВ-генератора при его неавтономной работе возможно, наоборот, получение и более простых форм спектров, чем при автономной работе [15]. Последнее особенно наглядно проявляется при стохастических автономных автоколебаниях. Повышение уровня мощности сигнала, воздействующего на шумовые автономные автоколебания вначале приводит к некоторому ослаблению интенсивности шума, а затем происходит резкий переход в режим многочастотных колебаний. С увеличением мощности воздействия спектр "обедняется" и возникает одночастотный режим - вся мощность сосредоточивается на частоте внешнего сигнала (см. рис. 5).

Экспериментально обнаружено [15], что процесс дестохастизации облегчается при воздействии внешнего сигнала с частотой, равной одной из собственных частот. Уровень мощности внешнего

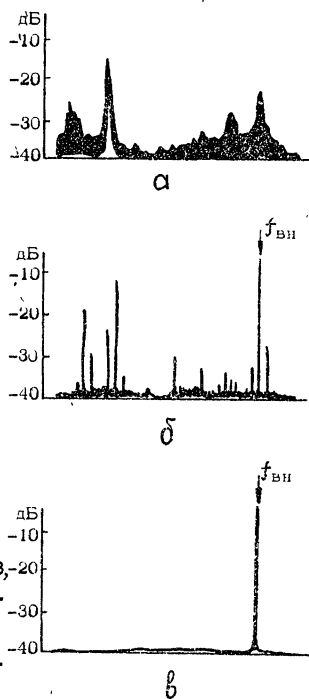


Рис. 5. Спектрограммы выходных колебаний в ЛВВ-генераторе при дестохастизации: а - мощность внешнего сигнала $P_{вн} = 0$ дБм; б - $P_{вн} = 13$ дБм; в - $P_{вн} = 24$ дБм

сигнала, необходимый для срыва стохастического режима, тем ниже, чем слабее обратная связь и меньше коэффициент усиления. С уменьшением полосы пропускания в цепи ЗОС, когда полоса шума ограничивается фильтром, требуется меньший уровень внешнего сигнала для дестохастизации. Дестохастизация автоколебаний возможна и при автономной работе ЛБВ-генератора с двумя петлями ЗОС [15]. Однако из-за взаимного влияния автоколебаний, формируемых обеими цепями, осуществление режима дестохастизации сложнее, чем при неавтономной работе.

Неавтономные режимы работы ЛБВ-генератора с широкополосной ЗОС исследовались также в [16], где наблюдался целый ряд сверхрегенеративных явлений. Так, ввод внешнего шумового сигнала в систему, первоначально генерировавшую монохроматическое колебание, приводил к срыву последнего. При этом на анализаторе спектра наблюдался регенеративно усиливаемый шумовой сигнал с максимумами на собственных частотах системы. Возврат к режиму моногенерации осуществлялся путем уменьшения ослабления цепи обратной связи. Увеличение спектральной плотности мощности внешнего шумового воздействия на генератор, работающий в режиме генерации стохастических колебаний, приводило к выравниванию спектра выходного сигнала генератора. Гармонический же сигнал при прохождении через ЛБВ-генератор шума испытывал ослабление. Усиление малого гармонического сигнала в среднем меньше, чем усиление стохастического большого сигнала, действующего на входе ЛБВ с широкополосной ЗОС.

1.3. Генерирование широкополосных импульсов

В большинстве работ, посвященных исследованию автоколебательных процессов в ЛБВ с внешней обратной связью, рассматриваются вопросы генерации непрерывных сигналов. Между тем известно (см., например, [19-27]), что автогенератор с внешней запаздывающей обратной связью позволяет генерировать и импульсные сигналы. Такие генераторы характеризуются высокой стабильностью параметров формируемых сигналов и позволяют получать импульсы наносекундной длительности с частотой повторения до сотен мегагерц [23].

Первое сообщение о ЛБВ с внешней обратной связью, генерирующей СВЧ импульсы, появилось более тридцати лет назад, в 1954 г. [19]. Цель обратной связи экспериментальной установки содержала волноводную линию задержки, аттенкатор и твердотельный экс-

пандер. Роль этих элементов в работе схемы достаточно подробно обсуждается в [20,21]. Подчеркнем здесь лишь принципиальное значение экспандера — нелинейного элемента, проходя через который сигнал затухает тем сильнее (усиливается тем слабее), чем меньше его амплитуда. Именно благодаря действию экспандера в системе вместо непрерывных колебаний формируются импульсы. Экспандер подчеркивает максимум импульса и тем самым укорачивает импульс всякий раз, как только он будет расширен фильтром. Введение экспандера как бы расширяет полосу пропускания устройства [21].

Главное преимущество данного метода генерирования импульсов заключается в том, что он, в отличие от общеизвестных, не требует модулятора или дополнительного источника сверхкоротких импульсов.

Выходной сигнал генератора, описанного в [19], представлял собой периодическую последовательность 6-нс радиоимпульсов с частотой внутреннего заполнения 9 ГГц. Частоту следования импульсов, равную 12,8 МГц, после небольшого усложнения схемы можно было уменьшить до 100 кГц. Данные об этой аппаратуре приведены также в [28]. Более короткие импульсы длительностью 2 нс в диапазоне 4 ГГц получены автором [20].

1.4. Формирование сложных сигналов в ЛБВ без внешней обратной связи

К числу наиболее ранних исследований генерации в ЛБВ без внешней обратной связи следует отнести [29-31]. В экспериментах генерация непрерывного сигнала достигалась за счет внутренней обратной связи, обусловленной отражениями волны от входного и выходного концов замедляющей системы. Частота могла варьироваться путем перестройки ускоряющего напряжения. Учитывая результаты этих работ, в [32] был предложен способ генерации наносекундных импульсов путем импульсной модуляции ускоряющего напряжения в ЛБВ с внутренней обратной связью.

В [33,34] описаны эксперименты по формированию в ЛБВ периодической последовательности коротких радиоимпульсов при модуляции ускоряющего напряжения по синусоидальному закону. На вход лампы при этом поступает непрерывный ВЧ сигнал от внешнего источника. Радиоимпульсы на выходе ЛБВ имели следующие параметры: в [34] длительность импульса 5 нс на частоте 4 ГГц (ускоряющее напряжение модулировалось с частотой 18,4 МГц,

в пределах 1500 ± 400 В), в [33] — длительность импульса $I-2$ нс на частоте 24 ГГц. Заметим, что данный метод не получил широкого распространения из-за внутримпульсной частотной модуляции [33, 34].

Простой метод генерирования наносекундных импульсов в ЛБВ, не требующий внешнего источника ВЧ колебаний и основанный на взаимодействии фронтов импульса тока с наводимыми им полями, предложен в [35]. Импульс тока длительностью I нс поступал на вход ЛБВ, возбуждая в ней импульс ВЧ поля, направляемый далее во вторую ЛБВ. На выходе последней формировался радиоимпульс мощностью 0,5 Вт, длительностью около 2 нс в диапазоне 10 ГГц.

Укажем на одну из важных задач в этой области, решаемую методом, аналогичным выше рассмотренному. Речь идет об увеличении запасаемой энергии в одиночном импульсе электромагнитного излучения [36]. Решение этой задачи в настоящее время связывается с применением мощных релятивистских электронных пучков в СВЧ-генераторах на основе сверхразмерных многомодовых периодических волноводов с диаметром, $D \gg \lambda$ (λ — длина волны генерации) в многоволновых (многомодовых и одночастотных) режимах генерации [36, 37]. Взаимодействие электронного пучка с пространственными гармониками поля замедляющей структуры (диафрагмированный волновод) осуществляется вблизи π -вида границы основных полос прозрачности нескольких мод сверхразмерного волновода. В этом режиме получена мощность излучения 5 ГВт при длительности импульса по основанию 30–50 нс (ток пучка 20 кА, ускоряющее напряжение 2,5 МВ). КПД процесса достигал 10% [36, 37]. Описание схем экспериментальных установок и анализ результатов измерений можно найти, например, в [36–40].

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛБВ-ГЕНЕРАТОРЕ

Рассмотрены различные теоретические методы анализа ЛБВ-генераторов. Приведены используемые физические и математические модели. Даны результаты расчетов как по простым аналитическим моделям, так и с использованием нестационарной нелинейной теории ЛБВ.

П.І. Радиофизическая модель ЛБВ-генератора с внешней обратной связью

П.І.І. Анализ системы, состоящей из одного автогенератора

Большинство теоретических исследований автоколебаний в ЛБВ-генераторе проведено на основе радиофизической модели [8, 41-43], которая рассматривает ЛБВ как автогенератор, описываемый нелинейным дифференциальным уравнением в обыкновенных производных. Поскольку при таком подходе учитываются основные нелинейные характеристики системы, то модель обладает большой обобщающей и эвристической силой. Кроме того, ее можно рассматривать как тестовую и эталонную для более сложных задач. Однако простота модели и анализа достигается здесь за счет целого ряда ограничений, основным из которых является возможность анализа лишь узкополосных колебаний. В связи с этим используются при анализе такие понятия, как огибающая, амплитудная характеристика усилителя (не зависящая от частоты) и другие.

Принципиальная схема этой модели совпадает со схемой классического автогенератора с запаздыванием и содержит безынерционный нелинейный усилитель с функцией преобразования F сигнала U или его амплитуды X , фильтр с линейным оператором Φ и постоянную задержку T . В частности, к такой же схеме сводится генератор Ван-дер-Поля [44], в анодную или сеточную цепь которого введена линия задержки. Нелинейное преобразование сигнала U имеет вид $F = 2\epsilon \gamma_0 (1 - U^2)(dU/dt)$, где ϵ - малый параметр, обратно пропорциональный добротности фильтра; γ_0 - коэффициент усиления в линейном режиме, а преобразование огибающей X $F = \gamma_0 X(1 - X^2)$. Если $F(X)$ произвольного вида, то последовательные преобразования в трех элементах схемы приводят к интегральному уравнению генератора, которое имеет вид [41]

$$X(t) = \int_{-\infty}^t F[X(\tau - T)] q(t - \tau) d\tau, \quad (I)$$

где $q(t)$ - импульсная переходная функция фильтра.

Для узкополосного фильтра $\epsilon \ll 1$ и при $T = 0$ (I) соответствует укороченному дифференциальному уравнению

$$\frac{dX}{dt} + \epsilon X = \epsilon F(X). \quad (2)$$

При наличии запаздывания это уравнение приобретает вид

$$\frac{dX}{dt} + \epsilon X = \epsilon F[X(t - T)]. \quad (3)$$

Число степеней свободы рассматриваемой автоколебательной системы определяется тем, сколько собственных частот, разделенных интервалом $1/T$, попадает в полосу Δf пропускания фильтра Φ , то есть величиной $\Delta f \cdot T$.

