

ВЕСТНИК
ЯРОСЛАВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. П. Г. Демидова

Научный журнал



Серия Естественные и технические науки

Выходит 4 раза в год

Содержание

УДК 621.37:621.391, 621.37:621.392

ЗАГОЛОВОК ДОЛЖЕН БЫТЬ КРАТКИМ, ЛАКОНИЧНЫМ И ОТРАЖАТЬ СУТЬ РАБОТЫ¹

И. И. Иванов, ЯрГУ, профессор кафедры ОЭФ, д. ф.-м. н., ivanov@mail.ru
А. В. Сидоров, МЭИ (ТУ), магистр, sidorov@mail.ru

Аннотация

Аннотация не должна копировать начало статьи. Помните, что аннотация – это возможность быстро познакомиться с полученными результатами. В аннотации раскрывается наиболее существенное из всего содержания. Постарайтесь заинтересовать читателя, показать значение и специфику Вашей работы. Впрочем, именно Вам решать, что должно содержаться в аннотации, а всё сказанное является не более чем рекомендацией.

Ключевые слова: токамак; нелинейная динамика; цифровая обработка сигналов; энергосберегающие технологии; астрофизика; динамический хаос; релевантность

Введение

В многочисленных теоретических и экспериментальных работах показано, что явление динамического хаоса может быть широко использовано в различных областях науки и техники, в частности, путем создания новых технологий на его основе [1, 2]. Одним из перспективных направлений использования хаоса является применение его в телекоммуникационных системах. Со времен появления работ Шеннона, Котельникова и Харкевича известно, что широкополосные сигналы, к которым относятся хаотические колебания, потенциально очень эффективны для передачи информации.

В системах связи, основанных на использовании регулярных колебаний, широко применяются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Они способны работать в асинхронном режиме, представляющем собой хаотически модулированные колебания (ХМК). Такие колебания представляют интерес с точки зрения передачи информации на базе динамического хаоса, где они могут использоваться в качестве несущих колебаний. Одной из ключевых проблем этого направления является синхронизация хаотических колебаний.

Исследования системы ФАПЧ с фильтром второго порядка показали, что области генерации ХМК в пространстве параметров этой системы сравнительно малы [3]. Это обстоятельство может представлять определённые трудности при практическом использовании таких систем в качестве генераторов ХМК. Попытки добиться увеличения размеров областей генерации ХМК путём изменения нелинейности фазового дискриминатора, путём варьирования параметров фильтра, а также за счёт изменения структуры локальной цепи управления оказались малоэффективными [3–5]. Наиболее продуктивным представляется подход, основанный на использовании свойств коллективной динамики малых ансамблей систем связанных ФАПЧ [5]. Данная работа продолжает исследования хаотической динамики ансамблей систем связанных ФАПЧ. Основное внимание здесь уделено анализу хаотической синхронизации каскадно-соединённых систем связанных ФАПЧ.

1. Система связанных ФАПЧ

Теплоноситель в реакторе находится в узком зазоре между шахтой с корпусом реактора, а также между шахтой и выгородкой (см. рис. 1). При колебаниях шахты жидкость будет вытесняться из зазоров, т. е. будет происходить перетекание жидкости. Причем скорость течения будет тем больше, чем меньше ширина зазора, и при малых

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 07-01-00876).

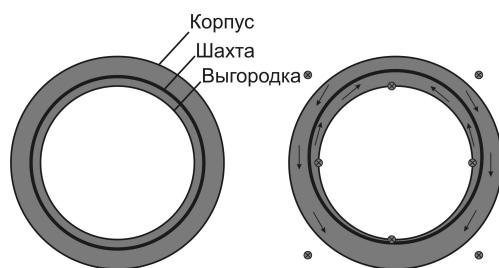


Рис. 1. Схема движения теплоносителя в зазоре между шахтой и корпусом реактора при колебаниях шахты

зазорах скорость жидкости может заметно превышать скорость стенки шахты.

