

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 621.385.69:621.376.9

## Параметрическая модуляция сигналов стохастическими колебаниями в ЛБВ с плазменным заполнением

П. В. Боровиков, В. Ю. Григорьев, Ю. А. Кузнецов  
ГУП ВЭИ им. Ленина, Москва, Россия

*Модуляция информационного сигнала стохастическим расширяющим сигналом позволяет создавать широкополосные сигналы и тем самым повышать пропускную способность и помехозащищенность систем передачи информации. Параметрическая модуляция сигнала в усилителе дает возможность сохранять высокую энтропию случайных сигналов при работе передатчиков на максимальных мощностях. В лампе бегущей волны (ЛБВ) с плазменным заполнением пролетного канала замедляющей структуры может быть осуществлена параметрическая модуляция СВЧ-сигнала. В этом случае источником модуляции являются стохастические колебания электронного тока в приборе, имеющие плазменную природу.*

В современных системах передачи информации (связь, локация, радиовещание, телеуправление), как правило, используются широкополосные сигналы. Это обеспечивает высокую скорость передачи информации, электромагнитную совместимость систем, а также позволяет ослабить воздействие помех. Широкополосный сигнал – это сигнал, который занимает полосу рабочих частот  $\Delta f$ , значительно превосходящую ширину полосы частот  $\Delta F$ , необходимую для передачи информации [1]. Сигнал получается путем модуляции электромагнитных колебаний задающего генератора передатчика двумя сигналами: несущим информацией и специальным широкополосным. В дальнейшем первый сигнал будем называть информационным, второй — расширяющим.

В практике систем передачи информации часто используется расширенный сигнал, представляющий собой хаотические колебания [2]. Системы с такими сигналами имеют такие положительные качества, как широкая полоса передачи и, соответственно, перечисленные выше преимущества; конфиденциальность информации и скрытность функционирования систем.

Процесс передачи информации в этих системах сводится к следующему. В передатчике информационный сигнал  $X_i(t)$  с амплитудой  $x_i$  модулируется расширяющим хаотическим сигналом  $X_e(t)$  с амплитудой  $x_e$ . Модулированный сигнал  $X_S(t)$  с амплитудой  $x_S = x_i(x_e + 1)$  поступает на вход приемника. Для выделения информационного сигнала вычисляется корреляционный момент первого порядка  $K_{1i}$  между принятым сигналом  $X_S(t)$  и сигналом  $Y_e(t) = aX_e(t)$ , являющимся с точностью до множителя  $a$  копией расширяющего сигнала  $X_e(t)$ :

$$K_{1i}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T X_S(t) Y_e(t) dt, \quad (1)$$

где  $T$  — длительность сигналов  $X_S(t)$  и  $Y_e(t)$ .

Недостатком подобной системы является необходимость иметь на приемном конце линии передачи копию расширяющего сигнала  $Y_e(t)$  и обеспечивать ее синхронизацию с принимаемым сигналом  $X_S(t)$ . В принципе этот недостаток можно устранить, если вместо сигнала  $Y_e(t)$  использовать принятый сигнал  $X_S(t)$ , сдвинутый по времени на величину  $\tau$ , меньшую времени корреляции этого сигнала. В этом случае вычисляется автокорреляционный момент

$$K_{1i}^*(T, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T X_S(t) X_S(t + \tau) dt. \quad (2)$$

Однако качество выделения информационного сигнала при такой операции значительно ниже, чем при проведении операции (1) [3]. При этом под выделением понимается обнаружение сигнала на фоне остаточных шумов, образующихся при проведении операций (1) или (2), собственных шумов приемника и внешних помех.