В уравнении Ван-дер-Поля $F(X)$ задается в простом, явном виде (кубичная нелинейность преобразования амплитуды). В электронно-волновой системе $F(X)$ задается неявным образом сложной системой уравнений движения электронов и электромагнитного поля [45], которая в явном виде не решается и к кубичной нелинейности не сводится. Тем не менее, как подчеркивается в [41], рассмотрение уравнения Ван-дер-Поля с учетом запаздывания представляет значительный интерес, так как позволяет установить связь с классической теорией колебаний.

Аналитическое решение уравнения Ван-дер-Поля известно. Оно описывает, в случае отсутствия задержки, процесс установления регулярных колебаний в автогенераторе. Уравнения классического автогенератора с запаздыванием рассматривались в различных приближениях в ряде работ. В частности, для системы с быстро устанавливающимися колебаниями задача была сведена к поискам решений функционального уравнения вида [41]

$$X(t) = F[X(t - T)]. \quad (4)$$

Решение для (4) можно записать в виде стационарных периодических последовательностей с периодом nT , удовлетворяющих преобразованию

$$\overbrace{F(F(F \dots (X) \dots))}^{n \text{ раз}} = X.$$

При $n = 1$ — это устойчивое состояние моногенерации, а при $n > 1$ решения соответствуют периодической амплитудной модуляции. Для конкретного вида нелинейной характеристики $F(X) = \gamma_0 X e^{-X^2}$,

близкой к амплитудной характеристике ЛБВ, оказалось возможным найти все основные зоны периодических автоколебаний и исследовать их на устойчивость [8]. При этом выяснилось, что данные зоны по параметру γ_0 не перекрываются. В промежутках между ними система генерирует непериодический шумоподобный сигнал. Аналогичная картина поведения описываемой системы была получена при исследовании других характеристик. В частности, как отмечается в [41], чередование зон периодических и стохастических колебаний было получено и при теоретическом расчете по экспериментально снятым характеристикам ЛБВ. Указанная картина была подтверждена экспериментальными исследованиями [8].

Итак, даже при таком упрощенном анализе, когда усилитель и фильтр считаются безынерционными, можно получить основной принципиальный вывод о возможности существования в автоколебательных системах с сильной нелинейностью и запаздыванием различных режимов генерации, включая стохастический, и при $\Delta f \cdot T \approx 1$ получить достаточно хорошее согласие с экспериментом.

Для более строгого рассмотрения такой системы обратимся согласно [41] к (I). Это уравнение решалось и раньше [46], но для слабой нелинейности, что и обуславливало получение лишь периодических решений.

Можно показать [41], что, если сигнал и импульсную переходную функцию узкополосного фильтра $q(t)$ записать в дискретном виде на основе теоремы Котельникова, то (I) сводится к следующему дискретному уравнению, дающему непосредственный алгоритм расчета процессов,

$$\chi_k = (1 - e^{-\pi \Delta f \tau}) F_{k-N} + e^{-\pi \Delta f \tau} \chi_{k-1}, \quad (5)$$

где N - число отсчетов на период T , $\tau = T/N$ - интервал между отсчетами. При $N \gg 1$, $\tau = T/N \ll T$, $\pi \Delta f \tau \ll 1$ переходим опять к дифференциальному (3). Действительно, если разложить в ряд экспоненту и ограничиться линейными членами, алгоритм (5) можно записать в виде

$$\chi_k = (\pi \Delta f \tau) F_{k-N} + (1 - \pi \Delta f \tau) \chi_{k-1}$$

или при $\tau \rightarrow 0$

$$\dot{\chi} + \chi = F(t' - \pi \Delta f T), \quad (6)$$

где $\dot{\chi}$ означает дифференцирование по медленному времени $t' =$

$= \pi \Delta f t$. Это уравнение при подстановке в него $T=0$ и $F = \gamma_0 X(1-X^2)$ сводится опять к уравнению Ван-дер-Поля.

Алгоритм (5) позволяет точно описать поведение системы с контурным фильтром, полоса пропускания которого обрезается при дискретизации выбранным числом отсчетов. Ширина спектра на выходе нелинейного элемента в $\lambda = N/\Delta f \cdot T$ раз шире полосы Δf фильтра по уровню половинной мощности. Поэтому можно утверждать, что (5) точно описывает систему с фильтром, полоса которого обрезается по уровню $\lambda \Delta f$. При $\lambda \gg 1$ переходим к дифференциальному уравнению (6), описывающему систему с контурным фильтром, полоса которого по бесконечно малому уровню пропускания не ограничена.

Таким образом, в [41] сформулированы три подхода, позволяющих рассматривать задачу о сложных, в том числе стохастических, колебаниях в автогенераторе с задержкой. Первые два из них [(4) и (5)] сводят задачу к решению дискретно-разностных уравнений, непосредственно дающих алгоритм расчета. Третий подход - решение дифференциального уравнения (6) - также сводится к численным методам, поскольку решение этого уравнения для случая шумоподобных процессов не существует в регулярном виде.

Данные подходы описывают радиофизическую модель генератора с запаздыванием и позволяют анализировать стохастические процессы. Класс функций преобразования, обеспечивающих стохастичность, достаточно широк. В частности, можно показать, что уравнение Ван-дер-Поля при введении задержки в его правую часть также имеет стохастические решения. В [41] на основе простейшего алгоритма $X_{k+1} = \gamma_0 X_k(1 - X_k^2)$ получены режимы монохроматических ($1 < \gamma_0 < 2$), полигармонических ($2 < \gamma_0 \leq 2,5$) и стохастических ($\gamma_0 > 2,5$) колебаний. Сравнение результатов расчетов, проведенных по (5) и (6), показало их хорошее соответствие. Анализ влияния глубины обратной связи позволил сделать вывод, что при ее увеличении происходит переход от монохроматических колебаний ко все более сложным периодическим модуляционным циклам, которые чередуются с областями стохастического поведения. Из приведенных в [41] графиков автокорреляционных функций следует, что стохастичность легче реализуется при больших значениях параметра $\Delta f \cdot T$, то есть в случае широкополосного фильтра и большой задержки в цепи обратной связи. Подобные результаты были получены и в ряде других работ, выполненных на основе радиофизической модели [8, 42, 47-50]. Стохастичность в данной модели возни-

кает при использовании нелинейных элементов, обладающих падающим участком амплитудной характеристики, обеспечивающим неустойчивость монохроматических колебаний и детерминированных автомодуляционных циклов [41].

Анализировать автомодуляционные циклы часто удобно графически - с помощью диаграмм Ламерея (см., например, [9,51]), для численных расчетов по радиофизической модели предложен эффективный алгоритм [52], обеспечивший существенное сокращение времени счета на ЭВМ по сравнению с уже известными [51].

Таким образом, несмотря на простоту, радиофизический подход позволил получить ряд интересных результатов, имеющих общефизический характер. Следует, однако, еще раз указать на серьезные ограничения данного подхода, связанные с возможностью рассмотрения лишь узкополосных автоколебательных систем.

П.1.2. Система нескольких автогенераторов и неавтономный режим работы

В ряде случаев аппаратура, предназначенная для формирования сложного сигнала, объединяет несколько автогенераторов. Поэтому представляет интерес исследование автоколебательных процессов в системе связанных генераторов. В [53] рассмотрена система связанных автогенераторов, каждый из которых объединяет последовательно соединенные и замкнутые цепью обратной связи линейный элемент, нелинейный усилитель, узкополосный фильтр и линию задержки. В упомянутой работе с использованием радиофизической модели показана возможность многочастотных колебаний за счет падающего участка амплитудной характеристики. Логическим продолжением этого исследования является [54], где показано, что стохастические колебания в системе связанных автогенераторов, описываемых укороченными уравнениями для амплитуд, возможны только при наличии запаздывания в режиме автомодуляционной неустойчивости. Стохастические явления в системе связанных генераторов обсуждаются также в [55].

Практически важным и физически интересным является случай неавтономной работы автогенератора или системы автогенераторов, то есть под воздействием внешнего регулярного или шумового сигнала. Последний случай представляет интерес с точки зрения проблемы устойчивости функционирования генератора под воздействием помех случайной природы. Кроме того, неавтономная автоколебательная система служит простейшей моделью взаимодействия

автогенераторов. На основе этой модели можно исследовать реакцию усилителя, склонного к самовозбуждению, на входной сигнал; к ней сводится задача сверхрегенеративного приема [56].

В [57], посвященной численному анализу колебаний в системе, описываемой неавтономным уравнением Ван-дер-Поля.

$$\ddot{X} - \epsilon(1 - X^2)\dot{X} + X = B \cos \omega t,$$

где ϵ — коэффициент нелинейного трения, указывается, что в связи с открытием и изучением явления стохастизации автоколебаний в динамических системах с малым числом степеней свободы вызывает интерес поиск стохастических режимов в "классических" простейших неавтономных колебательных системах, в частности, в генераторах, описываемых неавтономным уравнением Ван-дер-Поля. В [56,58] на основе неавтономного уравнения

$$\ddot{X} - \epsilon(1 - X^2)\dot{X} + f(x) = B \cos \omega t,$$

где $f(x) = X^3$ или $f(x) = X + \epsilon X^3$, рассмотрены стохастизация и перестройка колебаний в автоколебательной системе с внешним гармоническим воздействием. Аналогичным вопросам посвящены [55,59-64].

П.2. Электронная модель ЛБВ-генератора с внешней обратной связью

В отличие от радиофизического подхода анализу ЛБВ-генератора на основе электронной модели посвящено значительно меньше работ. Это обусловлено тем, что специфика такой сложной электронно-волновой системы, как ЛБВ в радиофизической модели учитывается довольно просто — аналитическим заданием амплитудной характеристики, справедливой, вообще говоря, лишь в одной точке полюсы частот лампы, и заданием характеристики полосового фильтра в цепи обратной связи. Анализ существенно усложняется при использовании электронной модели. В этом случае корректное решение задачи требует численного моделирования автоколебательных процессов на основе нелинейной нестационарной теории взаимодействия электронного потока с полем сложного и, в общем случае, широкополосного сигнала. Такая теория [65] была разработана авторами обзора, и некоторые результаты моделирования, полученные на ее основе, будут приведены ниже.

П.2.1. Приближенные модели

Приближенные расчеты на основе стационарной теории много-частотного режима проводились А.И. Рогашковой, М.Б. Цейтлиним; И.Т. Цицонем, С.А. Рогашковым. Ими анализировалось циклическое многократное прохождение через ЛБВ первоначально заданного полигармонического сигнала.

В [4,12] предлагается иная приближенная методика расчета, основанная на следующих предположениях:

1. Поле на входном участке ЛБВ считается заданным.
2. На входном участке ЛБВ фазовая скорость волны постоянна и не зависит от частоты сигнала.
3. Для выходного участка лампы используется приближение заданного тока, поскольку входной сигнал полностью затухает в локальном поглотителе, а выходной сигнал мал и не оказывает существенного влияния на пучок.
4. Влиянием пространственного заряда пренебрегается.
5. Параметр усиления S считается малым.