Периодическое изменение толщины водяных зазоров «выгородки активной зоны (АЗ) – шахты АЗ» и «шахты АЗ – корпус реактора» вызывает модулирование потока нейтронов утечки, что в свою очередь приводит к возникновению флуктуационной составляющей тока ионизационных камер (см. рис. 2).

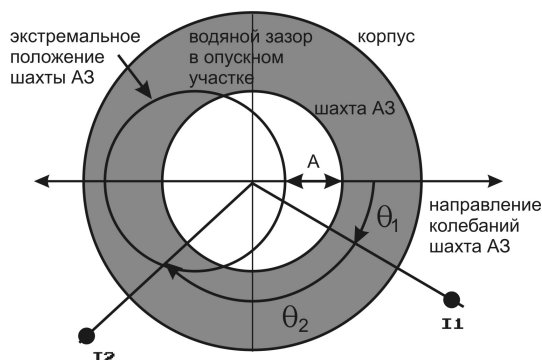


Рис. 2. Механизм возникновения тока ИК при колебаниях шахты АЗ

Флуктуации тока ИК за счет колебаний толщины водяного слоя с амплитудой «А» хорошо изучены и описываются выражением

$$\frac{\delta I(\omega, r)}{I(r)} = \frac{\delta \Phi(\omega, r)}{\Phi(r)} = G_0(\omega) \delta \rho(\omega) + A \mu \delta(\omega - \omega_0) \cos \Theta, \quad (1)$$

где $G_0(\omega) \delta \rho(\omega)$ – составляющая, связанная с пульсациями давления теплоносителя, $\delta I(\omega, r), I(r)$ – переменная и постоянная составляющие тока ИК; $\delta \Phi(\omega, r), \Phi(r)$ – переменная и постоянная составляющие потока нейтронов, достигающих ИК; A – амплитуда колебания; Θ – угол между направлением маятниковых колебаний шахты АЗ и прямой, соединяющей ИК

с центром реактора; μ – коэффициент пропорциональности, связывающий амплитуду вибраций шахты с амплитудой флуктуаций нейтронного потока, его размерность – $[\text{см}^{-1}]$, оценивается он величиной порядка $0.15 [\text{см}^{-1}]$ для широкого класса конструкций водо-водяных реакторов.

2. Системы связанных ФАПЧ как синхронизируемые передатчик и приемник

Применение традиционного Фурье-преобразования для регистрации взаимной синхронизации хаотических колебаний не позволяет ответить на вопрос о степени синхронности режимов. По этой причине для анализа фазовой синхронизации было введено понятие фазы хаотического сигнала с использованием непрерывного вейвлет-преобразования:

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \psi_{s, t_0}^*(t) dt. \quad (2)$$

Таблица

№	Снятие кадра на каждой из L частот		Многочастотность в каждой точке синтезируемой апертуры	
	t_1	t_L	t_L	Δt_L^{\parallel}
1	0.03 мс	5.9 мс	5.5 мс	0
2	252 с	50400 с	252 с	0
3	0.58 мс	117 мс	0.7 с	$N L t_1$
4	252 с	50410 с	342 с	$N K L t_1$
5	72 мс	14.3 с	90 с	$N M L t_1$
6	252 с	50410 с	342 с	$M L t_1$
7	72 мс	14.3 с	90 с	$N M L t_1$
8	4.07 с	814 с	94 с	$N_1 K_1 M L t_1$
9	4.07 с	814 с	94 с	$N_1 K_1 N_2 K_2 L t_1$

Как видно из таблицы, при заданных условиях (дальности до объекта, разрешении) быстродействие СГРВ обеспечивается только при использовании первой или третьей схем, являющихся многоканальными. При этом регистрируются 170 или 180 (для первой схемы), либо 8.5 или 1.4 (для

