

УДК 530.182

ФИЛЬТРАЦИЯ КАК СПОСОБ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕГОСЯ ПОВЕДЕНИЯ В СИСТЕМЕ ДВУХ ОДНОНАПРАВЛЕННО СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2015 г. М. О. Журавлев^{1,2}, А. О. Сельский^{1,2}, А. А. Короновский^{1,2},
О. И. Москаленко^{1,2}, А. Е. Храмов^{1,2}

E-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Проведено изучение перемежающегося поведения, которое может возникать в хаотических системах при фильтрации сигналов, вблизи границы возникновения фазовой хаотической синхронизации. В рамках проведенных исследований установлено, что для системы однонаправленно связанных генераторов на туннельном диоде возможно одновременное существование перемежаемости “игольного ушка” и перемежаемости “кольца” вблизи границы фазовой хаотической синхронизации при использовании фильтра с определенными параметрами.

DOI: 10.7868/S0367676515120273

ВВЕДЕНИЕ

В рамках многочисленных исследований нелинейных динамических систем было установлено, что перемежающийся тип поведения в таких системах является достаточно характерным. В частности, перемежаемость можно наблюдать при переходе от периодических колебаний к хаотическим, а также вблизи границ возникновения различных режимов хаотической синхронизации связанных осцилляторов [1, 2].

В настоящее время создана классификация перемежаемости, в частности выделяют перемежаемости типов I–III [3], on-off-перемежаемость [4], перемежаемость игольного ушка [5], перемежаемость кольца [6]. Однако при всей схожести различных типов перемежаемости (наличие во временном ряду двух различных режимов, чередующихся друг с другом с течением времени), при всем при этом каждый тип обладает своими особенностями и характеристиками (зависимостью средней длительности ламинарных фаз от управляющего параметра и распределением длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров). Кроме того, необходимо отметить, что механизмы, приводящие к возникновению перемежающегося поведения, для каждого типа также различны.

В рамках последних исследований было показано, что в нелинейных динамических системах возможно существование более сложного типа поведения, которое заключается в одновременном суще-

ствовании двух различных типов перемежаемости. Такой тип поведения получил название “перемежаемости перемежаемостей” [7, 8]. Для нелинейных динамических систем такой тип поведения проявляется в том, что в исследуемой системе одновременно существуют два различных механизма возникновения турбулентных участков поведения, в результате чего в системе существуют одновременно два различных типа перемежаемости.

В последнее время исследованию “перемежаемости перемежаемостей” уделяется большое внимание. В частности, в работе [7] была проиллюстрирована возможность одновременного существования перемежаемости “кольца” и перемежаемости “игольного ушка” на примере однонаправленно связанных систем Ресслера, а для неавтономного осциллятора Ван-дер-Поля при наличии шума была установлена возможность сосуществования перемежаемости “кольца” и перемежаемости типа I с шумом [8]. Стоит отметить, что сосуществование двух различных типов перемежающегося поведения может быть обнаружено при рассмотрении динамики системы на определенных временных масштабах, вводимых в рассмотрение с помощью непрерывного вейвлетного преобразования. Иными словами, при рассмотрении поведения модельных систем, как правило, должен быть выбран определенный масштаб наблюдения, чтобы обнаружить явление “перемежаемости перемежаемостей” [9]. В то же время для реальных систем вполне возможна ситуация, когда “перемежаемость перемежаемостей” будет реализовываться “автоматически”, без какого-либо выбора масштаба наблюдения со стороны исследователя. Известно, что непрерывное вейвлетное преобразование с материнским вейвлетом Морле, используемое для изучения поведения систем на различных временных масштабах и детектирования явления синхронизации временных

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”.