Расчеты, выполненные в рамках данных предположений, позволили сделать, в частности, следующие выводы.

1. Генерация стохастических колебаний возможна даже в том случае, когда в полосу пропускания фильтра цепи обратной связи попадает всего одна собственная частота. В этом случае генерация стохастических колебаний обусловлена неустойчивостью амплитуды и, следовательно, может быть реализована при помощи любого нелинейного элемента, обладающего аналогичной амплитудной характеристикой.

2. При переходе системы от одной собственной частоты в полосу фильтра цепи обратной связи к двум происходит существенное расширение области значений коэффициента передачи цепи обратной связи, при которых имеет место стохастичность.

П.2.2. Численное моделирование на основе нестационарной нелинейной теории

Разработанная авторами обзора нестационарная нелинейная теория ЛБВ позволяет анализировать усиление и генерацию в ЛБВ сложных сигналов со сплошным и дискретным спектрами произвольной ширины [5,65]. В результате совместного решения уравнений движения крупных частиц и уравнения для синхронного поля в ЗС находятся зависимости полного тока и поля как функции длины

системы и времени. Ниже приведены некоторые результаты численного анализа непрерывных и импульсных автоколебаний в ЛБВ-генераторе, проведенного на основе нестационарной теории [66,67].

П.2.2.1. Анализ непрерывных автоколебаний

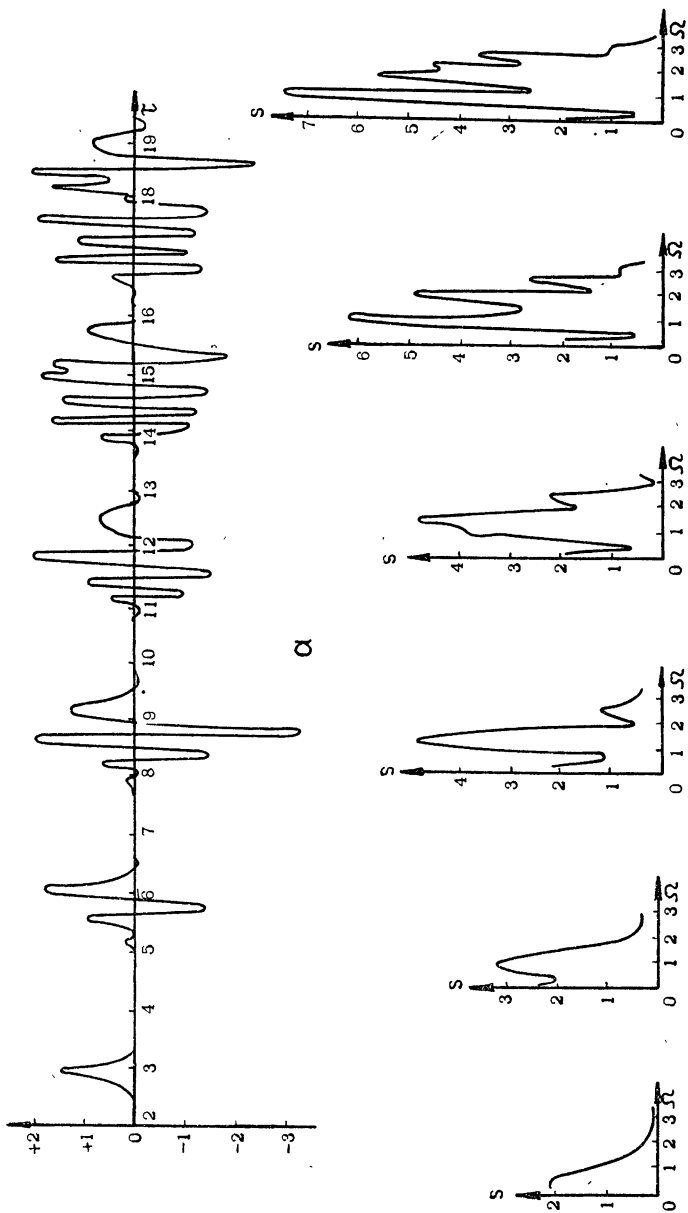
Рассматриваемая динамическая система состоит из широкополосной ЗС, возбуждаемой электронным потоком, и цепи внешней обратной связи (ЦВОС) с регулируемой задержкой во времени. Для простоты полагается, что ЦВОС бездисперсна и в ней отсутствует затухание, то есть коэффициент передачи ЦВОС равен единице. Таким образом, полное время одного цикла прохождения сигнала по системе τ_u складывается из времени распространения в пространстве взаимодействия $\tau_{пв}$ и времени прохождения $\tau_{вос}$ по ЦВОС:

$\tau_u = \tau_{пв} + \tau_{вос}$. Участвующие в расчетах параметры рассинхронизма b_0 , усиления C , напряженность электрического поля F , время $\tau = C\omega_0 t$, безразмерная частота $\Omega = \omega/\omega_0$ и длина пространства взаимодействия θ соответствуют частоте ω_0 , для которой величина волнового сопротивления близка к максимуму.

Начальное возмущение в системе моделировалось импульсом включения тока электронов. В результате взаимодействия фронта электронного потока с наводимым им полем к концу ЗС приходит видео- либо радиоимпульс поля (см. П.3 настоящего обзора), который затем автоматически передается с соответствующей задержкой на вход системы.

Из рис. 6, где показана динамика развития колебаний в системе, видно, что импульс поля, проходя несколько циклов, превращается в пук сложного колебания. На первых циклах максимум в спектре сдвигается к частоте максимального усиления Ω_M , равной в данном случае 1,7 [68]. После 5-6 циклов в результате сильного нелинейного взаимодействия спектр приобретает ярко выраженный полимодальный характер.

В определенный момент, когда передний фронт последующего пуга настигает задний фронт предыдущего, колебание в системе становится непрерывным. Спектральный и корреляционный анализы позволяют сделать вывод, что на протяжении большого числа циклов процесс носит преимущественно полигармонический характер (рис. 7). Частотный интервал между пиками в спектре соответствует времени распространения сигнала по цепи обратной связи τ_u . Огибающая автокорреляционной функции промодулирована с этой же частотой. С переходом в режим, близкий к стационарному,



б

Рис. 6. Динамика зарождения и развития колебаний в системе: а - форма поля; б - спектр поля. Цифры под рисунками означают номер цикла N ; $\theta = 3$; $C = 0,1$; $b_0 = 0$; $\tau_{\text{вас}} = 0$

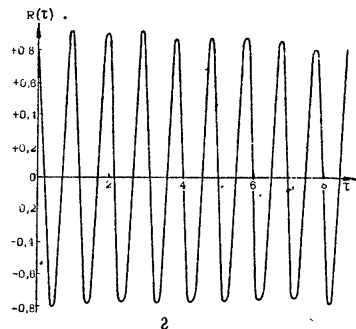
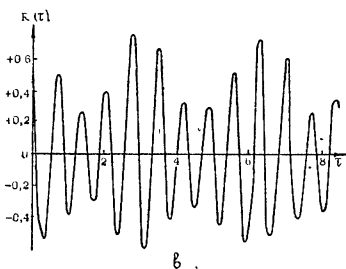
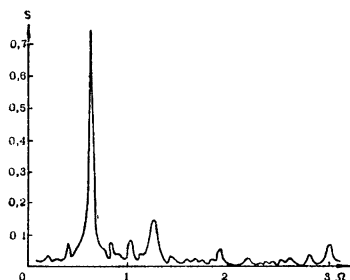
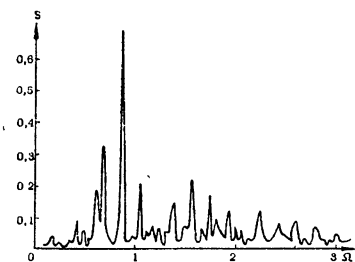
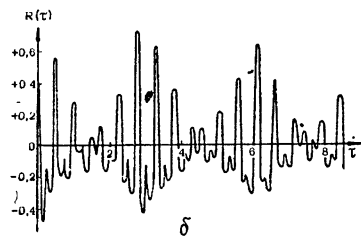
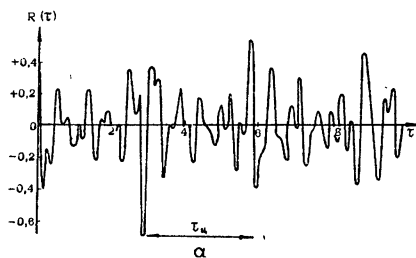
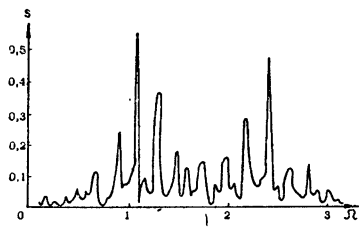
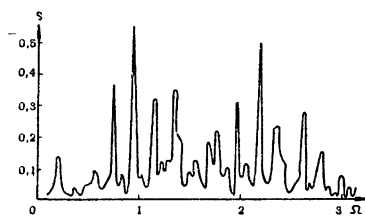


Рис. 7. Спектр и автокорреляционная функция: $\theta = 3$; $c = 0,1$; $\delta_0 = 0$; $\tau_{0,0} = 0$; а - $N = 10$, б - $N = 70$, в - $N = 100$, г - $N = 200$; τ_μ - время распространения сигнала по кольцу обратной связи

в результате конкуренции колебаний с различной частотой в спектре подавляются все составляющие, за исключением одной, частота которой сдвигается в низкочастотную область (рис. 7в). При числе циклов $N = 200$ (рис. 7г) колебательный процесс близок к монохроматическому.

Следует отметить, что согласно определению стационарности процесса в широком смысле автоколебания при $N = 200$ являются стационарными, поскольку дисперсия σ^2 со временем не меняется (рис. 8, кривая 3): Однако легко видеть из рис. 7в,г, что, хотя дисперсия в интервале $N = 100-200$ практически постоянна,

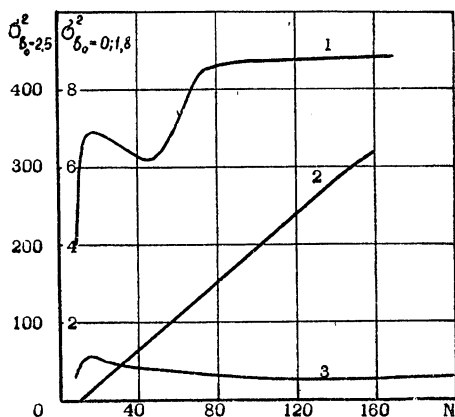


Рис. 8. Зависимость дисперсии колебаний от числа циклов: $\theta = 3$; $C = 0, I$; $\tau_{\text{вс}} = 0$; 1 - $b_0 = 1,8$; 2 - $b_0 = 2,5$; 3 - $b_0 = 0$

более тонкие характеристики — спектр и автокорреляционная функция — продолжают меняться со временем. Следовательно, понятием стационарности (в широком смысле) при анализе автоколебаний в генераторе с обратной связью следует пользоваться осторожно, обязательно обращая внимание на динамику более чувствительных и информативных характеристик процесса — спектр и автокорреляционную функцию. В данном случае эти характеристики позволяют сделать вывод, что автоколебания, показанные на рис. 7, имеют четко выраженную тенденцию к монохроматичности.

