

УДК 621.373.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ВЗАИМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И СТОХАСТИЧНОСТИ В СИСТЕМЕ СИЛЬНО СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ СВЧ ДИАПАЗОНА*

Е. П. Бочаров, Г. Н. Коростелев

На примере системы четырех сильно связанных магнетронов, настраиваемых напряжением (МНН), проведена экспериментальная проверка теоретических выводов, полученных в работах [2, 3], относительно взаимосвязи между числом резонансных соотношений автономных частот парциальных автогенераторов и характером режима установившихся автоколебаний. Показано, что с уменьшением числа простых резонансных соотношений система связанных автогенераторов последовательно переходит в состояния, характеризующиеся все более сложным спектром. Наблюдались как периодические (одночастотные и многочастотные), так и стохастические автоколебания. Обсуждаются аргументы в пользу «динамической» природы возникающих в исследованной системе стохастических автоколебаний.

Среди динамических систем, в которых могут существовать стохастические режимы автоколебаний, важное значение как с практической, так и теоретической точки зрения имеют связанные автогенераторы [2, 3]. Как отмечается в [3], в зависимости от вида и величины связи между автогенераторами (или автоколебательными модами), а также от близости частот взаимодействующих мод к кратным могут устанавливаться либо периодические, либо стохастические режимы, которым в первом случае соответствуют предельные циклы, а во втором — так называемые странные аттракторы. Периодические режимы в системах связанных автогенераторов, обусловленные явлениями конкуренции и взаимной синхронизации, изучены достаточно подробно. Это объясняется тем, что взаимная синхронизация используется на практике при сложении мощностей нескольких автогенераторов, причем в этом случае достаточно слабая связь [4, 5]. Что же касается стохастических режимов работы (которые возникают, по-видимому, лишь при достаточно сильной связи), то авторам не известны какие-либо конкретные экспериментальные результаты по этому вопросу, за исключением данных, опубликованных в [6] и относящихся фактически лишь к звуковому диапазону. Заметим, что изучение стохастических автоколебаний в системах связанных автогенераторов представляет интерес не только в чисто радиотехническом аспекте. Так, в [2, 3] отмечается связь этой проблемы с некоторыми моделями возникновения турбулентности.

В настоящей работе исследование явлений взаимной синхронизации и стохастичности в связанных автогенераторах проводится на примере системы связанных магнетронов, настраиваемых напряжением (МНН, митронов).

* Основные результаты работы получены в 1977 году и докладывались на Всесоюзном семинаре «Физические процессы в приборах М-типа, проблемы их теории и машинного проектирования» [1].

1. Исследование режимов монохроматических и многочастотных автоколебаний. Экспериментально исследовалась система четырех сильно связанных МНН, идентичных по своим геометрическим параметрам*. При этом сильная связь между автогенераторами обеспечивается размещением их в общем объемном резонаторе, например тороидальном (такая конструкция была впервые предложена и исследована Е. П. Зотовым). Отметим, что возможность сильной связи между парциальными МНН-автогенераторами облегчается благодаря такому свойству данного типа приборов, как миниатюрность.

Конструкция исследованного прибора позволяла подавать электростатические напряжения на «холодные» катоды парциальных автогенераторов (МНН-модулей) независимо друг от друга. Если при этом учесть, что частота монохроматических автоколебаний, генерируемых МНН, определяется электростатическим напряжением между анодной структурой и «холодным» катодом, то становится ясным, что появляется возможность проанализировать работу данного устройства при различных расстройках частот МНН-модулей.

Предварительное исследование показало, что при автономной работе любого из четырех МНН-модулей осуществляется обычный для данного типа приборов режим настройки частоты монохроматических автоколебаний напряжением почти в октавной полосе частот одного из участков СВЧ диапазона (под автономной работой мы будем подразумевать случай, когда питающие напряжения поданы лишь на один МНН-модуль). Прежде чем перейти к рассмотрению результатов исследования случая совместной работы МНН-модулей, напомним, что, по современным представлениям теории, наличие простых резонансных соотношений между частотами автономных автоколебаний f_i ($i = 1, \dots, n$) увеличивает степень синхронности колебаний парциальных автогенераторов [2]. При этом под простым резонансным соотношением подразумевают существование при некоторых, сравнительно небольших целых числах k_i такого равенства [2]:

$$k_1 f_1 + k_2 f_2 + \dots + k_n f_n = 0. \quad (1)$$

В [2] отмечается, что «чем больше таких простых независимых резонансных соотношений, тем ниже размерность возможного устойчивого тороидального многообразия (в фазовом пространстве — примеч. авт. [2]) и больше степень синхронности колебаний парциальных осцилляторов». Напротив, в случае отсутствия соотношений типа (1) (при малых k_i) и при достаточно сильной связи автогенераторов следует ожидать возникновения стохастических автоколебаний [2, 3]. Экспериментальное исследование МНН подтвердило и уточнило высказанные в [2, 3] положения.