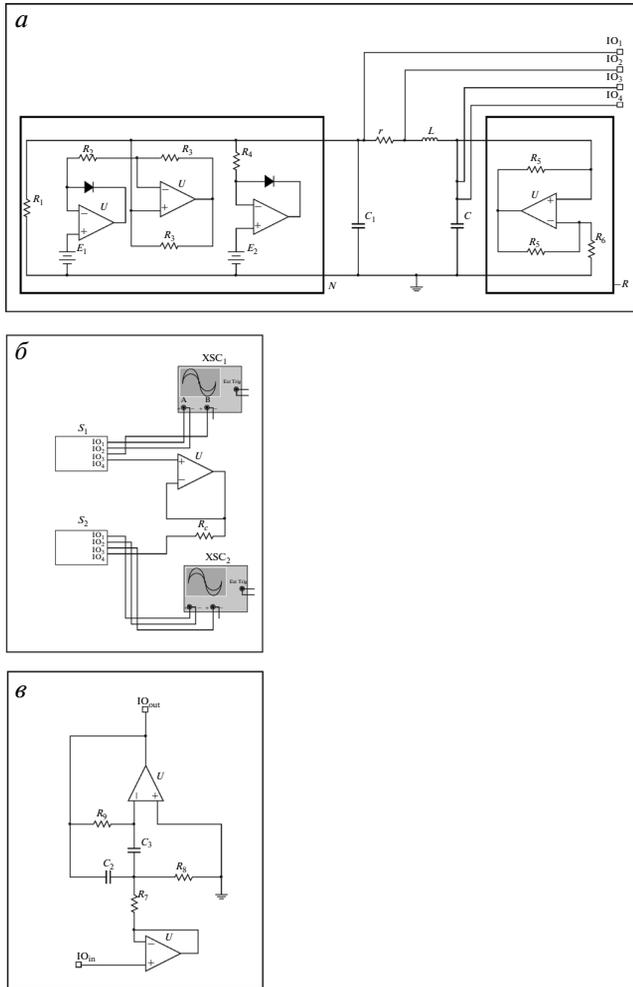


Рис. 1. *a* – принципиальная схема кусочно-линейной модели генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича, *б* – схема связи двух кусочно-линейной модели генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича, *в* – схема полосового фильтра, который использовался в рамках исследований.

масштабов [10], можно рассматривать как фильтр, действующий на анализируемый сигнал [11]. Так как при изучении реальных систем вполне возможна ситуация, когда анализируемый сигнал, демонстрирующий некоторый тип перемежающегося поведения, подвергается предварительной фильтрации либо фильтром, входящим в состав изучаемой системы, либо фильтром, входящим в состав “канала связи”, обеспечивающего передачу сигнала, то в этом случае существует возможность наблюдать явление “перемежаемости перемежаемостей” даже без рассмотрения динамики системы на различных временных масштабах.

В настоящей работе представлено изучение перемежающегося поведения, которое может возникнуть в хаотических системах при фильтрации сигналов вблизи границы возникновения фазовой хаотической синхронизации. В рамках проведенных исследований установлено, что для системы одно-

направленно связанных генераторов на туннельном диоде [12] возможно одновременное существование двух различных типов перемежающегося поведения, которое возникает вблизи границы фазовой хаотической синхронизации при использовании фильтра с определенными параметрами.

СИСТЕМА ОДНОНАПРАВЛЕННО СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ

Исследование перемежающегося поведения, возникающего вблизи границы фазовой хаотической синхронизации при осуществлении фильтрации сигнала с различными параметрами, проводилось на примере системы однонаправленно связанных генераторов на туннельном диоде [12]. Необходимо отметить, что моделирование в системах однонаправленно связанных генераторов на туннельном диоде проводили с использованием профессиональной и образовательной среды схематического проектирования NIMultisim 9.0. Принципиальная схема кусочно-линейной модели генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича представлена на рисунке 1*a*, где блок (*N*) представляет собой нелинейный элемент, кусочно-линейную аппроксимацию туннельного диода, обладающий *N*-образной ВАХ. Блок (*-R*) на рисунке 1*a* представляет собой гиратор, обеспечивающий отрицательное сопротивление. *D* – идеальные диоды, *U* – идеальные операционные усилители. Значения параметров: $C_1 = 2 \text{ нФ}$, $C = 6.8 \text{ нФ}$, $r = 200 \text{ Ом}$, $E_1 = 0.085 \text{ В}$, $E_2 = 0.5 \text{ В}$, $R_1 = 51.5 \text{ Ом}$, $R_2 = 45 \text{ Ом}$, $R_3 = 120 \text{ Ом}$, $R_4 = 154.155 \text{ Ом}$, $R_5 = 3.6 \text{ кОм}$, $R_6 = 1.5 \text{ кОм}$. Параметр *L* определен для каждой системы отдельно. Схема имеет четыре выхода: три – для съемки напряжений, являющихся динамическими переменными, один – для связи систем между собой.