Иной характер динамики спектра наблюдается в режиме $b_0 \neq 0$ (рис. 9). С течением времени энергия полигармонического колебания перераспределяется из низкочастотной области в высоко-

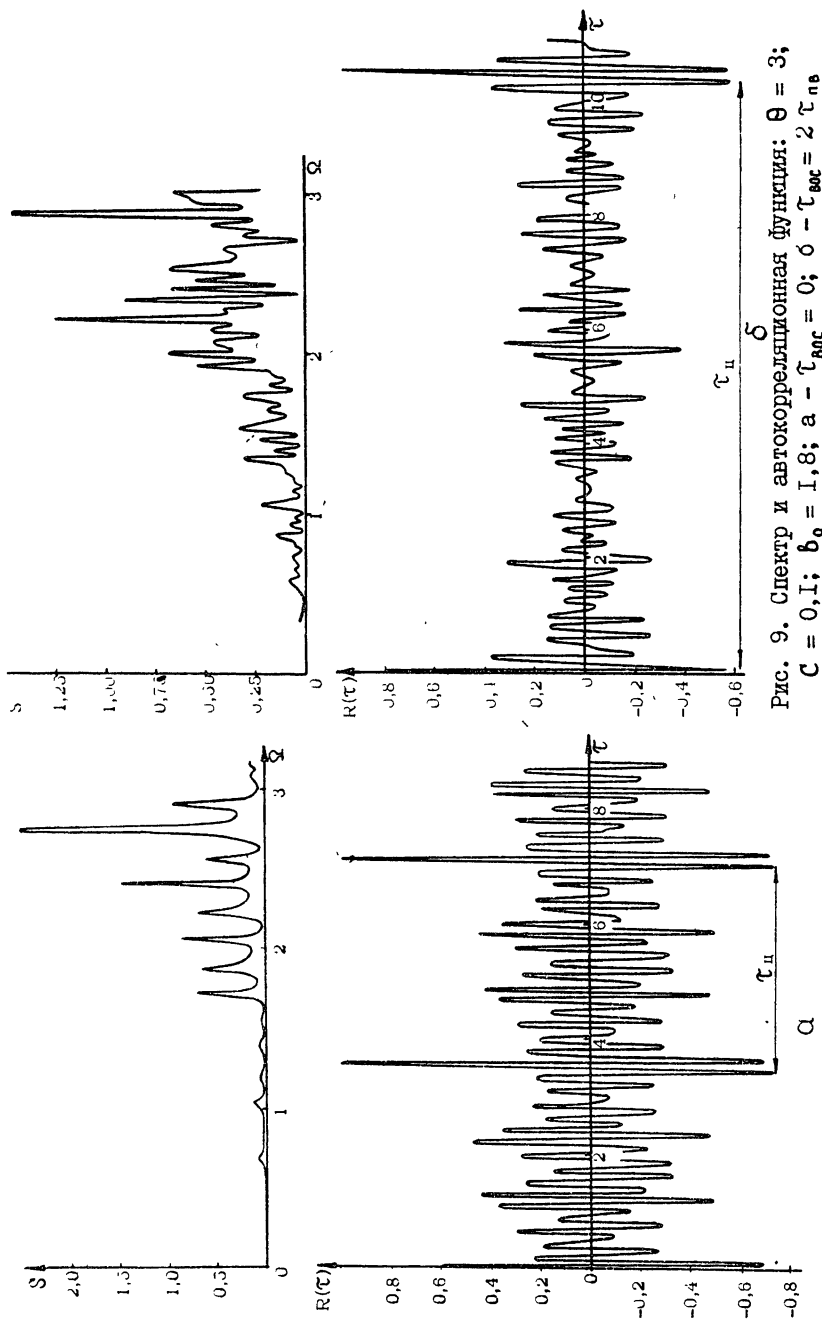


Рис. 9. Спектр и автокорреляционная функция: $\theta = 3$;
 $C = 0,1$; $b_0 = 1,8$; $a - \tau_{\text{вос}} = 0$; $b - \tau_{\text{вос}} = 2 \tau_{\text{пв}}$

частотную. Ширина спектра по сравнению с режимом $b_0 = 0$ резко увеличилась (рис. 9а). Сдвиг спектра связан с тем, что для поддержания колебаний с большой амплитудой в ЛБВ с малым усилением ($\theta = 3$) необходимы высокие значения параметра рассинхронизма (аналог известного крестатронного режима), что возможно на высоких частотах за счет падения сопротивления связи. Расширение спектра при больших b_0 объясняется более пологой зависимостью спектральных амплитуд от безразмерной длины θ или, что то же самое, от частоты.

С ростом усиления, как отмечается в [41, 47], в системе с ЗОС могут генерироваться колебания все более сложного вида. Результаты расчетов, проведенных для длины пространства взаимодействия $\theta = 6$ (рис. 10), свидетельствуют о том, что процесс

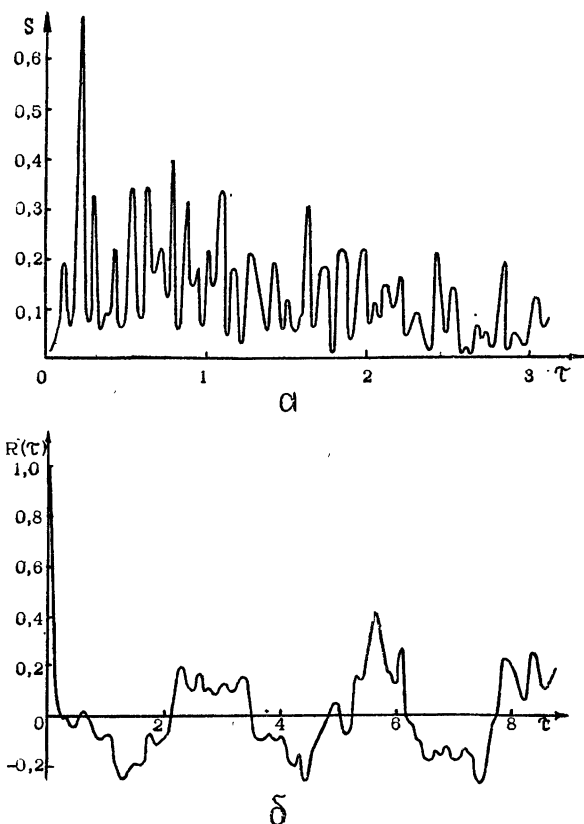


Рис. 10. Спектр (а) и автокорреляционная функция (б): $\theta = 6$; $C = 0,1$; $b_0 = 0$;
 $\tau_{\text{вос}} = 0$

представляет собой смесь полигармонических и шумовых колебаний. Пики в спектре расположены плотнее, что связано с большим временем распространения сигнала вдоль системы. Основной (наиболее четко проявляющийся) период автокорреляционной функции соответствует частоте расположения максимума в спектре. Установление стационарного режима происходит быстрее, чем на длине $\Theta = 3$: $N \approx 30-40$; $\tau \approx 180-240$ при $b_0 = 0$; 1,8.

Известно, что с ростом величины $\Delta f \cdot t_{\text{ц}}$, где Δf — ширина полосы пропускания усилителя с ЗОС, облегчается переход к стохастическим колебаниям [41]. Для иллюстрации этого явления был проведен расчет с увеличенным значением $t_{\text{ц}}$. Рис. 9б позволяет сравнить спектры и автокорреляционные функции для $\tau_{\text{вос}} = 0$ и $\tau_{\text{вос}} = 2\tau_{\text{пв}}$ ($\tau_{\text{ц}} = 3\tau_{\text{пв}}$), из которых следует, что во втором случае характер колебаний менее регулярный.

Для выяснения влияния геометрической длины рассматривался режим с малым параметром усиления $S = 0,03$ и длиной пространства взаимодействия $\Theta = 6$. При этих параметрах в области значений b_0 , соответствующих режиму максимального КПД при усилении монохроматического сигнала, удалось получить в расчетах генерацию стохастических колебаний с быстро спадающей автокорреляционной функцией даже в отсутствие внешней задержки сигнала (рис. 10б). При отклонении b_0 в ту или иную сторону от указанной зоны (рис. 10а, в) стохастический характер сигнала в значительной степени нарушается, что качественно соответствует экспериментальным данным [10]. Отметим, что для больших b_0 спектр сужается и сдвигается в низкочастотную область. Уровень спектральных составляющих и дисперсия колебаний в среднем растут с повышением b_0 . Анализ влияния тока электронного пучка на спектрально-корреляционные характеристики процесса показал, что уменьшенным значениям тока соответствуют более регулярные колебания.

Интересным выводом численного анализа является получение стохастических колебаний с быстро спадающей автокорреляционной функцией при уменьшении параметра усиления для той же электрической длины системы ($\Theta = 6$). В стационарной теории ВЧ характеристики одночастотного режима зависят лишь от Θ . В нестационарной модели ЛБВ функция Грина в уравнении возбуждения [65] определяется пространственными и временными интервалами, и изменение формы поля определяется не только электрической, но и геометрической длиной системы. Поскольку при фиксированной величине Θ с уменьшением параметра усиления геометрическая дли-

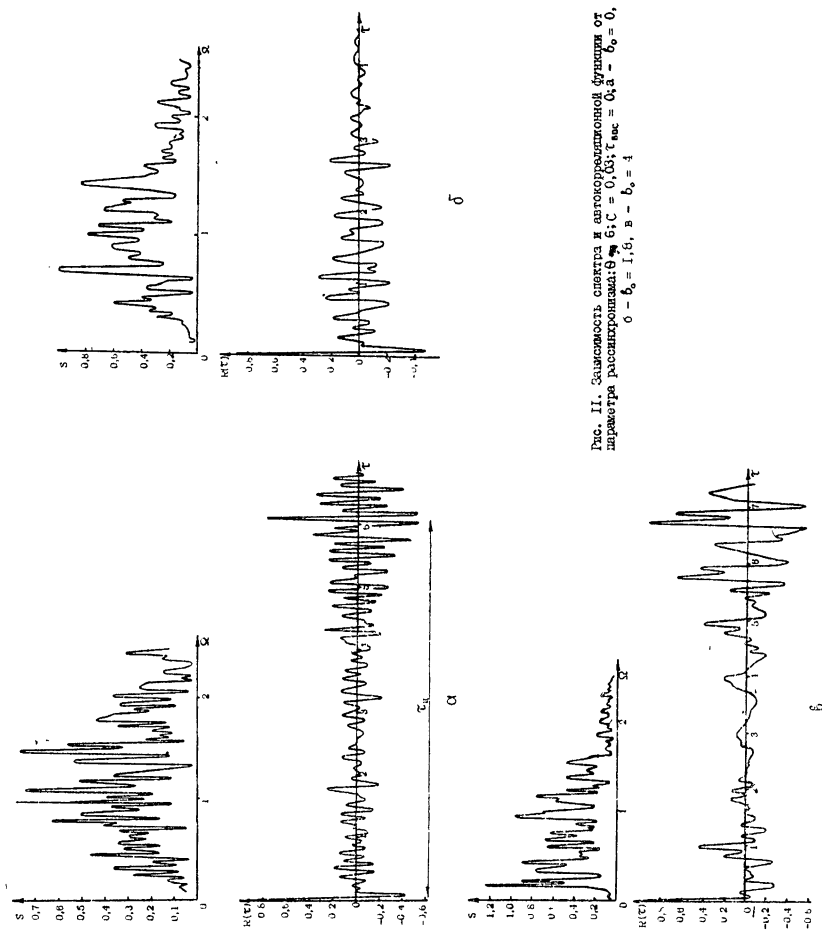


Рис. II. Зависимость спектра и автокорреляционной функции от параметра расширения канала δ ; $C = 0,03$; $\tau_{max} = 0,1$; $b_0 = 0$, $\delta - b_0 = 1,5$, $\nu - b_0 = 1$

на растёт, то, по-видимому, увеличение степени стохастизации связано в основном с этим фактором.

