

## ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СХЕМЕ ТРЕХ КАСКАДНО СВЯЗАННЫХ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ

*К.Г. Мишагин, В.В. Матросов, В.Д. Шалфеев, В.В. Шохнин*

Представлены результаты экспериментального исследования хаотической динамики ансамбля трех каскадно связанных фазовых систем. Продемонстрирована возможность управления динамическими режимами путем изменения параметров связи без изменения внутренних параметров элементов. Представлены спектральные и корреляционные свойства различных хаотических режимов. Показано, что генерация хаотически модулированных колебаний возможна в широких и однородных областях параметров.

Известно, что хаотические сигналы, генерируемые в радиотехнических системах, могут обладать свойствами шумоподобных сигналов (широким спектром, резко спадающей автокорреляционной функцией). Благодаря таким свойствам они представляют большой интерес с точки зрения использования в качестве несущих в системах связи и радиолокации [1, 2]. В настоящее время проблема прикладного использования динамического хаоса переходит из области научных исследований в область конкретных инженерных разработок. Одной из важных задач в данном направлении остается создание эффективных генераторов хаотических колебаний сверхвысокочастотного диапазона.

В работах [3, 4] было предложено использование сигналов с хаотической угловой модуляцией, генерируемых в фазовых системах (системах фазовой автоподстройки частоты [5]), для передачи информации. В [13] показано, что такие сигналы являются широкополосными. Известно, что системы фазовой автоподстройки используются для синхронизации генераторов различных частотных диапазонов, включая сверхвысокочастотный диапазон, таким образом, представляется возможным использование хаотических режимов в таких системах для генерации широкополосных сверхвысокочастотных сигналов. Отметим, что хаотические колебания в фазовых системах можно разделить на два типа: квазисинхронные хаотические колебания или хаотически модулированные колебания (средняя частота таких колебаний стабилизирована относительно частоты опорного сигнала) и хаотические биения. Хаотически модулированные колебания интересны с точки зрения реализации схем передачи информации, основанных на эффекте хаотической синхронизации [1, 3, 4]. Возможность осуществления надежной синхронизации таких колебаний в случае неидентичных принимающей и передающей систем была показана в [3, 4] с помощью численного моделирования.

Известно, что генерация хаотических колебаний возможна в одиночной фазовой системе с фильтром второго (либо более высокого) порядка, однако области параметров системы, внутри которых осуществляется генерация хаотически модулированных колебаний, крайне малы [6, 7]. В работах [3, 4, 8–13] было показано, что ансамбли каскадно связанных фазовых систем позволяют генерировать хаотически модулированные колебания в широких областях параметров. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования ансамбля трех каскадно связанных фазовых систем. Теоретическое исследование [9 – 12] показало, что такой ансамбль позволяет генерировать хаотические колебания в более широких и, что особенно важно, более «однородных» [7, 12] областях параметров по сравнению с ансамблем двух каскадно связанных фазовых систем [3, 4, 13]. Экспериментальная установка, описанная ниже, реализована на базе генераторов, работающих в диапазоне от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц.

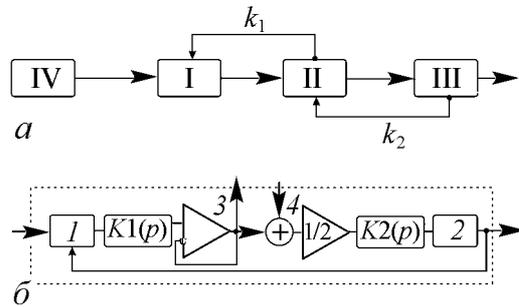


Рис. 1. Ансамбль трех каскадно связанных фазовых систем (а) и внутренняя структура фазовой системы (б)

