

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АЛЬ-ФАРАБИ

А.А. Темирбаев

**СИНХРОНИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

Сборник лекции для студентов и магистрантов  
специальности «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Алматы, 2024

## **Аннотация**

Коллективная динамика в больших ансамблях или сетях связанных осцилляторов или автоколебательных элементов является одной из основных проблем в нелинейной динамике. Она важна как для теоретического понимания сложных процессов, так и для широкого спектра приложений в различных областях. В данном сборнике лекции изложены теоретические основы синхронизации и экспериментальные результаты автора по исследованию синхронизации в электронных ансамблях с глобальной и нелинейной связью.

Сборник лекции предназначен для студентов, желающих ознакомиться с физическим феноменом – синхронизация.

© Темирбаев А. А., 2024

## Лекция 11. Экспериментальное исследование синхронизации в ансамбле связанных электронных осцилляторов.

**Цель лекции:** Изучить явление синхронизации в натуральных экспериментах, используя ансамбль электронных осцилляторов. Ознакомиться с тонкостями натурального эксперимента.

### 1. Описание экспериментальной установки

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рисунке 1. Установка состоит из: глобально связанных генераторов с мостом Вина (частоты всех генераторов почти равномерно распределены между  $1.1 \text{ kHz} \div 1.14 \text{ kHz}$ ); компьютера с быстрым АЦП с общей частотой дискретизации  $1.25 \text{ MS/s}$  (АЦП имеет 80 входных каналов, разрядность 16 бит); цифрового осциллографа GDS-840 С; платформы NI ELVIS II. При исследовании внешнего периодического воздействия к системе подключался сигнал от внешнего генератора, который содержится в составе NI ELVIS II. Для работы с NI ELVIS II в качестве программного обеспечения были установлены следующие программы:



1- Система генераторов, 2-АЦП компании National Instruments NI USB-6255, 3- платформа NI ELVIS II, 4- Цифровой осциллограф GDS-840 С, 5-ПК для отображения данных

Рисунок 1 – Внешний вид экспериментальной установки.

- LabView 2010
- NI-DAQmx for NI ELVIS II
- NI ELVIS II

В качестве базового элемента, как говорилось выше, использовался генератор электрических колебаний с мостом Вина, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.

Подбор параметров генератора был основан на простой теории моста Вина. Для использования на частотах ниже  $10^3$ - $10^5$  Гц удобно пользоваться резисторно-емкостными (RC) генераторами, т.к. обычный колебательный контур с индуктивностью  $L$  в этих случаях получается громоздким. В RC генераторах частота генерируемых колебаний определяется свойствами цепи обратной связи.

Рассмотрим генератор с мостом Вина, представляющий собой последовательно-параллельную RC цепочку с обратной связью усилителя (рисунок 2).

Запишем для этой цепи законы Кирхгофа:

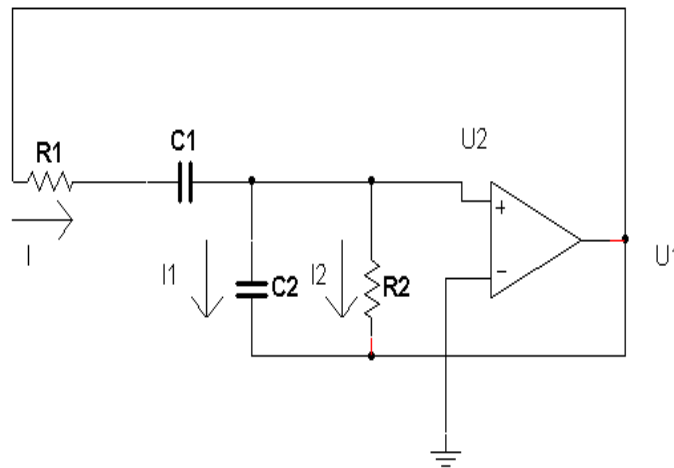


Рисунок 2 – Схема RC генератора с мостом Вина

$$I = I_1 + I_2 = C_2 \dot{U}_2 + I_2, \quad (2.1)$$

$$U_1 = IR_1 + \frac{1}{C_1} \int Idt + U_2, \quad U_1 = f(U_2), \quad (2.2)$$

$$U_2 = I_2 R_2, \quad (2.3)$$

где точки над переменными означает дифференцирование по времени. Из формулы (2.2) следует