П.2.2.2. Анализ импульсных автоколебаний

Анализ импульсных автогенераторов с распределенным взаимодействием представляет интерес как с точки зрения выяснения физических особенностей автоколебательных процессов в системах с запаздывающей обратной связью, так и в плане решения проблемы формирования наносекундных и субнаносекундных импульсов.

Из [33] и нижеприведенных результатов следует, что рассматриваемая система позволяет получать радиоимпульсы, формой и длительностью которых можно легко управлять параметрами схемы. Так, полоса частот фильтра определяет длительность, его средняя частота — частоту ВЧ заполнения импульса; период циркуляции импульса соответствует полному времени его прохождения по цепи [20].

На основе нестационарной нелинейной теории был проведен численный анализ возникновения и развития импульсных автоколебательных процессов в системе: широкополосная ЛБВ — линия задержки — экспандер [67]. Некоторые результаты расчетов приведены ниже.

Рассматриваемая автоколебательная система состоит из широкополосной спиральной замедляющей системы, возбуждаемой электронным потоком, и цепи внешней обратной связи, включающей линию задержки и экспандер (рис. 12). Полагается, что линия

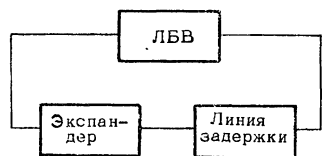


Рис. 12. Анализируемая автоколебательная система

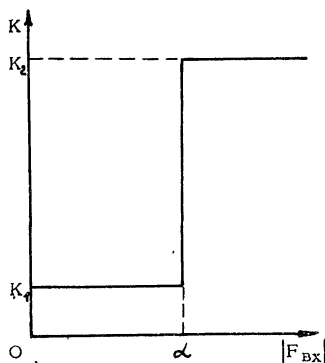


Рис. 13. Зависимость коэффициента передачи экспандера от величины входного сигнала

задержки бездисперсна и в ней отсутствует затухание. Математическая модель экспандера имеет коэффициент передачи $K (|F_{вх}|)$ (рис. 13). В зависимости от абсолютной величины сигнала на входе в экспандер $|F_{вх}|$ коэффициент передачи может принимать одно из двух значений:

$$K \begin{cases} K_1, & |F_{вх}| < \alpha; \\ K_2, & |F_{вх}| \geq \alpha. \end{cases}$$

Такая идеализированная модель делает более наглядным и простым управление автоколебательным процессом.

Полное время одного цикла прохождения сигнала по системе τ_u складывается из времени распространения в пространстве взаимодействия $\tau_{пв}$ и времени прохождения по ЦВОС $\tau_{вос}$: $\tau_u = \tau_{пв} + \tau_{вос}$.

Начальное возмущение в системе моделировалось импульсом включения тока. Приведенные ниже зависимости $F(\tau)$ рассчитаны на выходе ЛБВ для $\theta = 3$, $C = 0,1$, $b_0 = 0$, $\tau_{вос} = 6$.

Анализ показал, что для фиксированного набора параметров ЛБВ и линии задержки существует определенная зона по каждому из параметров K_1, K_2, α , в которой система генерирует импульсы. Например, при фиксированных K_1 и K_2 существует интервал $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$, обеспечивающий режим формирования импульсов. При $\alpha > \alpha_{max}$ начальный импульс быстро затухает, при $\alpha < \alpha_{min}$ процесс из импульсного преобразуется в непрерывный.

Из расчетов следует, что с ростом рассинхронизма (b_0) зона значений параметров экспандера, при которых существует режим генерации импульсов, резко сужается. Так при выбранных электрических параметрах системы для $b_0 \geq 1$ зону генерации импульсов найти не удалось. Это связано с тем, что при $b_0 > 0$ амплитуда колебаний и их длительность существенно увеличиваются, что приводит к возникновению непрерывных колебаний. Использование экспандера с характеристикой, обеспечивающее плавное увеличение коэффициента передачи экспандера с ростом амплитуды подводимого сигнала, дает возможность сформировать импульсы и при $b_0 \geq 1$.

На рис. 14 показана динамика зарождения и развития колебаний в системе, начиная от видеоимпульса, наведенного фронтом импульса тока и кончая формированием стационарного радиоимпульса. В отсутствие экспандера расширяющиеся после каждого цик-

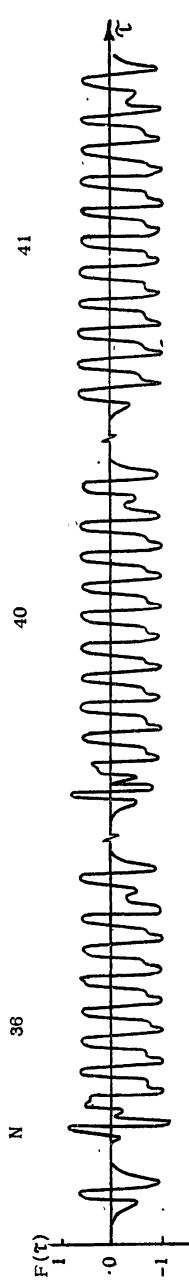
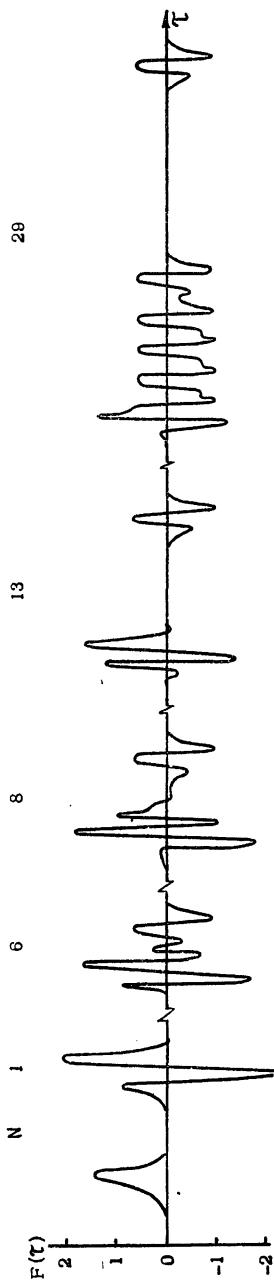


Рис. 14. Развитие автоколебаний в системе: N — номер цикла; $\alpha = 0,85$, $K_1 = 0$, $K_2 = 1$

ла пути колебаний смыкаются друг с другом после 7-го цикла, образуя непрерывный процесс (рис. 6). Экспандер, подавляя в данном случае до нуля колебания с амплитудой $|F| < \alpha \approx 0,85$, препятствует слиянию цугов. Более того, после 8-го цикла в области малых амплитуд внутри импульса происходит их полное подавление, в результате чего он делится на два самостоятель-но циркулирующих в системе импульса. Однако такое состояние не является стабильным. В то время как правый, меньший импульс не меняет своей формы при дальнейшем прохождении по цепи, левый непрерывно трансформируется. При числе циклов $N \approx 30$ в нем уже можно наблюдать участок стационарных колебаний, увеличивающий свою длительность с каждым циклом. Интервал между правым импульсом и "хвостом" левого также непрерывно растет. В итоге правый импульс начинает смыкаться с левым со стороны его переднего фронта ($N \approx 36-37$) и приблизительно после 41-42 циклов в системе циркулирует один импульс со стационарной во времени формой и огibaющей, близкой к прямоуголь-ной. Высокочастотное (ВЧ) заполнение его заметно отличается от монохроматического, основная частота в спектре $\Omega = 1,2$. Длительность циркулирующего импульса составляет $\tau_{и} = 10,7 \tau_0$ (τ_0 - период колебания с частотой $\Omega = 1$).

Из рис. 15, иллюстрирующего процесс установления стационарного значения дисперсии колебаний σ^2 и длительности формируемого импульса, видно, что обе величины стабилизируются при $N \approx 40$. Стационарное значение $\sigma^2 = 0,26$ меньше, чем в отсутствие экспандера ($\sigma^2 = 0,4$), и достигается быстрее.

Длина ЦВОС влияет на процесс джоинга. Во-первых, уменьшение длины ЦВОС приводит к росту частоты циркуляции импульса за счет сокращения времени прохождения по ЦВОС, при этом форма импульса не меняется. Во-вторых, поскольку при уменьшении ЦВОС интервал между импульсами сокращается, величина α_{\min} , разграничивающая импульсный и непрерывный режим, растет.