### Вычисление автокорреляционных моментов высших порядков для уверенного обнаружения сигнала

Для уверенного обнаружения сигнала разработан новый способ, заключающийся в вычислении моментов порядка  $n$  значительно выше первого ( $n \gg 1$ ) [4]. Проведено исследование эффективно-

сти способа применительно к вычислению автокорреляционного момента порядка  $n$ , т. е. величины

$$K_n^*(T, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [X_S(t) X_S(t + \tau)]^n dt. \quad (3)$$

Исследование выполнено путем математического и смешанного моделирования с применением компьютера. При математическом моделировании информационный сигнал представлялся в виде последовательности чисел  $x_i$ , имитирующих последовательность импульсов с заданными длительностью и периодом следования. Расширяющий сигнал представлялся в виде последовательности случайных чисел  $x_e$  с нормальным распределением, нулевым средним значением и заданной дисперсией  $d$ . Моделирование модуляции, направленной на расширение полосы частот сигнала, выполнено путем вычисления величины  $x_S = x_i(x_e + 1)$ .

При смешанном моделировании информационный сигнал создавался генератором импульсов, расширяющий сигнал — генератором шума. Затем сигналы переводились в цифровую последовательность. В обоих случаях при модуляции полоса частот сигнала расширялась в 50 раз.

Последовательности чисел, имитирующих сигналы, обрабатывались по алгоритму (3). Эффективность обнаружения сигнала определялась по вероятности превышения случайной величиной  $K_{ni}^*(T, \tau)$  заданного порогового уровня. Порог выбирался на основании заданной вероятности превышения его случайной величиной  $K_{ni}^*(T, \tau)$  при отсутствии информационного сигнала, т. е. когда  $X_S(t) = X_e(t)$ . Эта вероятность была задана равной  $10^{-5}$ .

Результаты вычисления вероятности обнаружения информационных сигналов (величины  $F_0$ ) представлены в таблице. При  $n = 1$  результаты соответствуют обработке сигналов по алгоритму (2), при  $n > 1$  — по алгоритму (3).

Сравнивая результаты при  $n = 1$  и  $n \geq 10$ , видим, что вычисление в приемнике автокорреляционных моментов высокого порядка позволяет значительно повысить вероятность обнаружения сигналов. Следовательно, можно отказаться от сложной процедуры вычисления корреляционных моментов (1), но при этом сохранить высокую вероятность обнаружения.

## Параметрическая модуляция усиленного сигнала

Известно, что мощность сигнала, излучаемого передатчиком, должна быть в 2—3 раза меньше его максимальной мощности, определяемой техническими параметрами. Это связано с тем, что при работе передатчика на максимальной мощности происходит сильное сглаживание колебаний сигнала, несущих информацию, и, следовательно, искажение информации. Кроме того, в мощности сигнала начинает преобладать постоянная составляющая, которая не проходит через каскады усиления приемников. Это приводит к уменьшению мощности сигналов на выходе приемников и как следствие — к уменьшению дальности действия, пропускной способности и помехозащищенности систем передачи информации.

Все сказанное в полной мере распространяется и на системы с широкополосным хаотическим сигналом: при работе передатчика на максимальной мощности будет происходить сглаживание флуктуаций сигнала. Приведем результаты моделирования и эксперимента, которые демонстрируют отмеченные выше отрицательные явления, а также способы борьбы с ними.

При моделировании шумовой сигнал  $X(t)$  был представлен в виде последовательности случайных чисел  $x$ , имеющих плотность вероятности  $W(x)$  и среднюю мощность  $P$ . Числа подвергались функциональной обработке, имитирующей прохождение сигнала через усилитель с реальной амплитудной характеристикой вида

$$y = \begin{cases} x, & -qA < x < qA; \\ A(1 - e^{C|x|}), & x \geq qA; \\ -A(1 - e^{C|x|}), & x \leq -qA, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A$  — амплитуда сигнала на выходе усилителя при максимальной мощности;

$q \leq 1$  — отношение амплитуды  $y$ , при которой заканчивается линейный участок характеристики, к максимальной амплитуде;

$$C = \frac{\ln(1 - q)}{qA}.$$

$n$	Математическое моделирование					Смешанное моделирование				
	1	5	10	50	100	1	5	10	50	100
$F_0$	0,01	0,13	0,58	0,86	0,97	0,02	0,15	0,69	0,90	~1