IV – генератор опорных колебаний;  $k_1, k_2$  – величины обратной связи ( $0 \leq k_{1,2} \leq 1$ ). Все фазовые системы имеют одинаковую структуру, которая показана на рис. 1, б: 1 – фазовый дискриминатор, реализующий операцию булевой алгебры ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; 2 – генератор, управляемый напряжением;  $K1(p), K2(p)$  – коэффициенты передачи фильтров низких частот первого порядка ( $p = d/dt$ ); 3, 4 обозначают точки выхода и входа сигналов, соответственно, для организации обратной связи между кольцами управления фазовых систем. Коэффициенты передачи фильтров имеют вид:  $K1, 2(p) = 1/(1 + T_{1,2}p)$ , где  $T_{1,2}$  – постоянные времени фильтров. Параметры первого фильтра во всех системах одинаковы и являются фиксированными:  $T_1 = 14.9$  мкс. Полосы удержания режима синхронизации в фазовых системах (максимальные отклонения начальных частот управляемых генераторов от частот опорного колебания, когда возможна синхронизация):  $\Delta f_1 \approx \Delta f_2 \approx \Delta f_3 \approx 15$  кГц. В ходе эксперимента варьировались постоянные времени второго фильтра  $T_2$  в фазовых системах, коэффициенты связи  $k_1, k_2$ , начальные частоты управляемых напряжением генераторов  $f_1, f_2, f_3$  и частота опорных колебаний  $f_0$ .

Общий коэффициент передачи двух фильтров в кольце управления фазовых систем  $K(p) = K1(p)K2(p) = 1/(1 + (T_1 + T_2)p + T_1T_2p^2)$  соответствует фильтру второго порядка, однако в рассматриваемой области параметров каждая фазовая система в отдельности обладает исключительно регулярной динамикой. В изолированной фазовой системе возможен либо синхронный, либо квазисинхронный регулярный режим, либо режим биений в зависимости от параметров фильтра и начальной

частотной расстройке. Коллективная динамика трех каскадно связанных фазовых систем качественно отличается от динамики одной системы. В ансамбле возможны различные регулярные и хаотические режимы, которые в соответствии с [9–12] будем классифицировать следующим образом. Присвоим каждому режиму три индекса  $[i_1, i_2, i_3]$ . Индекс  $i_j$  принимает значение 0, если  $j$ -я фазовая система находится в синхронном или квазисинхронном режиме (фазовый сдвиг в данной системе фиксирован или изменяется в ограниченных пределах), и равен 1, если  $j$ -я фазовая система находится в режиме биений (фазовый сдвиг неограниченно нарастает или убывает).

В отсутствие обратных связей ( $k_1, k_2 = 0$ ) первая и вторая фазовые системы находятся в синхронном режиме, а третья система находится в квазисинхронном режиме. Введение обратной связи от третьей фазовой системы ко второй приводит к возникновению колебаний в цепи управления второй фазовой системы, которые становятся хаотическими при достаточно малом значении параметра связи  $k_2$  [13]. Введение малой обратной связи от второй системы к первой приводит к хаотической модуляции в первой фазовой системе. Управляя величинами связей, можно не только добиться возбуждения хаотических колебаний в ансамбле, но и целенаправленно переходить от одного хаотического режима к другому, не меняя параметров самих элементов. На рис. 2 представлены проекции фазовых портретов, спектры и автокорреляционные функции хаотических колебаний в первой фазовой системе для различных значений коэффициентов связи  $k_1, k_2$ . Результаты получены при следующих значениях параметров:  $f_0 = 65.7$  кГц,  $f_1 = 66$  кГц,  $f_2 = 67.4$  кГц,  $f_3 = 59.6$  кГц, постоянные времени второго фильтра во второй и третьей системе  $T_2 = 165$  мкс, в первой системе  $T_2 = 66$  мкс. Проекция фазовых портретов на рис. 2 демонстрируют, что увеличение коэффициентов обратной связи приводит к увеличению амплитуды и к усложнению хаотических колебаний в кольце управления первой фазовой системы. В данном примере показано, что последовательное увеличение коэффициентов обратной связи позволяет перейти от режима  $[0,0,1]$  к режиму  $[0,1,1]$  и далее к режиму  $[1,1,1]$ . При переходе от режима  $[0,0,1]$  к режиму  $[0,1,1]$  уменьшается время корреляции хаотических колебаний в кольце управления первой фазовой системы и происходит расширение спектра, хотя качественно спектр выглядит так же: имеет место яркий пик, свидетельствующий о том, что частота хаотически модулированного сигнала стабилизирована относительно частоты опорного сигнала (рис. 2, а, б). Существенное изменение спектра происходит при смене квазисинхронного хаотического режима в первой фазовой системе на режим хаотических биений (рис. 2, в), тогда спектр становится значительно более равномерным и широкополосным. Время корреляции хаотических колебаний в кольце управления первой системы в режиме хаотических биений уменьшается в сравнении с квазисинхронным хаотическим режимом. Отметим, что для представленного режима хаотических биений в первой системе движение фазовой траектории в проекции на соответствующие переменные является смешанным и объединяет в себе колебательное и вращательное движение (см. рис. 2, в). Благодаря этому движение является довольно сложным, с малым временем корреляции, и спектр выходного сигнала широкий и равномерный. Таким образом, квазисинхронные хаотические колебания и колебания, соответствующие режиму хаотических биений, обладают разными свойствами, и если в первом случае хаотические колебания в большей степени интересны с точки зрения возможности