Из рис. 16 видно, что форма импульса существенно зависит от параметра α . При α , лишь незначительно превышающих α_{\min} , импульсное колебание имеет сложную структуру и состоит из близко расположенных друг от друга импульсов различной формы и длительности; процесс еще близок к непрерывному (рис. 16а). С увеличением α в системе формируется один импульс с длинной регулярной областью (рис. 16б). При дальнейшем росте α длительность импульсов сокращается (рис. 16, 17), а интервал между ними соответственно растет; амплитуда колебаний при этом

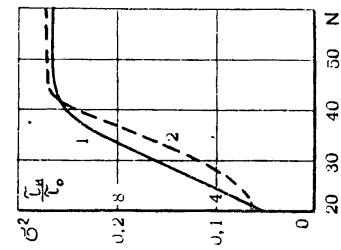


Рис. 15. Установление дисперсии колебаний σ^2 (1) и длительности импульса τ_n/τ_0 (2): $\alpha = 0,85$, $K_1 = 0$, $K_2 = 1$

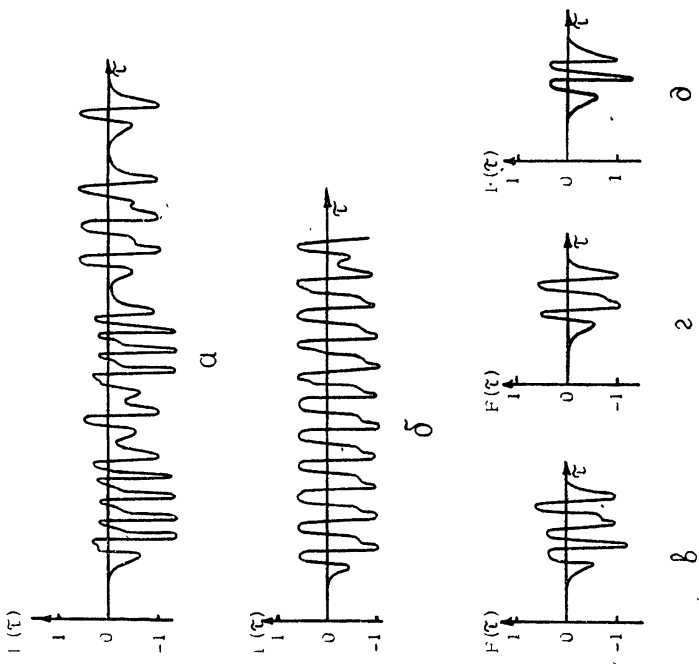


Рис. 16. Форма импульса для различных α : $K_1 = 0$, $K_2 = 1$; а - $\alpha = 0,85$; б - $\alpha = 0,85$; в - $\alpha = 0,99$; г - $\alpha = 0,95$; д - $\alpha = 0,99$

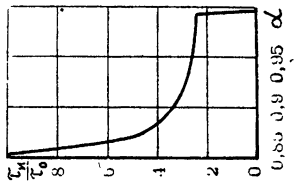


Рис. 17. Зависимость длительности импульса от α : $K_1 = 0$; $K_2 = 1$

меняется слабо.

Вблизи $\alpha'_{max} \approx 1$ импульс состоит всего из нескольких периодов ВЧ заполнения. Процесс формирования импульса при $\alpha \approx \alpha'_{max}$ более простой. С момента начального возмущения в системе циркулирует один импульс. Дисперсия процесса $\sigma^2 = 0,04$ существенно ниже, чем при $\alpha = 0,85$ в силу меньшей длительности импульса. Установление стационарного режима происходит значительно раньше — уже на 9-м цикле.

Отметим, что эффективное управление характеристиками генерируемых импульсов возможно не только за счет вариации величины α , но и двух других параметров экспандера — K_1 и K_2 . Так при $K_2 = 0,7$ удалось получить импульс, состоящий практически из одного периода ВЧ колебаний.

II.3. Генерирование сложных сигналов в ЛБВ без внешней обратной связи

Одной из наиболее ранних теоретических работ, посвященных генерации сложных сигналов в ЛБВ без внешней обратной связи, следует считать [33], в которой анализировалось формирование коротких радиоимпульсов путем модуляции ускоряющего напряжения на спирали по синусоидальному закону (на вход лампы при этом подавался непрерывный ВЧ сигнал от внешнего источника [I, 34]).

Анализ возбуждения коротких импульсов фронтами распространяющегося через ЗС импульса тока [35] проведен в [69].

Задача о распространении импульса тока (ИТ) в ЗС представляет интерес прежде всего по следующей причине. Известно, что параметры радиолокационных систем в наносекундном диапазоне в значительной степени определяются качеством формирования и усиления зондирующих сигналов в основном усилительно-преобразующем элементе системы — ЛБВ. Так при усилении сверхкоротких радиоимпульсов в режиме импульсной модуляции электронного пучка в случае, когда длительности импульсов поля и тока приблизительно одинаковы, существенное влияние на выходной сигнал могут оказать нестационарные явления на фронтах ИТ. Для облегчения анализа этих процессов целесообразно предварительно рассмотреть более простую ситуацию, а именно: распространение в свободной от внешних полей ЗС импульса тока. Последний случай представляет и, как отмечалось выше [35], чисто практический интерес. Теоретический анализ излучения зарядов в волноведущих

структурах уже проводился в ряде работ. Так, в [70] рассмотрено излучение равномерно движущегося заряда через цепочку связанных резонаторов. В [71] в линейном приближении рассмотрено движение бесконечной последовательности электронных сгустков внутри круглого волновода, причем предполагается, что сгустки имеют фиксированные границы и постоянную скорость, а электроны внутри сгустка распределены равномерно. В [72,73] анализируется излучение ИТ, движущегося в цилиндрическом резонаторе с постоянной скоростью. Возбуждение волноводных систем электронным потоком с заданной некогерентной модуляцией рассмотрено в [74]. Основным ограничением указанных выше работ является неучет изменения скорости движения частицы за счет обратного действия излучения на заряд, или действия заряда "самого на себя" [75].

Самосогласованная система уравнений движения электронов и возбуждения полей решалась в [76,77] для релятивистского сверхнормального пучка в резонансной ЗС в виде последовательности связанных резонаторов и в [69] для спиральной ЗС.

Расчеты в [77] проводились для следующих параметров: внутренний радиус волновода $b = 1,7$ см, период ЗС $h = 1,2-1,6$ см, ширина полосы - около 40%, ускоряющее напряжение 700 кВ, ток пучка 5 кА. В процессе исследований рассматривались различные граничные условия на входном конце лампы: либо запредельное сужение, либо согласованный вывод энергии, аналогичный выводу на выходе системы. Замедляющая структура состояла из 25 ячеек. Анализ показал, что взаимодействие поля и тока в данной структуре имеет сложный характер, промежуточный между взаимодействием поля и тока в ЛЕВ и ЛОВ. В [77] на основании результатов численного моделирования указывается на возможность генерации коротких импульсов СВЧ излучения длительностью ~ 1 нс и энергией ~ 10 Дж при эффективности преобразования энергии пучка в излучение до 30%.

Рассмотрим далее некоторые результаты численного моделирования прохождения ИТ через широкополосную спиральную ЗС [69]. Расчеты проводились на основе нестационарной нелинейной теории ЛЕВ [65] в одномерном приближении. Длительность импульса тока τ_n бралась равной 5, что соответствует приблизительно 26 периодам ВЧ колебаний с частотой f_0 . Следует подчеркнуть, что в данном случае, как и в [77], нестационарные процессы взаимодействия ИТ с наведенными полями носят сложный характер, поэтому ниже отмечены лишь их основные особенности.

Из рис. 18, 19 видно, что передний и задний фронты ИТ возбуждают в ЗС видеоимпульсы поля противоположной полярности, максимумы которых распространяются со скоростью, близкой к фазовой U_ϕ , для рассматриваемой бездисперсной ЗС совпадающей с групповой.

Картину взаимодействия тока и поля можно представить следующим образом. Для положительного параметра рассинхронизма $b_0 > 0 (U_e > U_\phi)$ при движении в ЗС передний фронт ИТ, взаимодействуя с поглотительным импульсом поля (ИП), ускоряется. Задний же фронт ИТ распространяется в отрицательном ИП, что приводит к его торможению. Эта асимметрия взаимодействия проявляется, в частности, в том, что если на малых длинах (рис. 18а) изменение ИТ на обоих фронтах почти симметрично, то в дальнейшем с ростом длины симметрия исчезает (рис. 18б).

На достаточно большой длине вследствие селективности взаимодействия по частоте наведенные вначале видеоимпульсы поля постепенно приобретают форму, напоминающую радиоимпульсы (рис. 18б).

С ростом b_0 (рис. 19а) скорость импульсов поля падает. При этом положительный импульс проникает глубже в ИТ, увеличивая тем самым как свою длительность, так и длительность переднего фронта ИТ. В то же время перекрытие заднего фронта ИТ с отрицательным ИП уменьшается, что приводит к ослаблению искажений первого.

Из рис. 19б следует, что при $U_\phi > U_e$ передний ИП обгоняет ИТ, оказывая слабое влияние на электроны (видны лишь небольшие искажения переднего фронта ИТ). Задний ИП, проникая в ИТ значительно глубже, взаимодействует с ним эффективнее. Величина пика тока на заднем фронте ИТ максимальна при $b_0 \approx -1$, что соответствует результатам стационарной теории, согласно которой сгруппированный ток максимален при $b_0 < 0$.

Проведенное рассмотрение показало, что основным фактором увеличения длительности ИТ с ростом длины ЗС служит появление значительного числа медленных электронов вследствие эффективного взаимодействия тормозящего поля заднего ИП с ИТ.

Из численного анализа следует, что нестационарные процессы слабо зависят от длительности ИТ, вплоть до τ_n порядка нескольких τ_0 , где τ_0 — период колебаний с частотой f_0 . Для сверхкоротких ИТ ($\tau_n \sim 0,2 \tau_0$) передний и задний наведенные ИП практически смыкаются друг с другом.

На рис. 20 показана форма колебаний поля в присутствии не-

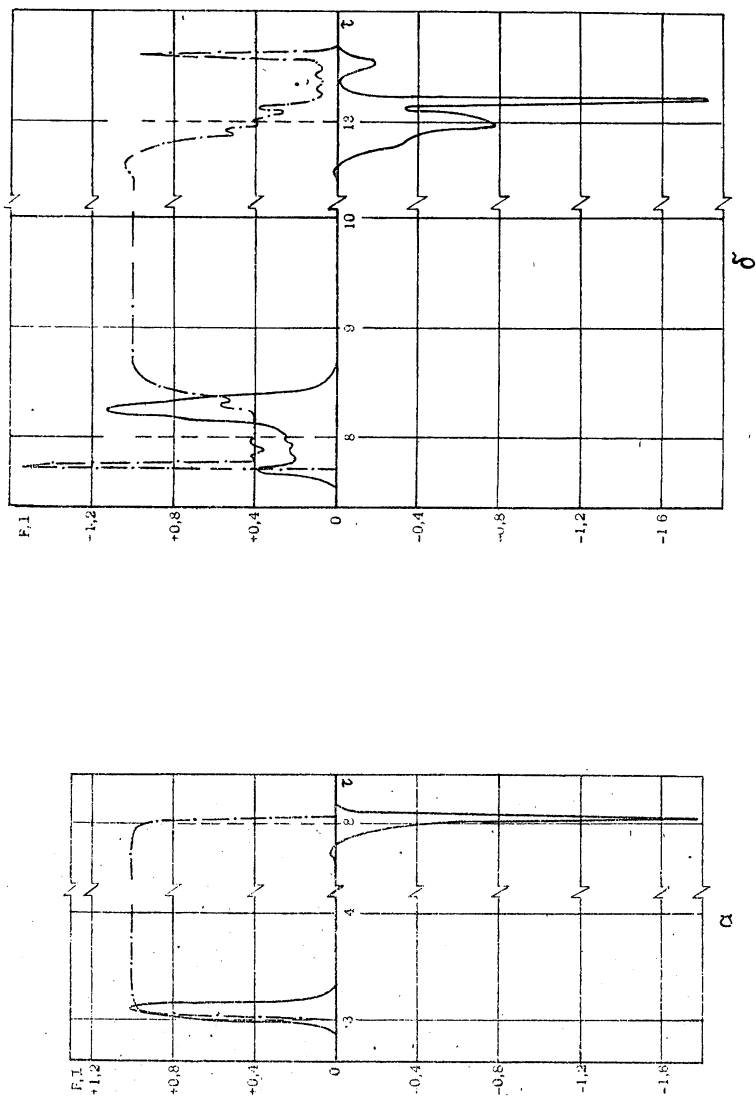


Рис. 18. Зависимость формы импульса тока I (---) и поля F (—) от времени при $\delta_0 = 1$:
 $a - \vartheta = 3$; $\delta - \vartheta = 8$

