

между фольгами. Полная энергия генерации для приведенных распределений составила 100 и 150 Дж соответственно для напряжений 80 и 100 кВ. При работе на одной смеси наблюдалось уменьшение выходной энергии от выстрела к выстрелу. Более сильная деградация энергии генерации наблюдалась в областях с максимальными уровнями накачки. Так, через 10 выстрелов выходная энергия уменьшалась на 25%. Расходимость лазерного излучения составляла 5 мрад. Дальнейшая оптимизация параметров установки позволит улучшить выходные параметры лазера, а анализ полученных результатов позволит получить более полную информацию о возможностях *Хелл* лазера, возбуждаемого электронным пучком.

Л и т е р а т у р а

- [1] G o l d h a r J. et al. "Conf. OSA/IEEE Lasers and Electro-Opt.", Anaheim, Calif. Dig Techn. Pap, Washington, D.C., 134, 1984.
- [2] E d w a r d s C.B. et al. Excimer Lasers. Meet. OSA. Lake Tahoe, Nev., 1983. New York, 59, 1983.
- [3] Б а р а н о в В.Ю., В е л и х о в Е.П., Г а й д а л е н к о Д.В. и др. - Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, с. 201.
- [4] R o s o s h a L o u i s A. et al. Laser and Part. Beams, 1986, N 1, p. 55.
- [5] Б ы ч к о в Ю.И., И в а н о в Н.Г., Л о с е в В.Ф. и др. - Квантовая электроника, 1987, т. 14, № 5, с. 953.

Институт сильноточной
электроники СО АН СССР,
Томск

Поступило в Редакцию
22 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 6

26 марта 1988 г.

ЭФФЕКТ ЗАХВАТА БАЗОВОЙ ЧАСТОТЫ ХАОТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ СИНХРОНИЗАЦИЯ СТРАННЫХ АТТРАКТОРОВ

В.С. А н и щ е н к о, Д.Э. П о с т н о в

1. Последние годы широко обсуждается интересное явление синхронизации хаотических колебаний [1-4, 6]. При этом, однако, отсутствует единство в определении самой сути эффекта. В [1] синхронизация отождествляется с фактом регуляризации колебаний при действии периодической внешней силы. Авторы [2, 3] трактуют хаотическую синхронизацию как явление стабилизации фрактальной размерности и физических характеристик сложных колебаний. В работе [4] это явление по сути дела отождествляется с увеличением степени симметризации типов автоколебаний в связанных генерато-

рах. При этом молчаливо игнорируется вопрос о связи обсуждаемых явлений с эффектом захвата частоты, т.е. с классическим определением синхронизации [5]. Условие захвата частоты в математической постановке вопроса отвечает резонансу на двумерном торе с фиксированным рациональным числом вращения, что и обеспечивает „слежение” частоты колебаний генератора за частотой воздействующего сигнала в области синхронизации.

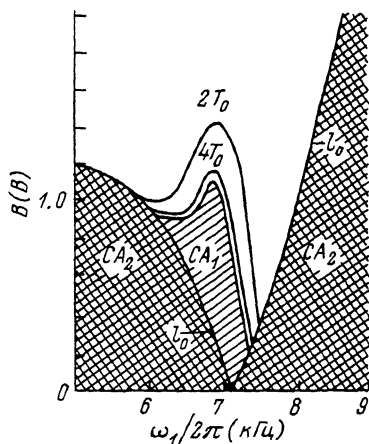
Возникает вопрос, связано ли (и если да, то каким образом?) явление хаотической синхронизации с классическим эффектом захвата частоты, имеющим место в нелинейных системах при взаимодействии периодических сигналов. В настоящей заметке на поставленный вопрос обоснованно дается положительный ответ.

