

09;10

Хаотизация колебаний в митроне

© Э.В. Кальянов

Институт радиотехники и электроники РАН (Фрязинское отделение)

E-mail: erast@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2004 г.

Рассмотрены предпосылки возможности генерирования хаотических колебаний митроном (магнетроном, настраиваемым напряжением) и приведены результаты эксперимента. Показано, что в митроне возможны хаотические режимы работы, характеризующиеся сценарием перехода к хаосу через бифуркации удвоения периода колебаний.

Митрон, называемый также магнетроном, настраиваемым напряжением (МНН), является эффективным источником сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний, перестраиваемых в широком диапазоне частот [1,2]. В отличие от обычных многокамерных магнетронов митрон имеет широкополосную колебательную систему, в которой пространство взаимодействия образовано встречно-штыревой структурой. При этом ограничена эмиссия электронного потока, что необходимо для обеспечения группировки электронного потока при относительно слабых высокочастотных колебаниях. Ограниченная эмиссия достигается путем вынесения катода за пределы пространства взаимодействия.

Митрон создан как эффективный источник регулярных колебаний с перестройкой частоты в широком диапазоне частот. В отличие от ламп обратной волны *O* типа (ЛОВО) он обладает линейной частотной характеристикой и относительно высоким коэффициентом полезного действия. При этом отношение сигнал/шум достигает 140 dB/Hz. В то же время, как показано в [3,4], в митроне возможно возбуждение электрически перестраиваемого шума, природа которого недостаточно изучена. В связи с широкими исследованиями различных систем с позиций проявления хаотической динамики, в том числе и генераторах СВЧ, например, ЛОВО [5], представляет интерес рассмотрение генерации шума в митроне с позиций динамического хаоса.

В соответствии с [4] при электрически перестраиваемом шуме митрона в его электронной пушке реализуются шумоподобные колебания со средней частотой порядка нескольких МГц, так что в пространство

взаимодействия встраивается модулированный шумом электронный поток. При этом электронная пушка представляет собой, по существу, магнетронный диод (МД) с анодом в форме усеченного конуса.

Многочисленные ранние экспериментальные исследования различных авторов, достаточно подробно описанные в [1,2,6], свидетельствуют о наличии побочных колебаний и большого избыточного шума в классическом МД. В работе [7] описана даже попытка использования МД с анодом в форме усеченного конуса в качестве автоколебательной системы для генерирования шума. В ней, по-видимому впервые, описана возможность генерирования сложных СВЧ-колебаний (предположительно шумовых) с помощью динамической системы. В то же время высказаны предположения о возможности возбуждения вместо шума дискретной сетки частот с интервалом в пределах разрешающей способности волномера: сам факт возможности генерирования шума с помощью динамической системы во времена проведения экспериментов, описанных в работе [7], подвергался сомнению.

Хаотическая динамика МД наглядно проиллюстрирована лишь в 1988 г. в работе [8], в которой в соответствии с достигнутым уровнем понимания генерирования шума как динамического хаоса (после работы Е.Н. Лоренца [9] и др.) приведены фотографии спектров мощности, показывающие процесс перехода к хаосу по сценарию Фейгенбаума.

Митрон, являющийся по существу электронно-лучевым прибором *M* типа, можно условно рассматривать как МД с „зондирующим“ устройством в виде колебательной системы, если за основу взять электронную пушку. В этом случае об относительно низкочастотных колебаниях МД, модулирующих выходные колебания, можно судить по спектру СВЧ-колебаний. Такое „зондирование“ позволяет качественно исследовать структуру колебаний в МД, не вводя возмущающих элементов.

Результаты экспериментальных исследований хаотизации колебаний в митроне дециметрового диапазона длин волн представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1, $a-f$ приведены спектрограммы СВЧ-колебаний на выходе митрона при различных величинах отношения напряжения на управляющем электроде U к его номинальному значению U_0 . На рис. 2 показано изменение частоты относительно ее величины при номинальном значении на управляющем электроде и отношения мощности выходных колебаний к ее максимальной величине при изменении отношения U/U_0 .

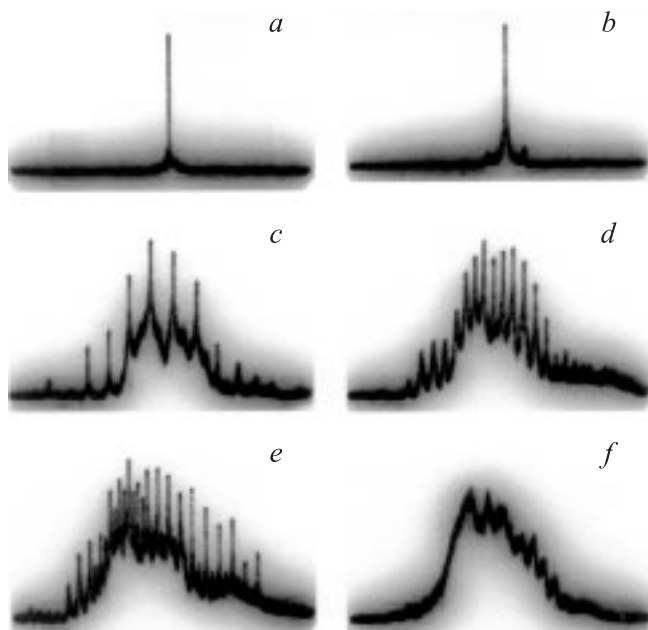


Рис. 1. Спектры колебаний митрона при различных величинах отношения напряжения на управляющем электроде к его номинальному значению. На экране развернуто 20 МГц при различных значениях средней частоты; масштаб по вертикали логарифмический.