Параметром, характеризующим информационную емкость хаотического сигнала, является его энтропия  $H(X)$  [3]

$$H(X) = - \int_X W(x) \log W(x) dx.$$

Чем выше  $H(X)$ , тем больше информационная емкость системы передачи. Любые факторы, влияющие на величину  $H(X)$ , сказываются на возможности системы передавать информацию с заданной скоростью и точностью. Поэтому при моделировании вычислялись мощность и энтропия сигналов на выходе передатчика и выходе приемника в зависимости от положения рабочей точки на амплитудной характеристике (4), т. е. от мощности сигнала  $p$  на входе усилителя передатчика. Очевидно, чем больше величина  $p$ , тем ближе выходная мощность передатчика  $P_t$  к максимальной.

Исходные данные при моделировании:

плотность вероятности амплитуд шумового сигнала распределена по нормальному закону;

параметры амплитудной характеристики усилителя —  $A = 2, q = 0,7$ ;

в приемнике выполняется квадратурное детектирование сигнала.

При моделировании мощности сигналов на входе передатчика  $p$  на его выходе  $P_t$  и на входе приемника  $P_r$  в условных величинах представлены вторые начальные моменты амплитуды  $x$  (величина  $p$ ) и амплитуды  $y$  (величины  $P_t$  и  $P_r$ ). Энтропии сигналов на выходах передатчика  $H_t$  и приемника  $H_r$  вычислены как первые начальные моменты величин  $\log W(x)$  и  $\log W(y)$  [3]. При моделировании сигнала на выходе приемника из амплитуды  $y$  вычиталась постоянная составляющая (рис. 1).

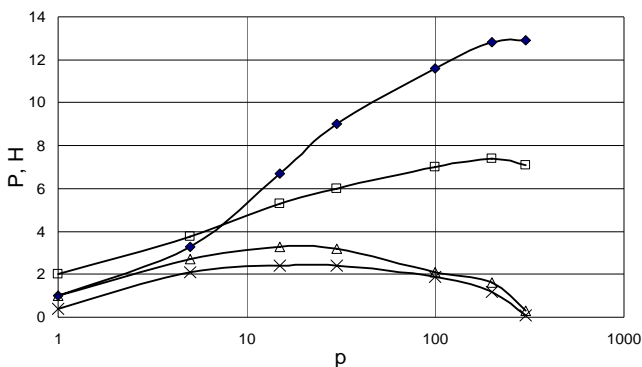


Рис. 1. Результаты математического моделирования: —♦— —  $P_t$ ; —□— —  $H_t$ ; —△— —  $P_r$ ; —×— —  $H_r$

Зависимость  $P_t(p)$  демонстрирует известное положение: увеличение выходной мощности  $P_t$  идет с отставанием от увеличения входной мощности  $p$  и в определенный момент вообще прекращается. С замедлением происходит и рост энтропии выходного сигнала. Но наиболее сильно отрицательные факторы проявляются в приемнике: здесь при условной мощности на входе передатчика более

20 наблюдается заметное снижение переменной составляющей выходной мощности  $P_r$  и энтропии  $H_r$  сигнала.

Устранить эти явления можно только одним путем: необходимо промодулировать сигнал хаотическим процессом непосредственно на выходе передатчика. Для этого следует изменять какой-либо параметр усилителя, влияющий на характеристики сигнала. В радиотехнике этот процесс принято называть параметрической модуляцией.

В целях проверки эффективности такой модуляции проведен эксперимент с твердотельным СВЧ-услителем. В качестве параметра, подверженного хаотическим колебаниям, использовано напряжение питания усилителя. Колебания вызывались с помощью устройства на транзисторе, включенного между источником питания и твердотельным услителем. На базу транзистора подавался случайный сигнал с шириной спектра 200 кГц, который вызывал хаотические колебания питающего напряжения и как следствие — модуляцию выходного сигнала усилителя.