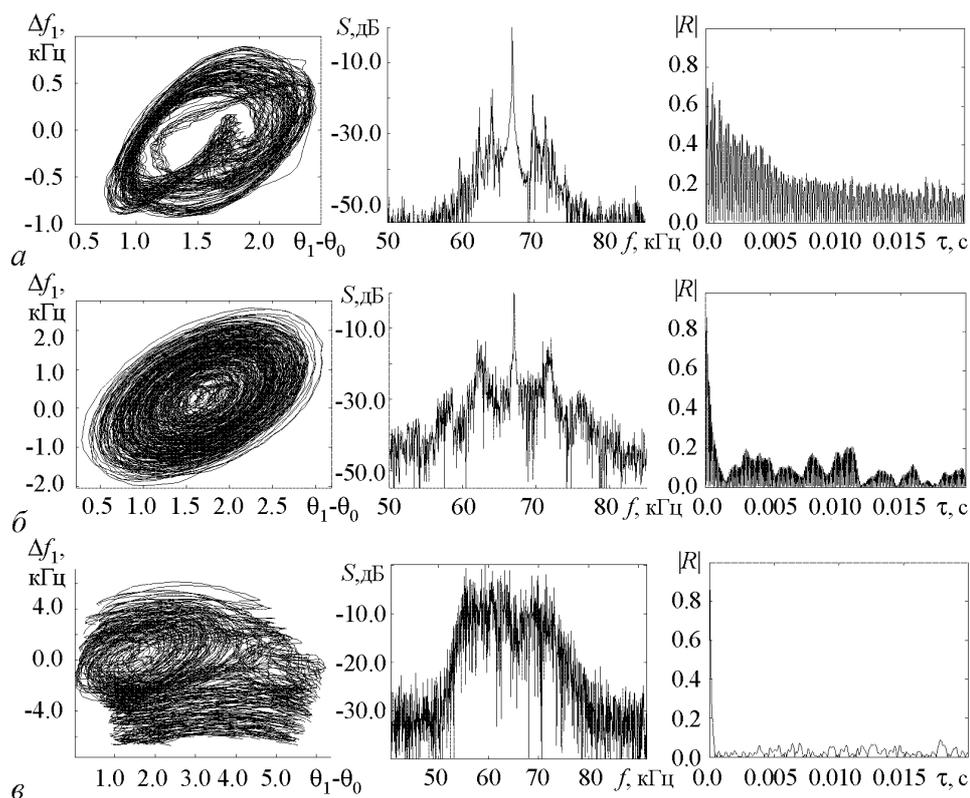


Рис. 2. Проекция фазовых портретов, характеризующие состояние первой фазовой системы ( $\theta_0$  – фаза опорных колебаний,  $\theta_1$  – фаза колебаний на выходе первой фазовой системы,  $\Delta f_1$  – отклонение мгновенной частоты колебаний на выходе первой фазовой системы от начальной частоты  $f_1$ ), спектры колебаний на выходе первой фазовой системы и автокорреляционные функции хаотических колебаний на выходе второго фильтра в кольце управления первой фазовой системы; *a* – режим  $[0,0,1]$ ,  $k_1 = k_2 = 0.2$ ; *b* – режим  $[0,1,1]$ ,  $k_1 = 0.2$ ,  $k_2 = 1.0$ ; *v* – режим  $[1,1,1]$ ,  $k_1 = k_2 = 1.0$