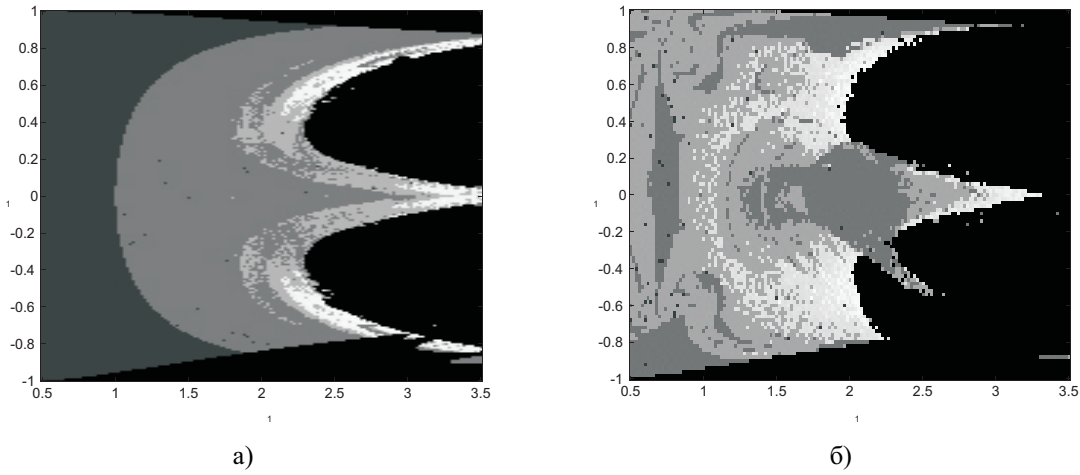


Рис. 3. Диаграммы ляпуновских показателей

третьей) 200-частотных кадра по 128×128 точек в секунду; первая цифра здесь соответствует третьей колонке в таблице, вторая – четвёртой.

Теплоноситель в реакторе находится в узком зазоре между шахтой с корпусом реактора, а также между шахтой и выгородкой (см. рис. 2). В качестве материнского вейвлета в работе используется комплексный вейвлет Морле.

В силу особенностей вейвлет-преобразования удастся локализовать спектры хаотических сигналов и применить стандартный аппарат для регистрации синхронизации. В качестве материнского вейвлета в работе используется комплексный вейвлет Морле, который представляет собой синусоидальную функцию, модулированную функцией Гаусса:

$$\psi_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} e^{i 2\pi C \eta} e^{-\eta^2/B}, \quad (3)$$

где C – центральная частота, B – ширина полосы частот вейвлета.

Выбор значений параметров $B = 2$, $C = 1$ обеспечивает простое соотношение $s \cong 1/f$ между временным масштабом s вейвлетного преобразования и частотой f преобразования Фурье [6]. При варьировании параметров B , C соответственно изменяется ширина огибающей и частота «заполнения» вейвлет-функции Морле, что позволяет адаптировать свойства вейвлет-преобразования к конкретному случаю. Фаза определенного временного масштаба s сигнала $\varphi(t)$ определяется как

$$\theta_S(t_0) = \arg W(s, t_0). \quad (4)$$

В развернутой форме (1) можно записать так:

$$r_m(f) = \frac{1}{N_c} \sum_{\nu=0}^{N_c-1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{N_c} f \nu\right) \times \\ \times \exp(\theta_m(\nu)) y_m(\nu) + \eta'_m(f),$$

где $\eta'_m(f) = \frac{1}{N_c} \sum_{\nu=0}^{N_c-1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{N_c} f \nu\right) \eta_m(\nu)$.