На высокочастотный вход твердотельного усилителя подавался шумовой сигнал с нормальным распределением амплитуд. С выхода усилителя сигнал поступал на приемно-регистрирующее устройство, состоящее из детектора, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и компьютера. Мощность сигнала подбиралась таким образом, чтобы при отсутствии модуляции величины мощностей  $P_t$  и  $P_r$  совпадали с соответствующими величинами при компьютерном моделировании. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Они показывают, что при применении параметрической модуляции шумового сигнала хаотическим процессом исчезает главный недостаток при работе передатчика на максимальной мощности, а именно, уменьшение мощности и энтропии сигнала на выходе приемника, связанное с ограничением флуктуаций в услителе передатчика.

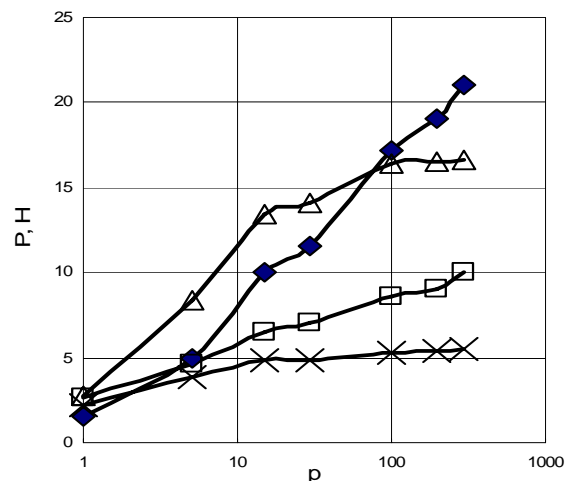


Рис. 2. Результаты экспериментальной проверки эффективности параметрической модуляции сигнала: —♦— —  $P_t$ ; —□— —  $H_t$ ; —△— —  $P_r$ ; —×— —  $H_r$

### Стохастическая модуляция сигнала на выходе ЛБВ с плазменным заполнением пролетного канала

Достаточно просто получить параметрическую модуляцию сигнала в передатчике на базе ЛБВ с плазменным заполнением пролетного канала. В этой системе, получившей название гибридной замедляющей структуры (ЗС), элементом, сильно влияющим на характеристики сигнала, является плазма.

Устройства на основе ЗС такого типа дают возможность достигнуть более высокого КПД и расширенной полосы усиления по сравнению с традиционными вакуумными ЛБВ, одновременно позволяя избежать трудностей, связанных с вводом и выводом СВЧ-излучения, присутствующих в чисто плазменных ЛБВ [5]. Плазма создается в пролетном канале прибора ударной ионизацией рабочего газа электронным пучком, давление газа определяет концентрацию плазмы. Типичная экспериментальная зависимость выходной мощности прибора от давления рабочего газа приведена на рис. 3 [6]. Можно выделить три режима работы прибора:

I — вакуумный режим, влияние плазмы на характеристики прибора незначительно, выходная мощность не зависит от давления рабочего газа;

II — плазменный режим, выходная мощность в узкой области давлений рабочего газа значительно возрастает;

III — режим стадии пучково-плазменного разряда, развала токового импульса, выходная СВЧ-мощность падает до нуля.

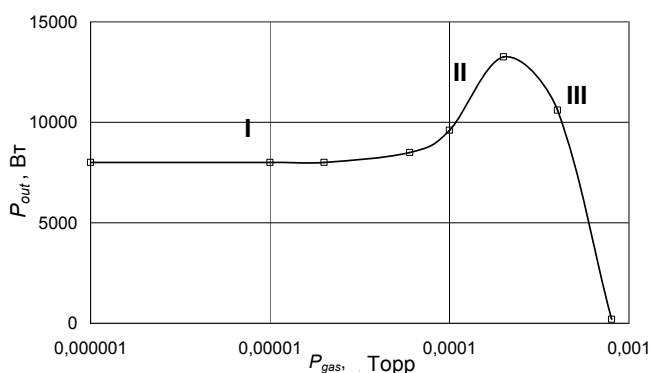


Рис. 3. Экспериментальная зависимость выходной мощности прибора от давления рабочего газа: I—III — режимы работы

Ранее в процессе испытаний макетов таких приборов были обнаружены [7, 8] высокочастотные составляющие в выходном сигнале, коллекторном токе прибора и токе оседания на стенки пролетного канала. Также было установлено сильное возрастание этих колебаний при входе прибора в плазменный режим и еще большее увеличение при развале режима усиления. Поскольку режим усиления прибора при заданных токе и уско-

рящем напряжении пучка определяется исключительно концентрацией плазмы в пролетном канале, очевидна плазменная природа описываемых ВЧ-колебаний.