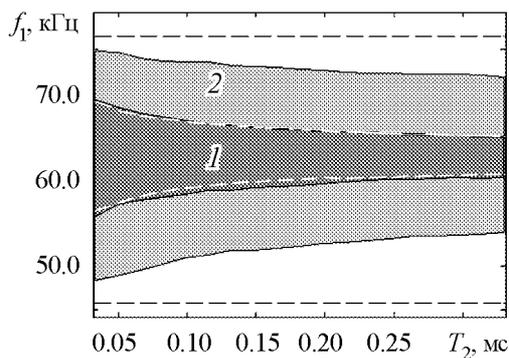


Рис. 3. 1 – полоса захвата; 2 (светло-серая область, включающая область 1) – полоса удержания режима генерации хаотически модулированных колебаний в первой фазовой системе; штриховыми линиями обозначены границы полос захвата и удержания синхронного режима в изолированной первой фазовой системе

осуществления их синхронизации, то во втором случае хаотические колебания интересны благодаря широкому равномерному спектру и резко спадающей автокорреляционной функции.

На рис. 3 представлены области в плоскости параметров  $(T_2, f_1)$ , соответствующие удержанию и захвату в режиме генерации хаотически модулированных колебаний в первой фазовой системе. Параметры ансамбля имеют следующие значения:  $k_1 = 0.1$ ,  $k_2 = 0.5$ ; постоянные времена вторых фильтров во второй и третьей фазовой системе одинаковы –  $T_2 = 165$  мкс; частоты генераторов  $f_0 = 62$  кГц,  $f_2 = 70.4$  кГц,  $f_3 = 59.6$  кГц. Полученные в эксперименте области удерж-

жания и захвата являются широкими и однородными. Важно отметить, что область захвата в режим генерации хаотически модулированных колебаний почти совпадает с областью захвата в синхронный режим изолированной первой фазовой системы ( $k_1 = 0$ ). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами теоретического исследования ансамбля трех каскадно связанных фазовых систем [9–12]. Здесь мы ограничились рассмотрением режима генерации квазисинхронных хаотических колебаний. Относительно режима хаотических биений можно заметить, что данный режим также существует в достаточно больших и однородных областях параметров.

Представленные в работе результаты свидетельствуют о том, что ансамбль трех каскадно связанных фазовых систем позволяет генерировать хаотические колебания в широких и однородных областях параметров. Управление хаотическими режимами с различными спектральными и корреляционными свойствами может осуществляться с помощью изменения величин связей без изменения внутренних параметров элементов ансамбля. Показано, что сигнал, соответствующий режиму хаотических биений, может обладать более равномерным и широким спектром, более резко спадающей автокорреляционной функцией в сравнении с сигналом, который соответствует квазисинхронному хаотическому режиму. Следовательно, режим хаотических биений также может представлять интерес для приложений, например, для использования в качестве несущих в широкополосных системах связи с некогерентным приемом. Стоит отметить, что для постановки экспериментов были использованы микросхемы систем фазовой автоподстройки частоты, которые не являются высокочастотными; это удобно для проведения эксперимента, так как дает возможность изменять параметры, конструировать фильтры в кольцах управления и наблюдать фазовые портреты. При использовании сверхвысокочастотных схем необходимо учитывать их специфику, однако можно надеяться, что динамические свойства ансамбля трех каскадно связанных фазовых систем в этом случае будут качественно совпадать со свойствами, которые были продемонстрированы в данной работе на примере низкочастотной схемы.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-02-17409, № 06-02-16499, № 06-02-16596 и гранта поддержки ведущих научных школ НШ-7309.2006.2.*

## **Библиографический список**

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: ФМЛ, 2002. 252 с.
2. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника. 2006. 208 с.
3. *Korzinova M.V., Matrosov V.V. and Shalfeev V.D.* Communications using cascade coupled phase-locked loop chaos // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1998. Vol. 9, № 5. P. 963.
4. *Шалфеев В.Д., Матросов В.В., Корзинова М.В.* Динамический хаос в ансамблях связанных фазовых систем // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1998. № 11. С. 44.