Нетрудно видеть, что наибольшее число соотношений типа (1) при малых k_i будет иметь место при $f_1 = f_2 = f_3 = f_4$. В нашем случае (четыре связанных МНН и равенство f_i) выполняется 6 соотношений типа (1), если положить $k_i = \pm 1$. Экспериментальное исследование показало, что в случае равенства f_i (более точно — при разбросе f_i , составляющем не более 0,5—0,7% среднего арифметического автономных частот модулей) имеет место взаимная синхронизация с образова-

* Каждый из МНН-модулей состоит из замкнутой встречно-штыревой структуры, внутри которой помещен «холодный» катод, и электронной пушки (с помощью последней в пространство взаимодействия с торца инжектируется замкнутый электронный поток). Постоянное магнитное поле направлено по оси прибора, а электрическое напряжение приложено между встречно-штыревой структурой и «холодным» катодом (более подробно конструкция МНН описана, например, в [7]).

нием монохроматического колебания. Фотография спектра этого колебания с экрана спектра-анализатора С4-27 приведена на рис. 1. При исследовании использовался логарифмический масштаб, одно большое деление шкалы частот составляло приблизительно $0,0071\bar{f}$ (\bar{f} — среднее арифметическое автономных частот модулей). Частота установившегося монохроматического автоколебания не совпадает ни с одной из f_i , хотя и близка к ним. Это свидетельствует об отсутствии явлений конкуренции в данной системе (подавления парциальных мод не происходит) и подтверждает сделанный выше вывод о возникновении режима взаимной синхронизации в случае достаточно малого разброса автономных частот МНН-модулей. Явление взаимной синхронизации наблюдалось во всей полосе настройки напряжением МНН-модулей. Для реализации

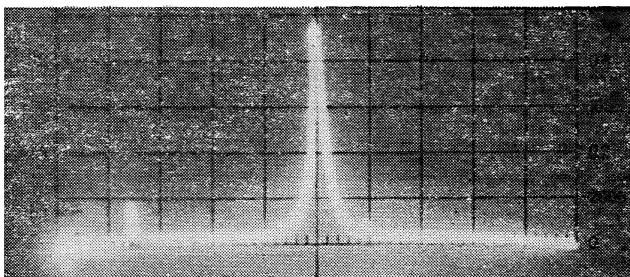


Рис. 1.

режима взаимной синхронизации было достаточно подавать на «холодные» катоды модулей одинаковые электростатические напряжения, поскольку разброс автономных частот в этом случае не превышал 0,3—0,7%. Фактически это означает, что синхронизация может иметь место и в том случае, когда (1) выполнено при $k_i \gg 1$, но при условии, что частоты f_i имеют достаточно малый разброс относительно некоторой совокупности значений, для которой (1) справедливо при $k_i \sim 1$. Отметим также, что относительный уровень шумов амплитудной модуляции в режиме взаимной синхронизации на 5—7 дБ ниже, чем при автономной работе МНН-модуля (теоретическое объяснение этого эффекта, имеющего место во взаимно-синхронизированных системах различной природы, дано в [4]).

Перейдем к рассмотрению случая попарного равенства автономных частот МНН-модулей, т. е. когда $f_1 = f_2$, $f_3 = f_4$. По сравнению с предыдущим случаем число резонансных соотношений типа (1) должно уменьшиться. Так, при $k_i = \pm 1$ имеют место уже не шесть, а четыре соотношения (1). Согласно представлениям, развитым в [2, 3], уменьшение числа соотношений типа (1) может привести к увеличению размерности устойчивого тороидального многообразия в фазовом пространстве, а значит и к усложнению спектра автоколебаний. Это предположение подтвердилось экспериментальными исследованиями, проведенными для случая $f_1 = f_2 = f_A$, $f_3 = f_4 = 1,035 f_A$ (f_A — значение частоты, близкое к центру полосы настройки МНН-модулей). Спектр установившегося колебания соответствует многочастотному режиму (рис. 2), что подтверждается также и исследованием с помощью измерительного приемника. Расстояния между линиями спектра практически одинаковы и несколько превышают величину $(f_{4,3} - f_{1,2})/4$. Отметим, что

на рис. 2 представлен лишь участок спектра. Всего же на экране спектра-анализатора можно было наблюдать не менее 12 линий. По-видимому, данный режим можно объяснить эффектом взаимной модуляции парциальных генераторов.