В наших обозначениях импульсная характеристика канала определяется через частотную:

$$h_T(\tau) \equiv \sum_{p=0}^{N_c-1} \exp\left(i \frac{2\pi}{N_c} \tau p\right) h_f(p). \quad (5)$$

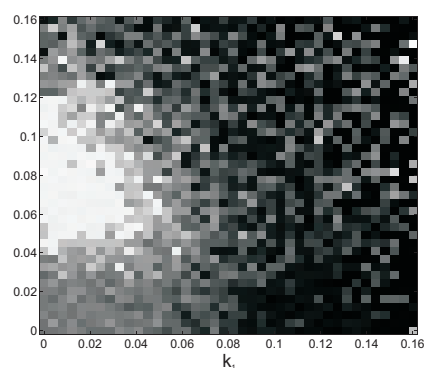
После несложных преобразований с учетом (5) имеем

$$r_m(f) = \frac{1}{N_c} \sum_{\nu=0}^{N_c-1} \exp(\theta_m(\nu)) h_f(f) x_m(f) + \\ + \frac{1}{N_c} \sum_{\nu=0}^{N_c-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq f}}^{N_c-1} \left(h_f(j) \exp(\theta_m(\nu)) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-i \frac{2\pi}{N_c} \nu(f-j)\right) x_m(j) \right) + \eta'_m(f),$$

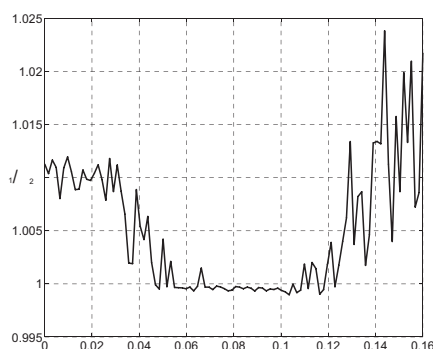
где $h_f(p) \equiv \sum_{\tau=0}^{N_c-1} \exp\left(i \frac{2\pi}{N_c} \tau p\right) h_f(p)$.

Введение понятия фазы таким образом позволяет применить стандартное определение синхронизации для узкополосных сигналов к широкополосным:

$$|\theta_{S1}(t) - \theta_{S2}(t)| \leq \text{const} \quad (6)$$



а)



б)

Рис. 4. Карта разностей фаз при $\mu_1 = \mu_3 = 3.06$, $\mu_2 = \mu_4 = 2.37$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 1$, $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = \gamma_4 = 0.69$, $\gamma_3 = -0.03$, $k_1 = 0.1$ (а); отношение частот при тех же параметрах и $k_2 = 0$ (б)

Математическая модель синхронизируемых систем связанных ФАПЧ имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_1 \ddot{\varphi}_1 + \varepsilon_1 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_1 + k_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) &= \gamma_1 \\ \mu_2 \ddot{\varphi}_2 + \varepsilon_2 \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2 + \sin(\varphi_2 - \varphi_1) &= \gamma_2. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 4а представлена карта разностей фаз главного временного масштаба $s = 11.47$ (масштаба, на который приходится максимум энергии амплитудного вейвлетного спектра).

Область белого цвета соответствует режиму синхронизации, в остальных точках, чем темнее цвет, тем больше набег разности фаз. На рис. 4б изображена зависимость отношения частот от параметра δ .

Теплоноситель в реакторе находится в узком зазоре между шахтой с корпусом реактора, а также между шахтой и выгородкой (см. рис. 2). При колебаниях шахты жидкость будет вытесняться из зазоров, т. е. будет происходить перетекание

жидкости. Причем скорость течения будет тем больше!

В случае SDM (2.2) корреляционная матрица имеет вид

$$M(f) = \begin{pmatrix} (\sigma_1^0(f))^2 & r_{11}^{01}(f) & r_{12}^{00}(f) & r_{12}^{01}(f) \\ r_{11}^{01}(f) & (\sigma_1^1(f))^2 & r_{12}^{10}(f) & r_{12}^{11}(f) \\ r_{12}^{00}(f) & r_{12}^{10}(f) & (\sigma_2^0(f)r)^2 & r_{22}^{01}(f) \\ r_{12}^{01}(f) & r_{12}^{11}(f) & r_{22}^{01}(f) & (\sigma_2^1(f))^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Теплоноситель в реакторе находится в узком зазоре между шахтой с корпусом реактора, а также между шахтой и выгородкой (см. рис. 2). При колебаниях шахты жидкость будет вытесняться из зазоров, т. е. будет происходить перетекание жидкости.