Таким образом, существует стохастическая модуляция тока электронного пучка, приводящая к параметрической модуляции усиливаемого сигнала, а следовательно, к расширению его полосы и увеличению энтропии. Исследования спектрального состава СВЧ-сигнала на выходе усилителя подтверждают наличие такой модуляции.

### Спектральный состав колебаний тока электронного пучка в плазменной ЛБВ

Для исследования спектрального состава исследуемых сигналов был применен двухканальный цифровой осциллограф. В процессе измерений регистрировались следующие сигналы:

ток коллектора;

ток, вызванный оседанием электронов на аноде и ЗС (в дальнейшем ток оседания);

сигнал огибающей видеосигнала с детекторной головки, подключенной к выходному волноводному тракту прибора.

Поскольку СВЧ-усилитель работал в импульсном режиме, требовалось исключить возможность ударного возбуждения контуров цепей питания. Для этого последовательно с катодом были включены фильтрующий дроссель и балластное сопротивление.

Осциллограммы сигналов (рис. 4) сохранялись в виде последовательности 2000 отсчетов общей длительностью 2 мкс. По полученным данным методом быстрого преобразования Фурье [9] рассчитывались спектры сигналов в полосе 0—500 МГц.

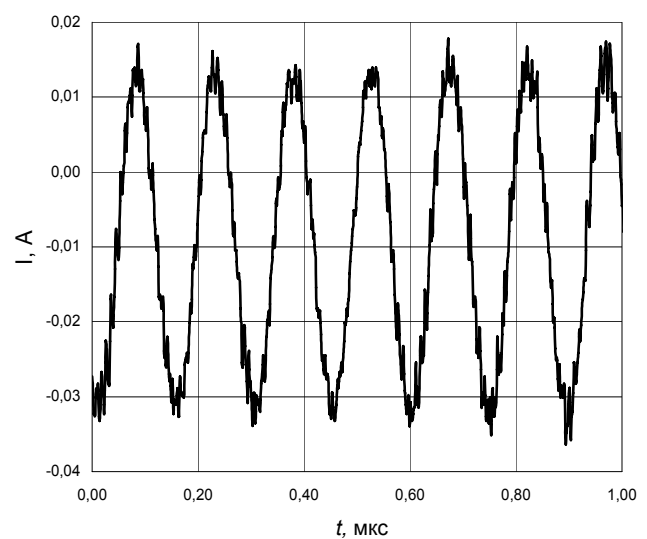


Рис. 4. Участок осциллограммы тока оседания

На рис. 5 приведен спектральный состав колебаний тока оседания и тока коллектора в вакуумном режиме работы. Для простоты картины при

веден участок спектрограммы, верхняя частота 40 МГц, постоянная составляющая удалена. Выше указанной частоты в вакуумном режиме работы прибора колебаний не зарегистрировано. Здесь видны следующие особенности: спектральные плотности тока коллектора и тока оседания содержат одни и те же составляющие; колебания почти гармонические с частотой  $(5916 \pm 2)$  кГц, так как остальные составляющие слабее по сравнению с основной на порядок и более.

На рис. 6, а приведен спектральный состав колебаний в плазменном режиме работы, верхняя частота 20 МГц. Здесь видно появление новых спектральных составляющих, а также значительное увеличение амплитуды колебаний. Также заметно появившееся различие в относительной амплитуде различных колебаний. Высокочастотная часть спектра, показанная на рис. 6, б, теперь также содержит новые составляющие.