На рис. 1*б* приведена схема связи двух кусочно-линейной моделей генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича. Система *S*₁ однонаправленно связана с системой *S*₂, благодаря повторителю на основе операционного усилителя. Сопротивление *R*₇ регулирует связь: чем больше параметр, тем слабее связь между системами и наоборот, чем меньше значение параметра, тем сильнее связь. Системы идентичны всем, кроме параметра *L*: $L = 3.2 \text{ мГн}$ для системы *S*₁ и $L = 3.1 \text{ мГн}$ для системы *S*₂. Напряжения регистрировали с помощью двух двухканальных осциллографов.

Схема полосового фильтра, который использовали в рамках исследований, представлен на рис. 1*в*. Значения параметров фильтра: $C_2 = 0.4 \text{ нФ}$, $R_7 = 1.591549 \text{ МОм}$, $R_8 = 10.61 \text{ Ом}$, $R_9 = 11.93662 \text{ МОм}$. Параметр *C*₃ использовали для подстройки центральной частоты фильтра.

**ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА
НА ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЕСЯ ПОВЕДЕНИ
ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ ФАЗОВОЙ
ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

Необходимо отметить, что исследование влияния фильтрации сигнала на поведение однонаправленно связанных генераторов на туннельном диоде, которая была описана выше, проводили вблизи границы возникновения фазовой хаотической синхронизации. В рамках этих исследований было установлено, что в системе двух однонаправленно связанных кусочно-линейных моделей генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича в случае малой расстройки по частоте между генераторами фазовая хаотическая синхронизация возникает при значении параметра связи, равном $R_c = 12.5$ кОм.

Кроме того, было показано, что в случае значительной отстройки, вырезаемой фильтром частоты относительно собственной частоты системы, возникает перемежающееся поведение. Также на основе концепции, описанной в работе [9], установлено, что в этом случае в исследуемой системе реализуется перемежаемость типа “кольцо”. Когда же система двух однонаправленно связанных кусочно-линейных моделей генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича находится вблизи области, предшествующей фазовой хаотической синхронизации, и при этом происходит фильтрация сигнала со значительной отстройкой частоты, вырезаемой фильтром относительно собственной частоты системы, ситуация несколько меняется. В этом случае в данной системе можно одновременно наблюдать два различных типа перемежающегося поведения: перемежаемость “кольца” и перемежаемость “игольного ушка”. Такие выводы сделаны на основе рассмотрения динамики систем на вращающейся плоскости аналогично тому, как это было сделано в работах [9]. Данный подход заключается в том, что переменные (в данном случае ими выступают напряжения на емкости C и сопротивления r , $x^{1,2} = U_r^{1,2} = I_0^{1,2} - I_0^{2,1}$ и $y^{1,2} = U_c^{1,2} = I_0^{1,2}$) рассматриваются на плоскости, вращающейся вокруг начала координат [6]:

$$\begin{aligned} x' &= x^2 \cos \varphi_1(t) + y^2 \sin \varphi_1(t), \\ y' &= -x^2 \sin g_j(t) + y^2 \cos \varphi_1(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ – мгновенные фазы рассматриваемых хаотических систем соответственно. Фазы