$$\dot{f}(U_2) = \dot{I}R_1 + \frac{I}{C_1} + \dot{U}_2 = C_2 R_1 \ddot{U}_2 + R_1 \frac{\dot{U}_2}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \dot{U}_2 + \frac{U_2}{C_1 R_2} + \dot{U}_2, \quad (2.4)$$

$$\dot{f}(U_2) = \frac{df}{dU_2} \cdot \frac{dU_2}{dt} = \dot{U}_2 \frac{df}{dU_2}, \quad (2.5)$$

$$\ddot{U}_2 + \left\{ \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_1 C_2} \frac{df}{dU_2} \right\} \dot{U}_2 + \frac{1}{R_1 C_2 C_1 R_2} U_2 = 0. \quad (2.6)$$

В случае симметричного моста Вина имеем

$$R_1 = R_2 = R, \quad C_1 = C_2 = C,$$

$$\frac{d^2 U_2}{dt^2} + \left\{ \frac{3}{RC} - \frac{1}{RC} \frac{df(U_2)}{dU_2} \right\} \frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{R^2 C^2} U_2 = 0 \quad (2.7)$$

Введем обозначение  $\omega_0 = 1/RC$ , и примем зависимость

$$f(U_2) = KU_2 - K_1 U_2^3 \quad (2.8)$$

После этого имеем

$$\frac{d^2 U_2}{dt^2} - \left\{ \frac{K-3}{RC} - \frac{3K_1}{RC} U_2^2 \right\} \frac{dU_2}{dt} + \omega_0^2 U_2 = 0. \quad (2.9)$$

Перейдем к новому времени  $\tau$  и введем обозначения  $x = U_2 \sqrt{3K_1}$ ,  $\varepsilon = K - 3$ . В результате мы получим уравнение Ван – дер – Поля в форме

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} - (\varepsilon - x^2) \frac{dx}{d\tau} + x = 0. \quad (2.10)$$

Как видно из (2.10) генератор с мостом Вина является генератором квази-гармонических сигналов, который описывается уравнением Ван-дер-Поля. Из структуры уравнения (2.6) видно, что частота собственных колебаний контура, образованного резисторами  $R_3, R_4$  и конденсаторами  $C_1, C_2$  равна:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}} \quad (2.11)$$

В нашем эксперименте положительная обратная связь осуществлялась операционным усилителем  $AD822$ , коэффициент усиления его регулировался резистором  $R_6$ . Диоды, включенные по параллельно-встречной схеме, обеспечивают автоматическую стабилизацию амплитуды колебаний. По мере того, как возрастает  $V_i$ , динамическое сопротивление диодов падает в соответствии с соотношением  $r_D = 26mV/I_D$ , где  $r_D$  - динамическое сопротивление диода.  $I_D$  - мгновенное значение тока диода,  $26mV$  - температурный потенциал диодного перехода при комнатной температуре.