2. Для описания сути обсуждаемого эффекта рассмотрим конкретный пример странного аттрактора, возникающего в дифференциальных системах с сжимающимся трехмерным фазовым объемом в результате каскада субгармонических бифуркаций (аттрактор Фейгенбаума—Смейла). В отличие от модельных отображений с фиксированием базовой частоты дискретностью времени в нелинейных дифференциальных системах с ростом неравновесности частоты субгармонических колебаний в интервалах между точками бифуркаций плавно изменяются [6]. Однако в сплошном спектре сформировавшегося режима стохастических колебаний всегда присутствует выброс на некоторой базовой частоте ω_0 , близкой к частоте исходного предельного цикла, претерпевшего серию удвоений. В зависимости от структуры аттрактора в спектре присутствуют выбросы на субгармониках, из которых максимум интенсивности имеют частоты $\omega_0 \pm \omega_0/2$. Что будет, если на режим странного аттрактора подействовать регулярным внешним сигналом частоты $\omega_1 \approx \omega_0$? Оказывается, что в некоторой области значений параметров наблюдается эффект захвата базовой частоты хаотических колебаний ω_0 , которая „подстраивается” к ω_1 . Спектр странного аттрактора смещается так, что $\omega_0 = \omega_1$, и в области захвата мы наблюдаем явление синхронизации стохастичности в указанном смысле.

Рассмотрим результаты физических экспериментов. На рис. 1 дана диаграмма, отражающая совокупность бифуркационных явлений при действии периодических колебаний частоты $\omega_1 \approx \omega_0$ на режим динамической стохастичности фейгенбаумовского типа, реализованный в генераторе с инерционной нелинейностью [6]. Спектр хаотических автоколебаний в заштрихованной области CA_1 на рис. 1 „следит” за частотой внешней силы, причем частота основного выброса (базовая частота аттрактора ω_0) в этой зоне строго равна частоте воздействия ω_1 . Выход в области CA_2 через бифуркационные линии $\bar{\omega}_0$ приводит к рассинхронизации и установлению режимов „тор-хаоса” с иной структурой аттрактора. Описанное явление естественно назвать синхронизацией стохастических автоколебаний внешним периодическим сигналом.

3. Явление захвата частоты наблюдается и в более общем случае взаимодействия двух аттракторов идентичной структуры с близкими базовыми частотами $\omega_1 = \omega_2 + \delta$. Взаимодействие обеспечива-

Рис. 1. Диаграмма режимов на плоскости параметров „амплитуда–частота“ при периодическом воздействии сигналом $B \sin(\omega, t + \varphi_0)$ на генератор с инерционной нелинейностью в режиме стохастичности. CA_1 – область синхронизации хаотических автоколебаний; CA_2 – области тор–хаоса; $2T_0, 4T_0$ – области синхронизации в субгармонических режимах.



ется путем введения симметричной связи между двумя генераторами стохастических автоколебаний с различными базовыми частотами. Конкретный тип связи с точки зрения сути рассматриваемого явления не принципиален.

Результаты экспериментальных исследований отражены на рис. 2. Видно, что, начиная с некоторого порогового уровня связи, реализуется режим стохастичности, отвечающий сложному в целом процессу хаотической синхронизации (переход через бифуркационную линию l_0 в область CA_1). До значений критического уровня связи в системе связанных генераторов наблюдается режим CA_2 сложного взаимодействия аттракторов. Структура странного аттрактора здесь принципиально отлична от реализующейся в парциальных генераторах при нулевой связи и характеризует режим несинхронизованного тор–хаоса. С увеличением степени связи и превышением ею некоторого критического значения (переход через линию l_0 на рис. 2) осуществляется жесткий эффект захвата частоты. Устанавливается режим хаоса с типичным спектром парциального фейгенбаумовского аттрактора. Базовая частота ω_0 автоколебаний в области захвата CA_1 слабо зависит от связи и близка к значению $\omega_0 \approx \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$. С ростом степени связи режим синхронизованного хаоса в области CA_1 мягко эволюционирует от асимметричного к практически симметричному [4, 7]. Об этом свидетельствует вид проекций фазовой траектории на плоскость $x_1 x_2$, которая с увеличением связи локализуется вблизи биссектрисы.

Описанное явление естественно назвать взаимной синхронизацией хаотических автоколебаний, обусловленной взаимодействием странных аттракторов одной структуры, но с различными базовыми частотами.