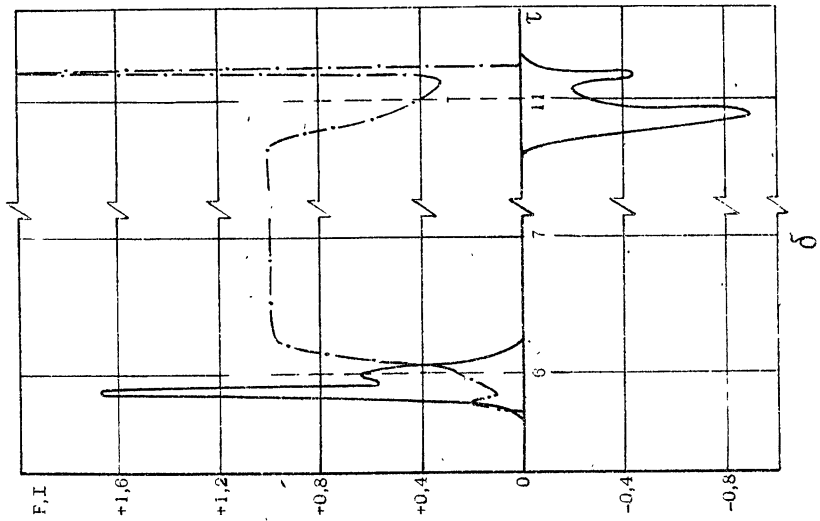
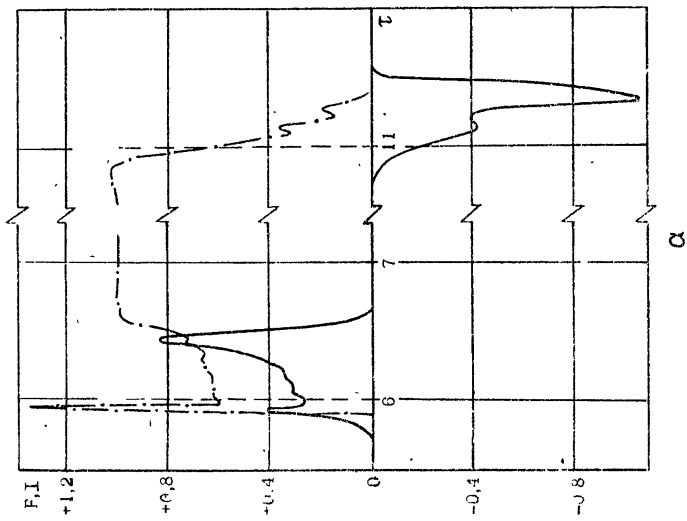


Рис. 19. Зависимость формы импульса тока I (---) и F (—) от времени при $\theta = 6$: а - $b_0 = 2,5$; б - $b_0 = -1$

прерывного гармонического входного сигнала с амплитудой $F_0 = 0,05$. Фронты усиленного радиоимпульса состоят из видеоимпульсов длительностью $\tau \approx 3\tau_0$, возбуждаемых фронтами ИТ, и переходных участков непосредственно радиоимпульса с $\tau \approx \tau_0$ на

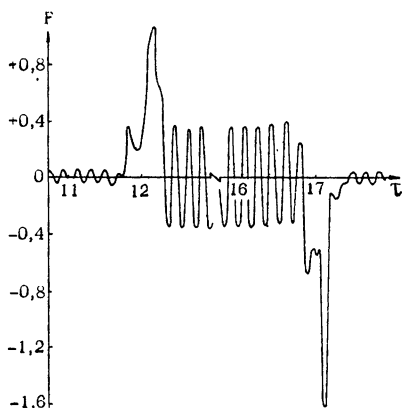


Рис. 20. Поле в присутствии непрерывного гармонического входного сигнала при импульсной модуляции тока: $\theta = 6$; $\theta_0 = 1$; $F_0 = 0,05$

переднем фронте и $\tau \approx 3\tau_0$ на заднем фронте. Таким образом, полная длительность переходных процессов в радиоимпульсе составляет в данном случае $\tau_{пер} \approx 10\tau_0$. Близкие к этому значению $\tau_{пер}$ получены и для режимов, при которых амплитуда выходного ВЧ сигнала больше амплитуды импульсов, возбуждаемых фронтами ИТ. Столь большая длительность переходных процессов может привести к ухудшению характеристик радиоэлектронной аппаратуры при работе со сверхкороткими импульсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает проведенный анализ, к настоящему времени имеется достаточно большая библиография работ, где рассмотрены экспериментально и теоретически вопросы генерирования СВЧ широкополосных колебаний с помощью ЛЭВ. При этом рассмотрение не ограничивается только классическим случаем усилителя с внешней запаздывающей обратной связью.

Основное внимание в последних публикациях уделяется наиболее актуальной проблеме — стохастизации колебаний и изучению динамики перехода регулярных колебаний в стохастические.

При дальнейшем изучении эффективного генерирования широко-

полосных колебаний с помощью ЛБВ необходимо обратить внимание на следующее:

И. Практическое использование.

1. Поиск конструкций ЛБВ, обеспечивающих максимальный КПД генерации различных сигналов, как непрерывных, так и импульсных.

2. Синтез конструкций генераторов для получения заданной формы колебаний.

II. Теория и моделирование на ЭВМ.

1. Развитие нестационарной нелинейной теории ЛБВ: учет поля пространственного заряда и дисперсии фазовой скорости в замедляющей системе.

2. Исследование особенностей перехода системы в стохастический режим и характеристик развитых шумовых колебаний.

III. Экспериментальные исследования.

1. Анализ условий генерирования импульсов различной формы в зависимости от параметров экспандера.

2. Подробное исследование перехода детерминированных колебаний в стохастические в широкополосных генераторах.

IV. Методология.

Влияние специфики распределенной системы (в частности, ЛБВ) на характеристики генерируемых колебаний и волн.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Манькин И.А., Школьников В.Г. Сверхширокополосные сигналы в СВЧ системах. Ч. I. Нестационарные электромагнитные процессы и широкополосные системы: Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.- М.: ЦНИИ "Электроника", 1983. - Вып. 3 (926).- 52 с.

2. Рабинович М.И. Стохастические автоколебания и турбулентность.- Успехи физических наук, 1978, т. 125, вып. I, с. 123-168.

3. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика.- М.: Мир, 1984.- 528 с.

4. Кузнецов С.П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью.- Известия вузов. Радиоп физика, 1982, т. XXV, № 12, с. 1410-1428.

5. Манькин И.А., Школьников В.Г. Сверхширокополосные сигналы в СВЧ системах. Ч. II. Нестационарная электроника. Усиление сигналов со сплошным спектром в ЛБВ: Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.- М.: ЦНИИ "Электроника", 1984. - Вып. 3 (1001).- 65 с.

6. Котырев Е.А., Плисс Л.Е. Спектральные особенности устойчивой генерации колебаний в генераторах с запаздывающей обрат-

ной связью в мягком режиме.- Радиотехника и электроника, 1965, т. 10, № 9, с. 1628-1634.

7. Pat. 3178655(US). High power noise source employing a feedback path around a travelling wave tube/C.A.Ries, J.E.Zellers.-Filed 16.11.61, N152883; Publ. 13.04.65. Кл. 331-78.

8. Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием.- Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, № 6, с. 1118-1130.

9. Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 10, с. 2160-2168.

10. Анищенко В.С., Астахов В.В. Экспериментальное исследование стохастизации автоколебаний в усилителях с внешней обратной связью.- В кн.: Лекции по электронике СВЧ и радиопизи-ке (5-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. У.- Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1980, с. 118-133.

11. Об одном механизме перехода к хаосу в системе электрон-ный пучок - электромагнитная волна / Ю.В. Анисимова, А.С. Дмитриев, Н.Н. Залогин и др.- Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 37, вып. 8, с. 387-389.

12. Кац В.А., Трубецков Д.И. Возникновение хаоса при разру-шении квазипериодических режимов и переходе через перемежа-емость в распределенном генераторе с запаздыванием.- Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 39, вып. 3, с. 116-119.

13. Кац В.А. Экспериментальная демонстрация универсальных свойств последовательности бифуркаций удвоения Фейгенбаума при переходе к хаосу в распределенном генераторе с запаздыванием.- Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 10, вып. 11, с. 684-689.

14. Кальянов Э.В. Многочастотные явления при неавтономной работе ЛФВ-генератора.- Известия вузов. Радиоэлектроника, 1981, т. XXIV, № 10, с. 86-89.

15. Кальянов Э.В. Стохастизация и дестохастизация колебаний в неавтономных многомодовых автоколебательных системах.- Ра-диотехника и электроника, 1982, т. 27, № 12, с. 2448-2453.

16. Мясин Е.А., Панас А.И. К вопросу о стационарном состо-янии СВЧ-автогенератора широкополосных стохастических колеба-ний.- Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 12, с. 2423-2429.

17. Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах 0-типа с длительным взаимодействием.- М.: Сов. радио, 1975.- 296 с.

18. Железовский Б.Е., Кальянов Э.В. Многочастотные режимы в приборах СВЧ.- М.: Связь, 1978.- 256 с.

19. Beck A.C. Microwave testing with millimicrosecond pulses.-IEEE Trans.MTT, Apr.1954, vol.MTT-2, p.93-100.

20. Cutler C.C. The regenerative pulse generator.-PIRE, 1955, vol.43, N2, p.140-148.

21. Моругин Л.А. Импульсные устройства с запаздывающей обратной связью.- М.: Сов. радио, 1961.- 208 с.

22. Богатырев Ю.К. Генератор наносекундных импульсов с нелинейной запаздывающей обратной связью.- Известия вузов. Радиотехника, 1962, т. У, № 3, с. 399-402.

23. Кабанов Д.А. Анализ и синтез рециркулятора с преобразователем.- Радиотехника и электроника, 1974, т. 19, № 2, с. 303-311.

24. Кабанов Д.А., Седых М.М. Многоимпульсный режим генерации в рециркуляторе с функциональным преобразователем.- Радиотехника и электроника, 1976. т. 21, № 3, с. 640-642.