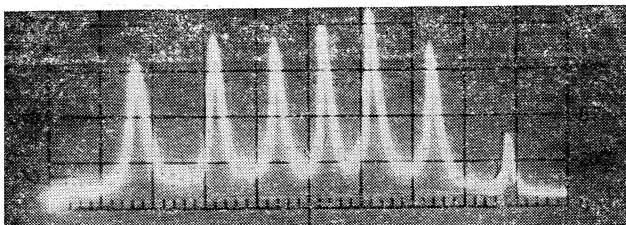


Рис. 2.

2. Исследование стохастических режимов в системе сильно связанных МНН. Выше уже отмечалось, что выполнение соотношений типа (1) лишь при больших k_i может соответствовать возникновению стохастических автоколебаний.

С целью проверки этого положения зададим $f_1 = f_2 = f_A$, $f_3 = 1,035 f_A$, $f_4 = 1,017 f_A$. Соотношение (1) будет выполняться при $k_{1,2} = \pm 1$, $k_3 = \pm 1000$, $k_4 = \pm 1018$, т. е. когда $|k_{3,4}| \gg 1$. Возникшие в этом случае автоколебания характеризуются типичным для стохастических режимов сплошным спектром (рис. 3).

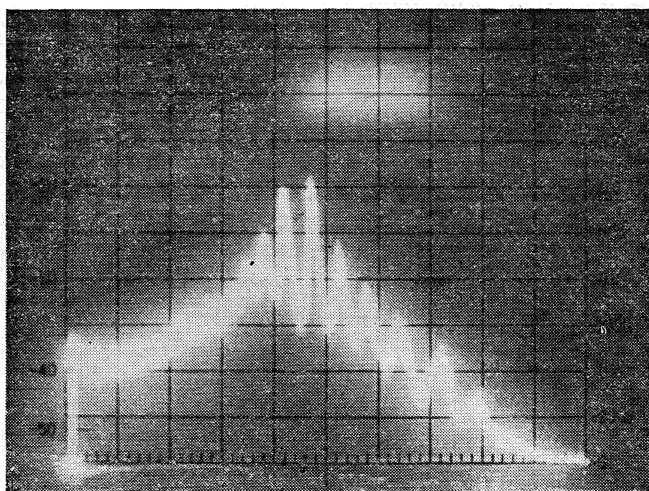


Рис. 3.

Обратим внимание на сильную неравномерность спектра. Заметим, что переход от рассмотренного в п. 2 многочастотного режима к стохастическому осуществлялся путем изменения частоты f_4 , которая определялась напряжением «холодного» катода четвертого МНН-модуля. При этом происходило увеличение числа линий в спектре сигнала, которое предшествовало стохастизации последнего.

Зададим частоты f_i таким образом, чтобы (1) выполнялось при всех $|k_i| \gg 1$, а именно $f_1 = f_A$, $f_2 = 1,009 f_A$, $f_3 = 1,035 f_A$, $f_4 = 1,017 f_A$. При этом $k_1 = \pm 1009$, $k_2 = \pm 1000$, $k_3 = \pm 1000$, $k_4 = \pm 1018$. Как видно из рис. 4, спектр стохастических автоколебаний стал более равномерным по сравнению с предыдущим случаем. О стохастическом характере автоколебаний свидетельствует не только непрерывность спектра,

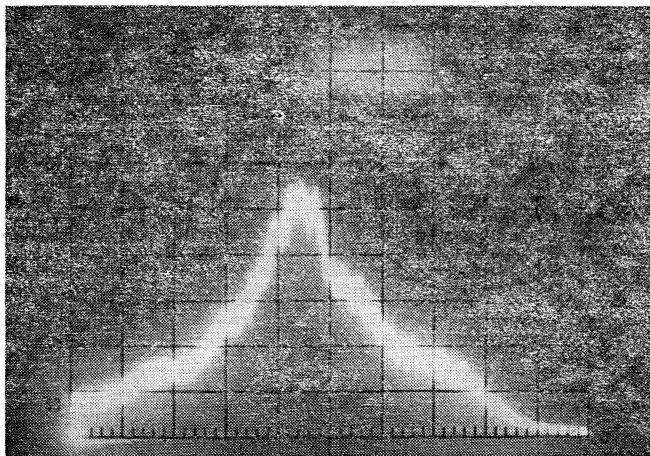


Рис. 4.