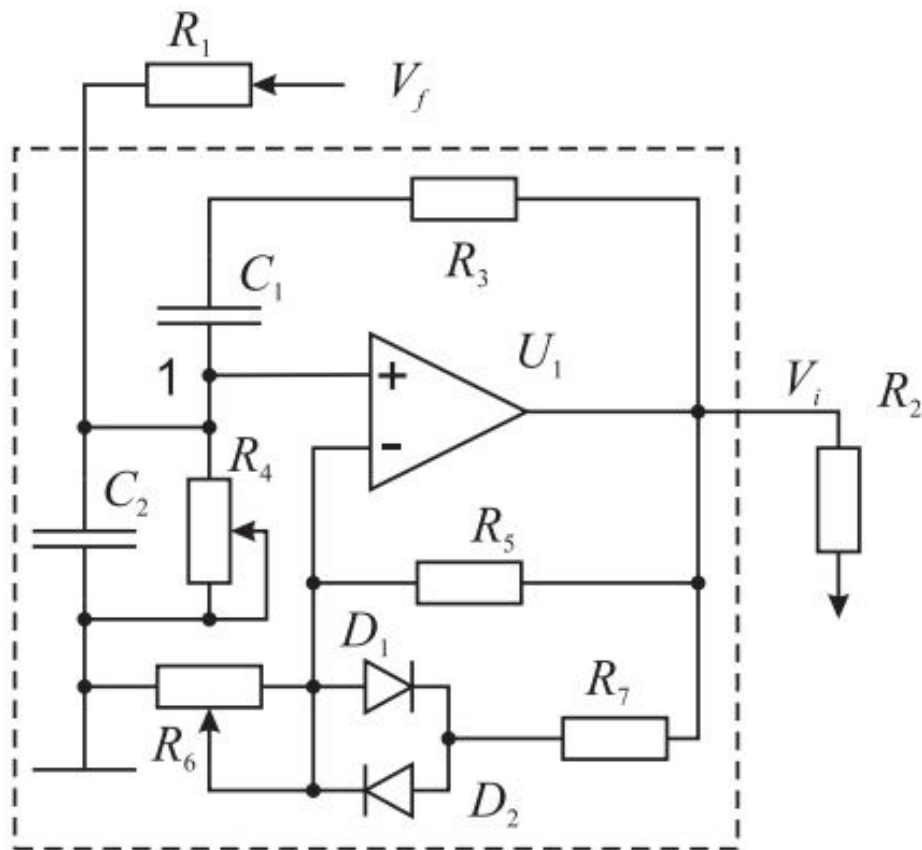


Рисунок 2.3 – Функциональная схема экспериментального генератора с мостом Вина (схема указана штрихом).  $V_i$  - выходное напряжение от  $i$ -го осциллятора.  $V_f$  - выходное напряжение после глобальной связи.

Таким образом, по мере возрастания  $V_i$  общее сопротивление  $R_{o.c}$  (сопротивление обратной связи) понижается, стабилизируя амплитуду выхода и предотвращая ее грубое ограничение. Потенциометр  $R_6$  используется для установки

амплитуды колебаний. С помощью этого резистора выходные напряжения всех генераторов регулировались так, что амплитуды составляли порядка  $V_i = 1.5V$ .

С помощью многооборотного потенциометра  $R_4$ , который стоит в цепи Вина регулировались индивидуальные частоты всех генераторов.

Из таких 72 глобально связанных осцилляторов был создан ансамбль (Рисунок 2.4). Выходные сигналы с генераторов через сопротивления  $R_2$  суммировались на резисторе связи  $R_c$  (связь через общее сопротивление). Часть напряжения от потенциометра поступает на вход фазосдвигающей цепи. Глобальная обратная связь организована так, что выходной сигнал после фазосдвигающей цепи через резисторы  $R_1$  поступает ко всем осцилляторам. В эксперименте входное напряжение глобальной обратной связи  $V_c$  может меняться от нуля до своего максимального значения  $V_L$ , поэтому безразмерный параметр связи можно вы-

брать в виде  $\varepsilon = \frac{V_c}{V_L}$ . Использование индекса  $L$  для обозначения максимального значения  $V_{\max}$  связано с тем, что  $V_{\max}$  определяется для полной цепи (Loop), т.е. принято  $V_{\max} = V_L$ .