Для удобства введем обозначения:

$$\nu_m(\psi_m) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m^0 + \psi_m) - \cos(\varphi_m^0) \\ \sin(\varphi_m^0 + \psi_m) - \sin(\varphi_m^0) \\ \cos(\varphi_m^1 + \psi_m) - \cos(\varphi_m^1) \\ \dots \\ \cos(\varphi_m^f + \psi_m) - \cos(\varphi_m^f) \\ \sin(\varphi_m^f + \psi_m) - \sin(\varphi_m^f) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Заключение

В работе выполнено исследование системы связанных ФАПЧ. Проведен анализ динамических режимов данной системы в пространстве параметров путем построения карт показателей Ляпунова. Показано потенциальное преимущество применения систем связанных ФАПЧ в качестве генераторов хаоса: область генерации ХМК в пространстве параметров системы существенно больше и однороднее, чем для одиночной системы. Максимальный старший показатель Ляпунова имеет также большее значение. Получены значения параметров, при которых наблюдается устойчивая синхронизация между двумя системами связанных ФАПЧ. Установлено, что синхронизация возможна, когда режим в ведомой системе близок к регулярному. Вышеуказанный интервал параметров связи между двумя системами увеличился в 4 раза по сравнению с результатом для одиночной системы и достигает максимального

значения в случае, когда ведомая система является одиночной. Таким образом, показана нецелесообразность использования системы связанных ФАПЧ на приемной стороне. В целом, значительное увеличение области устойчивой синхронизации существенно повышает практический интерес к подобной структуре.

Литература

1. Для монографий: Фамилия и инициалы автора (ов), название книги, место издания, издательство, год (для трудов конференций - город, страна, год). Количество страниц.
2. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972. 320 с.
3. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Н. Бакаева, М. В. Капранова. М.: Сов. радио, 1978. 600 с.
4. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A. *et al* Spread Spectrum Communications. Communication systems. Inc., Rockville, Md., 1985. 472 p.
5. Для журналов: фамилия и инициалы автора(ов), название статьи, название журнала (сборника), год, том, номер (или номер выпуска), страницы.
6. Полякова А.Л., Васильев Б.М., Купенко И.Н. и др. Изменение зонной структуры полупроводников под давлением. // Физика и техника полупроводников. 1976. Т. 9, № 11. С. 2356–2358.
7. Афанасьев А.М. Оптимизация распределения энерговыделения в реакторе с помощью «советов оператору». // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1986. Вып. 2. С. 32–36.
8. Mezain I.H. Rolling circuit boards improves soldering. // Electronics. 1977. Vol. 34, No. 16. P. 193–198.
9. Горшкова Т.И. Термодинамические свойства и применение некоторых сплавов церия: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 1976.
10. А. с. 100970 СССР МКИЗ В 251 15/00. Устройство для захвата неориентированных деталей типа валов. / Ваулин В.С., Кенайкин В.Г. // Открытия. Изобретения. 1983. № 11.

ENGLISH VERSION OF YOUR TITLE

I.I. Ivanov, P.G. Demidov Yaroslavl State University
A. V. Sidorov, Moscow Power Engineering Institute

Abstract

The phase-locked loop is a versatile circuit with a wide variety of practical applications in modern electronic systems. The PLL is designed to operate in a stable regime. Since the PLL is nonlinear circuit however its behavior may be rather complex and even chaotic. In this case spectrum of a signal is continuous. So the definition of words phase and synchronization is needed. It can be done by using discrete wavelet transform (DWT). In this paper we use such technique to indicate chaotic phase synchronization of coupled phase-locked loops.

Keywords: tokamak; nonlinear dynamics; digital signal processing; energy-efficient technology; astrophysics; dynamic chaos; relevance