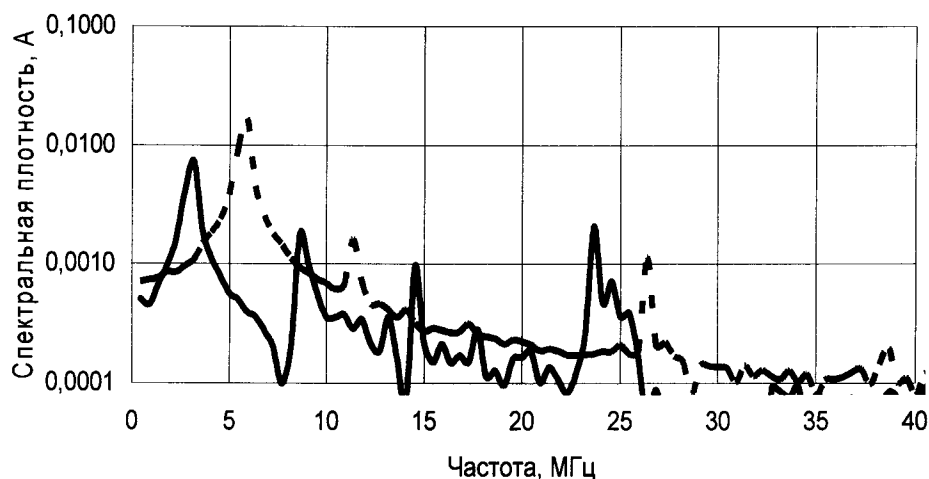
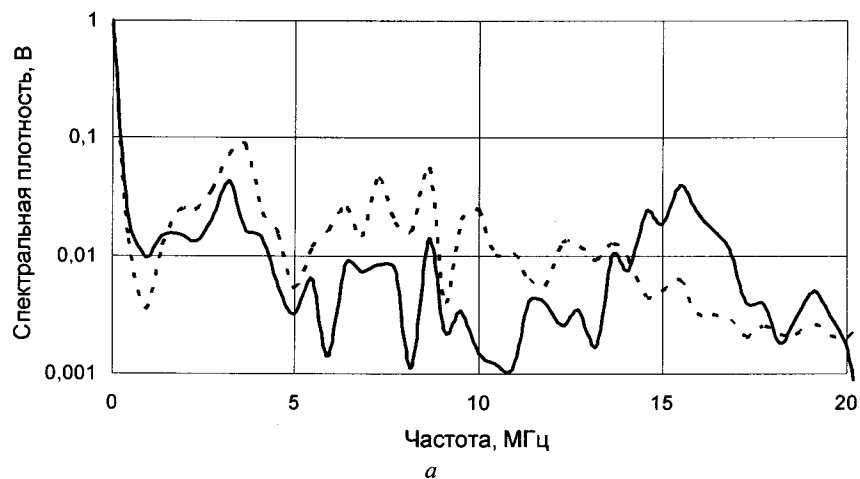
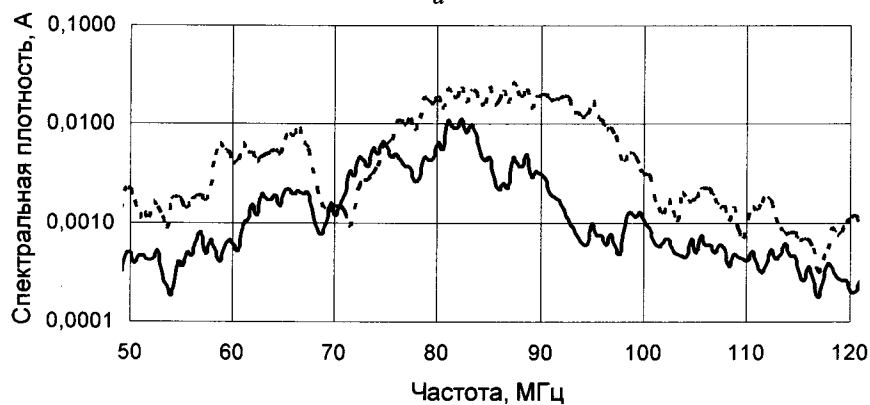