Спектрограммы рис. 1 иллюстрируют переход от регулярных колебаний к хаотическим движениям по мере увеличения напряжения управляющего электрода относительно его величины U_0 , соответствующей возбуждению регулярных колебаний на частоте $f_0 = 1232$ МГц (рис. 1, *a*, $U = U_0$). При $U/U_0 = 1.24$ (рис. 1, *b*) проявляется автомодуляция — в спектре появляются слабые боковые составляющие, обусловленные возбуждением колебаний в области электронной пушки. При этом происходит снижение частоты СВЧ-колебаний (рис. 2, кривая *I*), обусловленное электронным смещением. При повышении интенсивности колебаний в области электронной пушки, модулирующих электронный поток, спектр выходных колебаний приобретает вид сетки частот ($U/U_0 = 1.28$, рис. 1, *c*). При этом существует пьедестал, свидетельствующий о „зашумлении“ колебаний, как генерируемых в МД, так и возбуждающихся в пространстве взаимодействия колеба-

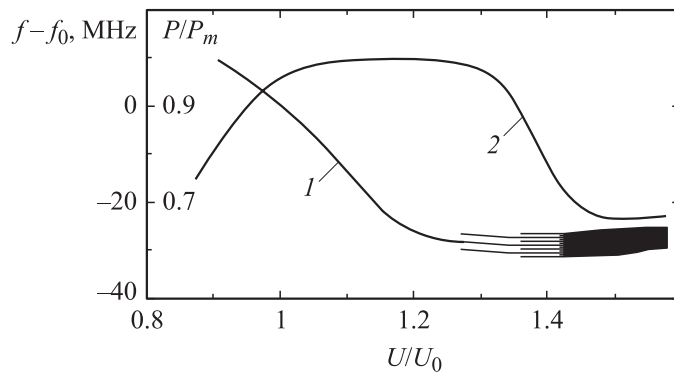


Рис. 2. Изменение частоты относительно ее значения при номинальном режиме работы (кривая 1) и относительное изменение мощности (кривая 2) в зависимости от отношения напряжения на управляющем электроде к его номинальному значению. Кривая изменения частоты при $U/U_0 > 1.28$ качественно отображает изменение спектра колебаний по уровню -10 dB.

тельной системы; мощность колебаний снижается (рис. 2, кривая 2), что свидетельствует об уменьшении эффективности взаимодействия модулированного электронного потока с СВЧ-полем. При $U/U_0 = 1.36$ происходит изменение спектра за счет удвоения периода модулирующих колебаний (рис. 1, *d*), а при $U/U_0 = 1.42$ заметно его изменение за счет начинающегося учетверения их периода (рис. 1, *e*). Дальнейшие бифуркации не видны из-за избыточного шума. После спектра, показанного на рис. 1, *e*, возникает шумоподобный спектр (рис. 1, *f*, $U/U_0 = 1.44$).

Приведенные фото спектров достаточно четко иллюстрируют возникновение хаоса по сценарию Фейгенбаума, хотя и проявляется влияние избыточного шума при движении электронного потока в скрещенных полях. Это является наглядной иллюстрацией возникновения шумоподобных колебаний за счет хаотической динамики. Однако при некоторых напряжениях анода возможны и другие сценарии перехода к хаосу, в частности зашумление колебаний без бифуркаций удвоения периода автомодуляции. Это связано, по-видимому, с большим уровнем избыточных шумов, „смазывающих“ дискретные частоты в спектре при бифуркациях удвоения периода. Такой переход наблюдался в митроне, который исследовался в [4]. Причины избыточных шумов, как известно [1,2,6], разнообразны. Существенное значение в приборах со скрещенными полями имеет эффект обратной бомбардировки.

Проявление хаотической динамики в митронах свидетельствует о возможности ее использования для управления колебаниями в смысле изменения отношения сигнал/шум как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения путем изменения конструктивных элементов, ответственных за возбуждение хаотических колебаний. Поэтому понимание природы шумоподобных колебаний как эффекта динамического хаоса является очень важным при конструировании митронов.

Проведенные исследования показывают, что причиной шумоподобных режимов работы митрона могут являться хаотические колебания, имеющие динамическую природу. Эти колебания генерируются в электронной пушке, являющейся по существу МД с анодом в форме усеченного конуса, и модулируют электронный поток, возбуждающий перестраиваемые СВЧ-колебания. Результаты эксперимента подтверждают также правильность целенаправленной попытки создания в Ленинградском университете генератора шума на основе автоколебательной системы в виде МД [7], предпринятой задолго (как отмечается в [7], в 1952–1953 гг.) до понимания возможности хаотического поведения динамических систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 04–02–16536).

Список литературы

- [1] *Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями* / Пер. с англ. под ред. М.М. Федорова. Т. 2. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 472 с.
- [2] *Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В.* Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1962. 336 с.
- [3] *Thomassen K.I., Dunn D.A.* // *Pros. IEEE*. 1965. V. 53. N 2. P. 202, 203.
- [4] *Кальянов Э.В.* // *РЭ*. 1981. Т. 26. № 4. С. 879–882.
- [5] *Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* // *Письма в ЖЭТФ*. 1979. Т. 29. № 3. С. 180–184.
- [6] *Побочные колебания в электронных приборах СВЧ* / О.В. Бецкий, К.И. Палатов, М.Б. Цейтлин и др.; Под ред. М.Б. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
- [7] *Филиппов М.М.* // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1958. Т. 1. № 3. С. 143–146.
- [8] *Смирнов А.В., Усиченко В.Г.* // *РЭ*. 1988. Т. 33. № 4. С. 883–885.
- [9] *Lorenz E.N.* // *J. Atmos. Sci.* 1963. V. 20. P. 130–141.