5. Системы фазовой синхронизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной М.: Радио и связь. 1982. 288 с.
6. *Матросов В.В.* Регулярные и хаотические колебания в фазовой системе // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22, вып. 23. С. 4.
7. *Матросов В.В.* Автомодуляционные режимы системы фазовой автоподстройки частоты с фильтром второго порядка // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 4. С. 357.
8. *Shalfeev V.D. and Matrosov V.V.* Dynamical chaos in phase-locked loops // Chaos in Circuits and Systems / Ed. by G. Chen and T. Ueta. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2002. P. 111.
9. *Матросов В.В., Касаткин Д.В.* Динамические режимы связанных генераторов с фазовым управлением // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 6. С. 637.
10. *Матросов В.В., Касаткин Д.В.* Анализ процессов возбуждения хаотических колебаний во взаимосвязанных генераторах с фазовым управлением // Изв. вузов. ПНД. 2003. Т. 11. № 4-5. С. 31.
11. *Матросов В.В., Касаткин Д.В.* Особенности динамики трех каскадно связанных генераторов с фазовым управлением // Изв. вузов. ПНД. 2004. Т. 12, № 1-2. С. 159.
12. *Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Касаткин Д.В.* Анализ областей генерации хаотических колебаний взаимосвязанных фазовых систем // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 5. С. 448.
13. *Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Шохнин В.В.* Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двух каскадно связанных фазовых систем // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 24. С. 31.

*Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского*

*Поступила в редакцию 12.02.2007*

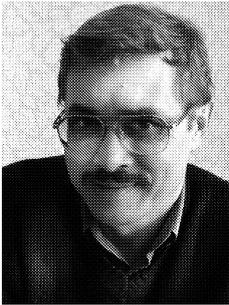
### **GENERATION OF CHAOTIC OSCILLATIONS IN EXPERIMENTAL SCHEME OF THREE CASCADE-COUPLED PHASE SYSTEMS**

*K.G. Mishagin, V.V. Matrosov, V.D. Shalfeev, V.V. Shokhnin*

Results of experimental investigation of chaotic dynamics of the ensemble of three cascade-coupled phase systems (phase-locked loops) are presented. The possibility of dynamical regimes control by means of coupling parameters changing without changing of inner parameters of elements is demonstrated. Spectral and correlation properties of different chaotic regimes are presented. It is shown, that excitation of chaotically modulated oscillation is possible in wide and homogeneous domains of system parameters.



*Мишагин Константин Геннадьевич* – родился в Н. Новгороде в 1981 году. В 2004 году окончил радиофизический факультет ННГУ. На данный момент аспирант на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования ННГУ. Область научных интересов: прикладные вопросы нелинейной динамики ансамблей фазовых осцилляторов (задачи когерентного суммирования мощностей и нелинейное фазирование, использование динамического хаоса в связи), локализация энергии и периодические орбиты в решетках консервативных нелинейных осцилляторов. E-mail: mishagin@rf.unn.ru



*Матросов Валерий Владимирович* – родился в 1960 году. Окончил факультет вычислительной математики и кибернетики Горьковского государственного университета по специальности «прикладная математика» (1982). С 1984 по 1999 – научный сотрудник НИИ прикладной математики и кибернетики при ННГУ, с 1999 года – доцент кафедры теории колебаний и автоматического регулирования ННГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1994, НИИ ПМК при ННГУ) и доктора физико-математических наук (2007, ННГУ), доцент (2001). Область научных интересов – динамика нелинейных систем, динамический хаос, синхронизация и управление хаосом, математическое моделирование. Имеет более 100 публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе два учебных пособия и две монографии (в соавторстве). E-mail: matrosov@rf.unn.ru



*Шалфеев Владимир Дмитриевич* – родился в 1941 году, окончил Горьковский университет в 1963 году. Заведующий кафедрой теории колебаний Нижегородского государственного университета и отделом нелинейной динамики Института прикладной физики РАН, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук РФ. Область научных интересов: динамика нелинейных систем, теория синхронизации, пространственно-временной хаос, структуры. Соавтор монографий «Системы фазовой синхронизации», «Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации». E-mail: shalfeev@rf.unn.ru



*Шохнин Вадим Вячеславович* – родился в Н. Новгороде в 1964 году. В 2002 году окончил радиофизический факультет ННГУ. Работает на кафедре теории колебаний ННГУ с 1982 года, на данный момент в должности старшего лаборанта.