Рис. 5. Спектры колебаний тока коллектора и тока оседания в вакуумном режиме работы прибора: — ток оседания; — ток коллектора



а



б

Рис. 6. Плазменный режим работы прибора: в полосе до 20 МГц (а) и в полосе 50—120 МГц (б): — ток оседания; — ток коллектора

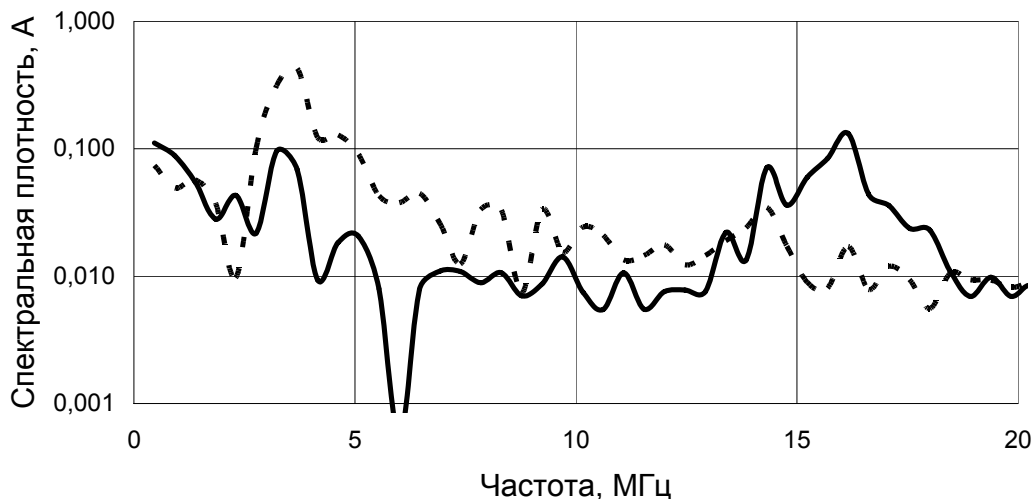
Следует отметить, что различия между указанными режимами работы прибора и, соответственно, переход от изображения на рис. 5 к рис. 6 имеют скачкообразный характер, сопровождающийся значительным увеличением мощности выходного сигнала (см. рис. 3).

При дальнейшем увеличении давления рабочего газа режим усиления нарушается, значительная часть электронного тока оседает на ЗС. Осциллограмма показывает развал токового импульса — амплитуда ВЧ-колебаний становится близкой к его амплитуде. Спектры колебаний сигналов в этом режиме работы прибора приведены на рис. 7, а, б.

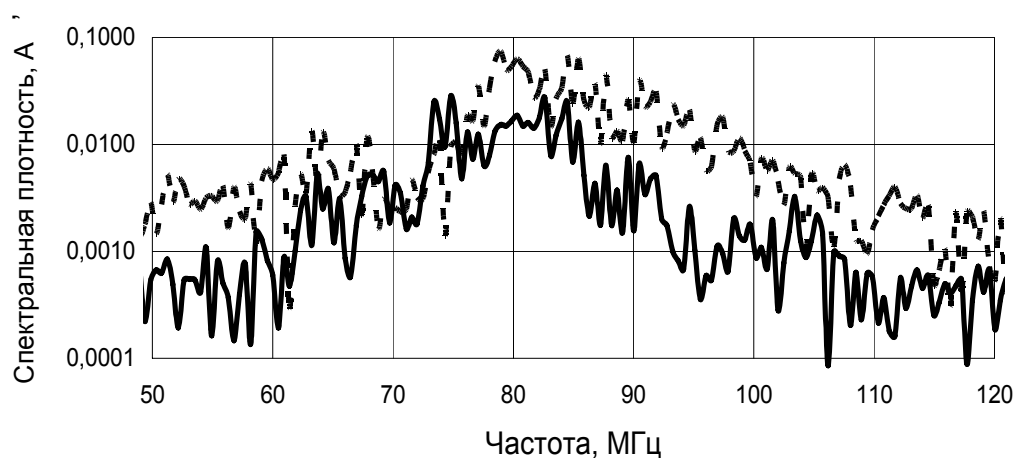
Спектры колебаний протектированного выходного сигнала СВЧ содержат те же самые частоты, что говорит о наличии параметрической модуляции в усилителе. Видны значительные качест-

венные различия спектров рассматриваемых сигналов в трех упомянутых режимах работы прибора. Существует также зависимость амплитуды спектральных составляющих от давления газа в пролетном канале прибора, что позволяет измерять ее косвенным образом.