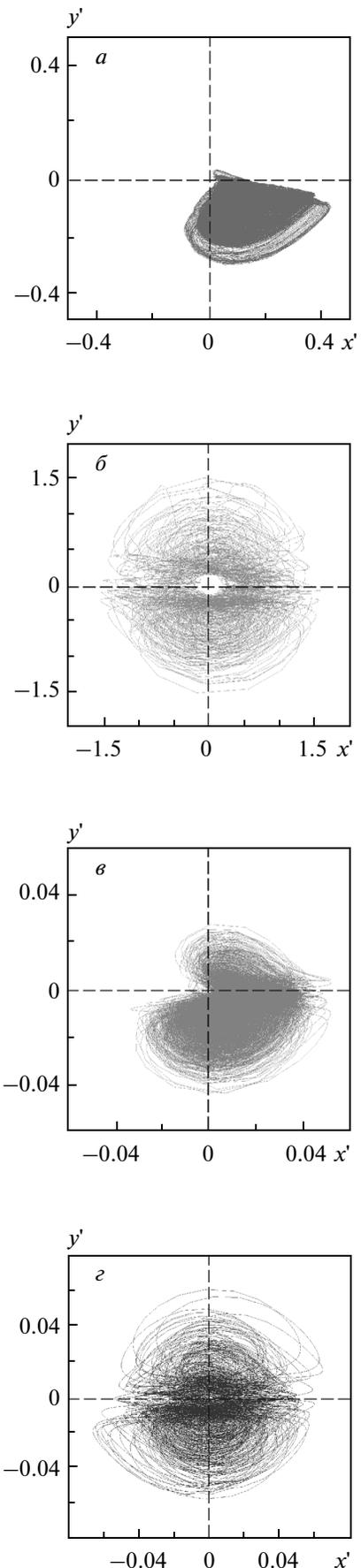


Рис. 2. *a* – движение фазовой траектории на вращающейся плоскости в случае синхронной динамики поведения, *б* – движение фазовой траектории на вращающейся плоскости, для случая существования перемежаемости “игольного ушка”, *в* – движение фазовой траектории на вращающейся плоскости, для случая существования перемежаемости “кольца”, *г* – движение фазовой траектории на вращающейся плоскости для случая одновременного существования перемежаемости “игольного ушка” и перемежаемости “кольца”.

$\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ могут быть введены в рассмотрение различными способами, такими как угол поворота на плоскости проекции хаотического аттрактора, с помощью сечения Пуанкаре или преобразования Гильберта [13].

На рис. 2 представлено поведение фазовой траектории на вращающейся плоскости. Из рисунка видно, что в случае отсутствия фильтрации сигнала при значениях параметра связи меньше R_c в системе наблюдается перемежаемость “игольного ушка” (см. рис. 2б). В случае, если параметр связи больше R_c , в системе наблюдается синхронная динамика (см. рис. 2а). При фильтрации исходного сигнала при значительной отстройке от собственной частоты системы, но для значения параметра связи больше R_c , в системе наблюдается перемежаемость “кольца” (см. рис. 2в). Если параметр связи меньше R_c , то в этом случае в системе можно одновременно наблюдать перемежаемость типа “кольца” и перемежаемость типа “игольного ушка”, аналогично тому, как это было сделано в работах [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено изучение перемежающегося поведения, которое может возникать в хаотических системах при фильтрации исходных сигналов вблизи границы возникновения фазовой хаотической синхронизации. В рамках проведенных исследований на примере системы двух однонаправленно связанных кусочно-линейных моделей генератора Кияшко–Пиковского–Рабиновича установлено, что для такой системы возможно одновременное существование перемежаемости “игольного ушка” и перемежаемости “кольца” вблизи границы фазовой хаотической синхронизации при использовании фильтра со значительной отстройкой от собственной частоты такой системы. Полученные результаты говорят о том, что возможность одновременного существования двух различных типов перемежающегося поведения в реальных радиофизических системах достаточно типична.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2014 год и плановый период 2015 и 2016 годов в части проведения научно-исследовательских работ (проект № 1045), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект МК-807.2014.2) и фонда некоммерческих программ “Династия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boccaletti S., Valladares D.L. // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. № 5. P. 7497.
2. Boccaletti S., Kurths J., Osipov G.V., Valladares D.L., Zhou C.S. // Phys. Rep. 2002. V. 366. P. 1.
3. Berge P., Pomeau Y., Vidal Ch. L'ordredans le chaos. Paris: Hermann, 1988.
4. Platt N., Spiegel E.A., Tresser C. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. № 3. P. 279.
5. Pikovsky A.S., Osipov G.V., Rosenblum M.G., Zaks M., Kurths J. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. № 1. P. 47
6. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Boccaletti S. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 114101.
7. Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19. № 1. С. 109–121.
8. Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 12. С. 1503; Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Physics. 2012. V. 76. №12. P. 1346.
9. Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E. // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. 027201.
10. Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Chaos. 2004. V. 14. № 3. P. 603–610.
11. QuianQuiroga R., Kraskov A., Kreuz T., Grassberger P. // Phys. Rev. E. 2002. V. 65. 041903.
12. Пиковский А.С., Рабинович М.И. // Докл. ДАН. СССР. 1978. Т. 239. № 2. С. 301
13. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2000. V. 10. № 10. P. 2291.