но также и близость функции распределения вероятности напряжения сигнала к нормальной. Результаты измерений данной характеристики, проводившихся с помощью стробоскопического осциллографа С7-7 методом дискретных выборок, представлены пунктиром на рис. 5 (сплошная кривая соответствует нормальному распределению, $W(U/\sigma)$ — вероятность того, что напряжение сигнала U примет значение из интервала $[-\infty, U]$, σ — среднеквадратичное значение напряжения сигнала).

Наблюдаемый стохастический режим является автоколебательным, т. е. обусловлен не усилением флуктуаций, а собственной сложной динамикой связанных МНН-модулей. Это подтверждается следующими фактами [8]:

а) ВЧ мощность в стохастическом режиме того же порядка, что и в режиме взаимной синхронизации (примерно 10 Вт и 30 Вт соответственно)*.

б) Стохастические автоколебания чувствительны к действию внешнего синхронизирующего сигнала. Небольшой по мощности внешний монохроматический сигнал переводил систему связанных МНН из стохастического режима в периодический.

Экспериментальные исследования показали, что стохастические автоколебания могут возникать в рассматриваемой системе при различных сочетаниях частот автономных колебаний f_i . Для этого необходимо, чтобы соотношение (1) выполнялось лишь при $|k_i| \gg 1$ ($i = 1, \dots, 4$)

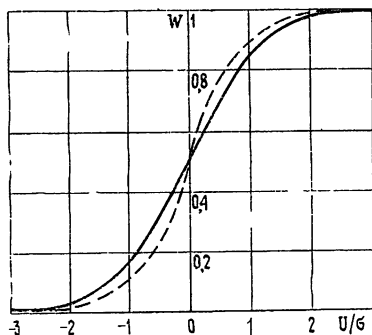


Рис. 5.

* Режиму стохастических автоколебаний в рассматриваемом случае соответствует КПД 25% (КПД режима взаимной синхронизации составляет 40%).

и, кроме того, частоты f_i должны достаточно заметно отличаться от любой совокупности значений, для которой справедливы простые резонансные соотношения (1).

При включении только двух модулей стохастических режимов не наблюдалось. Стохастические автоколебания, возникающие при включении трех модулей, характеризуются значительно более неравномерным спектром по сравнению со случаем, когда работают все четыре модуля. Характер бифуркаций, предшествующих стохастизации спектра трехмодульного МНН, существенно не отличается от случая четырех модулей, описанного выше.

В заключение авторы выражают признательность Д. И. Трубецкову за внимание к этой работе и С. П. Кузнецову за обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров Е. П., Коростелев Г. Н. Тезисы докладов Всесоюзного семинара — Л., 1979, с. 45.
2. Бутенин Н. В., Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Введение в теорию нелинейных колебаний — М.: Наука, 1976.
3. Рабинович М. И. — УФН, 1978, 125, вып. 1, с. 123.
4. Дворников А. А., Уткин Г. М. — Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 3, с. 550.
5. Фомин Н. Н. Синхронизированные полупроводниковые генераторы в аппаратуре СВЧ — М.: Связь, 1979.
6. Gollub J. P., Brunner T. O., Danley B. G. — Science, 1978, 200, p. 48.
7. Уилбур, Питерс — В сб.: Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями — М.: ИЛ, 1961, 2, с. 45.
8. Безручко Б. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. — Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, вып. 3, с. 180.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию
9 июня 1980 г.

INVESTIGATION OF MUTUAL SYNCHRONIZATION AND STOCHASTICITY PHENOMENA IN A SYSTEM OF STRONGLY COUPLED AUTOGENERATORS IN HFV WAVE RANGE

E. P. Bocharov, G. N. Korostelev

By an example of a system of four strongly coupled voltage tunable magnetrons (VTM) an experimental test of theoretical conclusions has been made. These conclusions have been obtained in papers [2, 3] relative to interrelation between the number of resonance relation of autonomous frequencies of partial autogenerators and the character of the regime of steady-state autooscillations. It is shown that with the decrease of the number of simple resonance relations the system of coupled autogenerators is successively transforms to a state which is characterized by a more complicated spectrum. Both periodic (one-frequency and multi-frequency) and stochastic autooscillations have been observed. Arguments are discussed in favour of the «dynamic» nature of stochastic autooscillations occurred in the investigated system.