Амплитуды регистрируемых гармоник зависят от давления газа в приборе, причем наблюдается скачкообразное изменение спектрального состава сигналов наряду с увеличением выходной мощности при переходе прибора в плазменный режим работы. При дальнейшем увеличении плотности плазмы нарастание амплитуды ВЧ-колебаний тока коллектора и постоянной составляющей тока оседания на стенки пролетного канала прибора приводит к развалу токового импульса и нарушению режима усиления.



а



б

Рис. 7. Колебания в режиме развала (а, б):

----- ток оседания; ————— ток коллектора

Конкретные механизмы, ответственные за те или иные колебательные моды, пока еще неизвестны, требуется дальнейшее исследование предмета, включающее в себя проведение аналогичных измерений на приборах другой конструкции, с другими характерными геометрическими размерами.

Спектральный состав плазменных колебаний является подходящим для использования в качестве стохастического модулирующего сигнала для осуществления широкополосной радиосвязи.

### Выводы

В ЛБВ с плазменным заполнением пролетного канала ЗС может быть осуществлена параметрическая модуляция СВЧ-сигнала. В этом случае источником модуляции являются стохастические колебания электронного тока в приборе, имеющие плазменную природу. На характеристики этих колебаний можно влиять изменением давления рабочего газа в приборе.

Параметрическая модуляция позволяет создавать широкополосные сигналы и тем самым повышать пропускную способность и помехозащищенность систем передачи информации, а также сохранять высокую энтропию случайных сигналов

при работе передатчиков на максимальных мощностях.

### Литература

1. Диксон Р. К. Широкополосные системы. — М.: Связь, 1979.
2. Гуляев Ю. В., Беляев Р. В., Воронцов Г. М. и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации//Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 10. С. 1063.
3. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1978.
4. Пат. РФ 2137151. Способ обнаружения радиолокационных сигналов / О. Ю. Кузнецов, Ю. А. Кузнецов; Заяв. 22.10.98.
5. Carmel Y., Antonsen Jr. T. M., Nusinovich G. S., Goebel D. M. Recent progress in the development of plasma-filled TWT's and BWO's//IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P. 693—698.
6. Боровиков П. В. Исследование влияния величины магнитного поля на работу плазменной ЛБВ//Прикладная физика. 2003. № 2. С. 37—41.
7. Neganova L. A., Perevodchikov V. I., Tskai V. N., Zavjalov M. A. Electron beam plasma in the narrow conducting channel//19 ICPIG. — Belgrade, 1989. V. 4. P. 936.
8. Боровиков П. В., Завьялов М. А., Кузнецов Ю. А., Переводчиков В. И. и др. Мощные широкополосные пучково-плазменные усилители СВЧ-колебаний//Прикладная физика. 2001. № 5.
9. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы: Учеб. пособие. — М.: Наука, 1987. С. 170—173.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2007 г.

## Parametric signal modulation by stochastic oscillations using plasma-filled TWTs

*P. V. Borovikov, V. U. Grigoriev, U. A. Kuznetsov*  
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*Modulation of an information signal by a stochastic widening signal allows to create wideband signals increasing thus signal capacity and noise immunity. Parametric signal modulation in an amplifier allows high entropy to be maintained when the amplifier works at full power. TWT with beam propagation channel filled by plasma allows to use parametric modulation of microwave signal. In that case the source of the modulation is the stochastic oscillations of electron beam current that appear a result of beam and plasma interaction.*