4. Из сравнения бифуркационных диаграмм рис. 1 и 2 видно, что эффекту хаотической синхронизации в обоих случаях отвечает жесткий переход в хаосе через бифуркационную линию l_0 в область захвата частоты. По смыслу эта бифуркация качественно аналогична седло–узловой бифуркации резонансных циклов на торе, характеризующей классический эффект синхронизации периодических колеба-

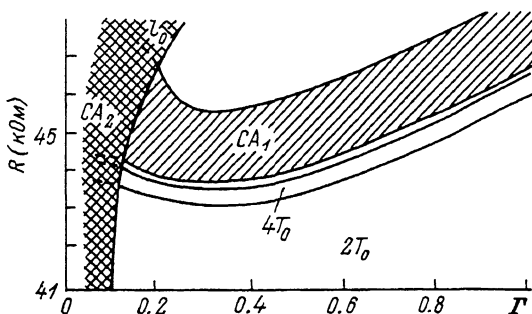


Рис. 2. Диаграмма режимов на плоскости параметров „превышение над порогом генерации—связь” в системе двух симметрично связанных генераторов в режиме стохастических автоколебаний. Γ — коэффициент связи. Обозначения идентичны рис. 1.

ний. Отметим, что впервые указанная бифуркация хаотических аттракторов была описана в [8], однако не обсуждалась с точки зрения ее взаимосвязи с явлением синхронизации.

Эффект захвата базовых частот автоколебаний в режимах стохастичности, рассмотренный здесь на примере аттракторов фейгенбаумовского типа, реализуется и в более сложных случаях. Например, при внешнем воздействии сигналом третьей частоты на режим торхаоса с двумя базовыми независимыми частотами в [9] отмечались качественно аналогичные процессы синхронизации. Можно утверждать, что эффект синхронизации хаотических автоколебаний, проявляющийся в захвате базовых частот при их нелинейном взаимодействии, является общим по крайней мере для режимов малой надкритичности, когда легко выделить характерные базовые частоты в спектре.

Авторы благодарны Т.Е. Летчфорд за обсуждение результатов и ряд полезных замечаний.

Л и т е р а т у р а

- [1] Дудник Е.Н., Кузнецов Ю.И., Минакова И.И., Романовский Ю.М. — Препринт № 3, МГУ, 1983.
- [2] Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И., Старобинец И.М. — Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 39, в. 12, с. 561–563.
- [3] Анищенко В.С., Постнов Д.Э., Сафонов М.А. — Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 24, с. 1505–1509.
- [4] Афраимович В.С., Веричев Н.Н., Рабинович М.И. — Изв. вузов, Радиофизика, 1986, т. 29, № 9, с. 1050–1060.

- [5] М а н д е л ь ш т а м Л.И., П а п а л е к с и Н.Д. С о б р а н и е т р у д о в Л.И. М а н д е л ь ш т а м а , т . 2 . М . : И з д . А Н С С С Р , 1947.
- [6] А н и ш е н к о В.С. С т о х а с т и ч е с к и е к о л е б а н и я в р а д и о ф и з и ч е с к и х с и с т е м а х . - И з д . С а р а т о в с к о г о у н - т а , 1986, Ч а с т ь 2 .
- [7] А н и ш е н к о В.С., Л е т ч ф о р д Т.Е., С а ф о н о в а М.А. - И з в . в у з о в , Р а д и о ф и з и к а , 1984, т . 27, № 5, с . 565-575.
- [8] А н и ш е н к о В.С., Л е т ч ф о р д Т.Е., С а ф о н о в а М.А. - И з в . в у з о в , Р а д и о ф и з и к а , 1985, т . 28, № 9, с . 1112-1125.
- [9] А н и ш е н к о В.С., Л е т ч ф о р д Т.Е., С а ф о н о в а М.А. - П и с ь м а в Ж Т Ф , 1985, т . 11, в . 9, с . 536-541.

Саратовский госуниверситет
им. Н.Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию
24 декабря 1988 г.