25. Моругин Л.А., Глебович Г.В. Наносекундная импульсная техника.- М.: Сов. радио, 1964.- 624 с.

26. Неймарк Ю.И., Маклаков Ю.К., Елкина Л.П. Циркуляция импульсов в сильнонелинейной системе с запаздывающей обратной связью; обладающей дисперсией.- Радиотехника и электроника, 1958, т. 3, № II, с. 1348-1360.

27. Кухтанов Г.Ф. Анализ и синтез импульсных генераторов с запаздывающей положительной обратной связью.- Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника, 1968, вып. 3, с. 101-105.

28. Beck A.C., Mandeville G.D. Microwave travelling-wave tube millimicrosecond pulse generator.-IEEE Trans.MTT, Dec.1955, vol.MTT-3, N6, p.48-51.

29. Schnitger H., Weber D. Untersuchungen über selbsterregte Schwingungen in der Wanderfeldröhre.-Frequenz, 1949, Bd.3, N7, S.189-195.

30. Михалевский В.С., Венеровский Д.Н. Генерация электромагнитных колебаний с помощью лампы бегущей волны с внешней спиралью.- ЖТФ, 1955, т. 25, № 5, с. 812-816.

31. Михалевский В.С., Венеровский Д.Н. Генерация электромагнитных колебаний с помощью лампы бегущей волны с внешней секционированной спиралью.- ЖТФ, 1956, т. 26, № 3, с. 526-529.

32. Венеровский Д.Н., Пурто В.М. К вопросу о возбуждении наносекундных импульсов при помощи генераторной ЛЕВ.- Радиотехника и электроника, 1958, т. 3, № II, с. 1404-1406.

33. Miyauchi K. Traveling-wave tube nanosecond pulse generator in 24-GGz region.-IEEE Trans.MTT, January 1963, vol.MTT-11, p.3-17.

34. Klute W.A. Pulse generation and shaping at microwave frequencies.-Bell Laboratories Record, May 1951, p.216-220.

35. Палфер Д.К., Витфорд Б.Г. Простой метод генерирования наносекундных импульсов в диапазоне волн от 8200 до 12400 МГц.- Труды Института радиоинженеров, 1961, т. 49, № 5, с. II29-II31.

36. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения релятивистскими сильноточными пучками электронов микросекундной длительности / С.П. Бугаев, В.И. Канавец, А.И. Климов и др.- ДАН СССР, 1984, т. 276, № 5, с. 1102-1104.

37. Разрушение релятивистского сильноточного электронного пучка при генерации мощных импульсов электромагнитного излучения / С.П. Бугаев, М.П. Дейчули, В.И. Канавец и др.- Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 3, с. 557-560.

38. Применение релятивистского электронного потока, формируемого катодом со взрывной эмиссией, для получения длительной СВЧ генерации / А.Ф. Александров, С.Ю. Галузо, В.В. Михеев и др.- ЖТФ, 1982, т. 52, № I, с. 110-111.

39. Применение релятивистских электронных пучков для генерации импульсов микроволнового излучения микросекундной длительности / В.А. Бурцев, Н.И. Зайцев, Н.Ф. Ковалев и др.- Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, вып. 23, с. 1435-1438.

40. Генерация сверхмощных импульсов электромагнитного излучения микросекундной длительности / С.П. Бугаев, В.И. Канавец, А.И. Климов и др.- Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 5, с. 994-996.

41. Кислов В.Я. Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронно-волновых системах и автогенераторах с запаздыванием и сильной нелинейностью.- Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 8, с. 1683-1690.

42. Дихтяр В.Б. Структура стохастических колебаний автогенераторов с запаздыванием в режиме сильной связи мод.- Известия вузов. Радиофизика, 1980, т. XXIII, № II, с. 1295-1304.

43. Кислов В.Я. Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронно-волновых системах и автогенераторах с запаздыванием.- В кн.: Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн.У.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1980, с. 78-117.

44. Гондровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы.- М.: Сов. радио, 1977.- 608 с.

45. Дихтяр В.Б. Анализ влияния формы частотной характеристики и усиления на тип колебаний, формируемых автогенераторами с внешней запаздывающей обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 5, с. 969-977.

46. Азьян Ю.М., Мигулин В.В. Об автоколебаниях в системах с задержанной обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1956, т. I, № 4, с. 418-427.

47. Рогашкова А.И.; Дихтяр В.Б., Рогашков С.А. Спектр колебаний в автогенераторе с запаздывающей обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1973, т. 18, № 5, с. 1075-1077.

48. Дихтяр В.Б., Кислов В.Я. Автомуляционный механизм стохастических колебаний автогенераторов с запаздыванием.- Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, № 8, с. 1564-1572.

49. Дихтяр В.Б., Кислов В.Я. Стохастические колебания в резонансных автогенераторах с запаздыванием.- В кн.: Нелиней-

ные волны. Стохастичность и турбулентность: Материалы У Всесоюзной школы по нелинейным волнам. — Горький: Ин-т прикладной физики АН СССР, 1980, с. 37-45.

50. Дихтяр В.Б., Старков С.О. Автостохастизация колебаний в генераторах, описываемых нелинейным разностным уравнением, сводящимся к дифференциальному уравнению второго порядка с запаздывающим аргументом. — Радиотехника и электроника, 1982, т. 27, № 12, с. 2457-2463.

51. Дихтяр В.Б., Кислов В.Я. Расчет колебаний автогенераторов с внешней запаздывающей обратной связью временным методом. — Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 10, с. 2141-2147.

52. Владимиров С.Н. Оптимизация алгоритма численного анализа процессов установления в автогенераторах с внешней запаздывающей обратной связью. — Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 2, с. 381-383.

53. Дихтяр В.Б. Многочастотные колебания в автогенераторах с запаздыванием. — Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 9, с. 1909-1916.

54. Дихтяр В.Б. Стохастические колебания в системе связанных автогенераторов с запаздыванием. — Радиотехника и электроника, 1982, т. 27, № 2, с. 310-320.

55. Анищенко В.С., Летчфорд Т.Е., Сафонова М.А. Разрушение квазипериодического движения за счет удвоений и стохастичность в системе связанных генераторов. — Известия вузов. Радиофизика, 1984, т. XXVII, № 5, с. 565-575.

56. Дмитриев А.С., Кислов В.Я., Спири А.Г. Хаотические колебания в неавтономном генераторе с реактивной нелинейностью. — Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 12, с. 2430-2439.

57. Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Странный аттрактор в неавтономном уравнении Ван-дер-Поля. — Радиотехника и электроника, 1982, т. 27, № 12, с. 2454-2456.

58. Дмитриев А.С. Хаос в автоколебательной системе с внешним гармоническим воздействием. — Известия вузов. Радиофизика, 1983, т. XXVI, № 9, с. 1081-1086.

59. Асташкина Е.В., Михайлов А.С., Толстопятенко А.В. Индуцированная шумом неустойчивость в модели Лоренца. — Известия вузов. Радиофизика, 1981, т. XXIV, № 8, с. 1035-1037.

60. Кравцов Ю.А., Эткин В.С. К вопросу о роли флуктуационных сил в динамике автостохастических систем: ограничение времени предсказуемости и разрушение слабых периодических режимов. — Известия вузов. Радиофизика, 1981, т. XXIV, № 8, с. 992-999.

61. Анищенко В.С., Астахов В.В. Бифуркационные явления в автостохастическом генераторе при внешнем регулярном воздействии. — ЖТФ, 1983, т. 53, вып. II, с. 2165-2170.

62. Кузнецов С.П. О воздействии периодического внешнего возмущения на систему, демонстрирующую переход порядок-хаос через бифуркации удвоения периода. — Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 39, вып. 3, с. 113-116.

63. Апресян Л.А., Кравцов Ю.А., Рабинович М.И. О действии внешнего шума на системы со стохастической динамикой.- Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 3, с. 473-478.

64. Пиковский А.С. Синхронизация и стохастизация ансамбля автогенераторов внешним шумом.- Известия вузов. Радиофизика, 1984, т. XXVI, № 5, с. 576-581.

65. Манькин И.А., Школьников В.Г. К нестационарной нелинейной теории ЛБВ.- Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 9, с. 1918-1926.

66. Манькин И.А., Школьников В.Г. Численное моделирование автоколебаний в системе электронный пучок - прямая электромагнитная волна с внешней обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 2, с. 307-313.

67. Манькин И.А., Школьников В.Г. Импульсные автоколебательные процессы в ЛБВ-генераторе с внешней обратной связью.- Радиотехника и электроника, 1985, т. 30, № 1, с. III-II5.

68. Лазерсон А.Г., Манькин И.А., Школьников В.Г. Теоретический анализ усиления широкополосных импульсов в ЛБВ.- Радиотехника и электроника, 1982, т. 27, № 8, с. 1582-1587.

69. Манькин И.А., Школьников В.Г. Нестационарные процессы при прохождении импульса тока через замедляющую систему.- Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 5, с. 971-974.

70. Ахиезер А.И., Любарский Г.А., Файнберг Я.Б. Об излучении заряженной частицы, движущейся через связанные резонаторы.- ЖТФ, 1955, т. 25, № 14, с. 2526-2534.

71. Логачева В.Д. О параметрических колебаниях последовательности электронных сгустков, движущихся в электропроводе.- ЖТФ, 1982, т. 52, вып. 12, с. 2364-2368.

72. Ломизе Л.Г., Свешникова Н.Н., Кузьмин В.А. Излучение и формирование электромагнитных импульсов в системах с цилиндрической геометрией.- ЖТФ, 1983, т. 53, вып. 12, с. 2297-2306.

73. Ломизе Л.Г., Свешникова Н.Н. Формирование электромагнитного поля при коллективном переходном излучении.- ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 9, с. 1769-1777.

74. Солнцев В.А., Тагер А.С. Возбуждение волноводных систем электронным потоком с заданной модуляцией.- Радиотехника и электроника, 1960, т. 5, № 7, с. III-III1.

75. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля.- М.: ГИФ-МЛ, 1962. - 442 с.

76. Афонин А.М., Канавец В.И., Руднев А.П. Излучение импульсного релятивистского электронного потока в резонансной замедляющей структуре.- Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 3, с. 647-651.

77. Афонин А.М., Канавец В.И. Импульсная генерация СВЧ-колебаний в релятивистском устройстве типа ЛОВ-ЛБВ.- Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 4, с. 741-750.

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 1. Электроника СВЧ

Исаак Абрамович Манькин

Владимир Григорьевич Школьников

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ В СВЧ СИСТЕМАХ

Часть III

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. ГЕНЕРИРОВАНИЕ
СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В ЛБВ

Литературный редактор *А. С. Хенкина*

06075	Подписано к печати 21.08.85.	Формат 60x90/16	
Печать офсетная	Усл.печ.л. 2,7	Уч.-изд.л. 2,2	Тираж 1330 экз.
Заказ № 1424	Цена 44 к.	Индекс 4847	

Издательство ЦНИИ „Электроника“, Москва, 117415