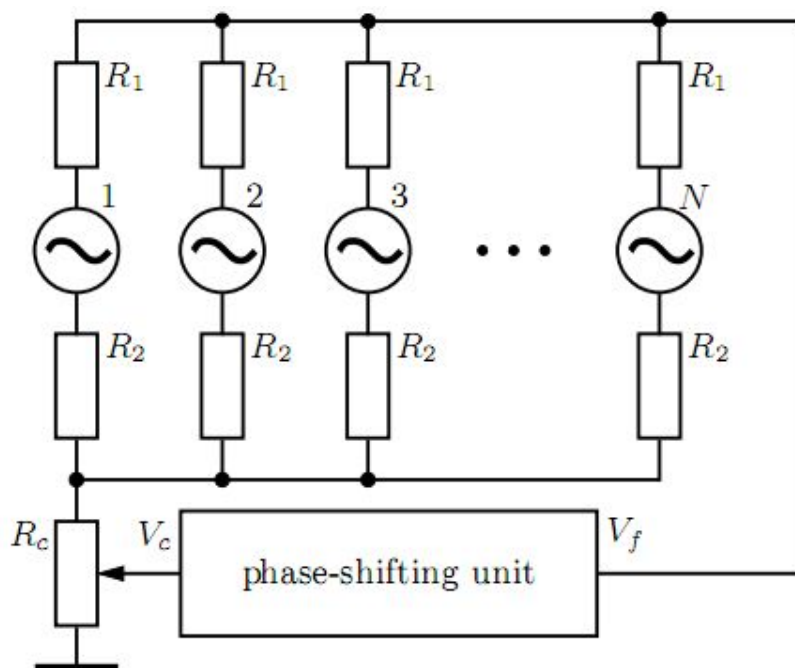


Рисунок 2.4 – Схема глобально связанных генераторов. Индивидуальные генераторы показаны символами, детальная схема которых показаны на рисунке 2.3. Схема фазосдвигающей цепи показана на рисунке 5.

В таблице 1 показаны значения радиокомпонентов, использованных в генераторе с мостом Вина и создании глобальной связи. Элементы фазосдвигающей цепи показано отдельно.

Фазосдвигающая цепь имеет линейную и нелинейную части (Рисунок 5). Линейная часть состоит из стандартной  $RC$  цепи. Нелинейная часть представляет собой фильтр верхних частот, где нелинейная характеристика диодов обеспечивает разность фаз между входным и выходным сигналами в зависимости от амплитуды входного сигнала. Экспериментально снятые характеристики линейной и нелинейной фазовращающей цепей показаны соответственно на рисунках 2.6 и 2.7.

На первом линейном каскаде (1) обеспечивается начальный постоянный сдвиг фазы меньше чем  $\pi/2$ , причем этот сдвиг мы можем менять варьируя

Таблица 1 – Значения радиокомпонентов, использованных в эксперименте

Символ	Параметр	Значение	Ед.изм ерения
$R_1$	Резистор глобальной обратной связи	$62.0 \pm 10\%$	кОм
$R_2$	Резистор на выходе генераторов	$1.0 \pm 10\%$	кОм
$R_3$	Резистор моста Вина	$2.2 \pm 10\%$	кОм
$R_4$	Подстроечный резистор моста Вина (с помощью этого резистора меняем частоту отдельного генератора)	$2.2 \pm 10\%$	кОм
$R_5$	Резистор локальной обратной связи генератора		кОм
$R_6$	С помощью этого подстроечного резистора регулируем амплитуду каждого генератора	$5.0 \pm 10\%$	кОм
$R_7$	Резистор последовательно подключенный к диодам	$40.0 \pm 20\%$	кОм
$R_c$	Резистор связи	$10.0 \pm 10\%$	кОм
$C_1, C_2$	Конденсаторы моста Вина	$51.0 \pm 10\%$	нФ
$D_1, D_2$	Диоды для грубой настройки коэффициента усиления	1N4148	...
$U_1$	Операционный усилитель	AD822	...



сопротивление потенциометра. На втором нелинейном каскаде добавляется нелинейный сдвиг фазы в зависимости от амплитуды входного сигнала.

Характеристики линейного каскада таковы, что при любых частотах коэффициент усиления равен единице. В целом, меняя сопротивление потенциометра можно добиться линейного сдвига от  $0.12\pi$  до  $\pi$ . Как видно из рисунка 2.6, для линейной части фазосдвигающей цепи разность фаз между входным и выходными сигналами остается постоянной.

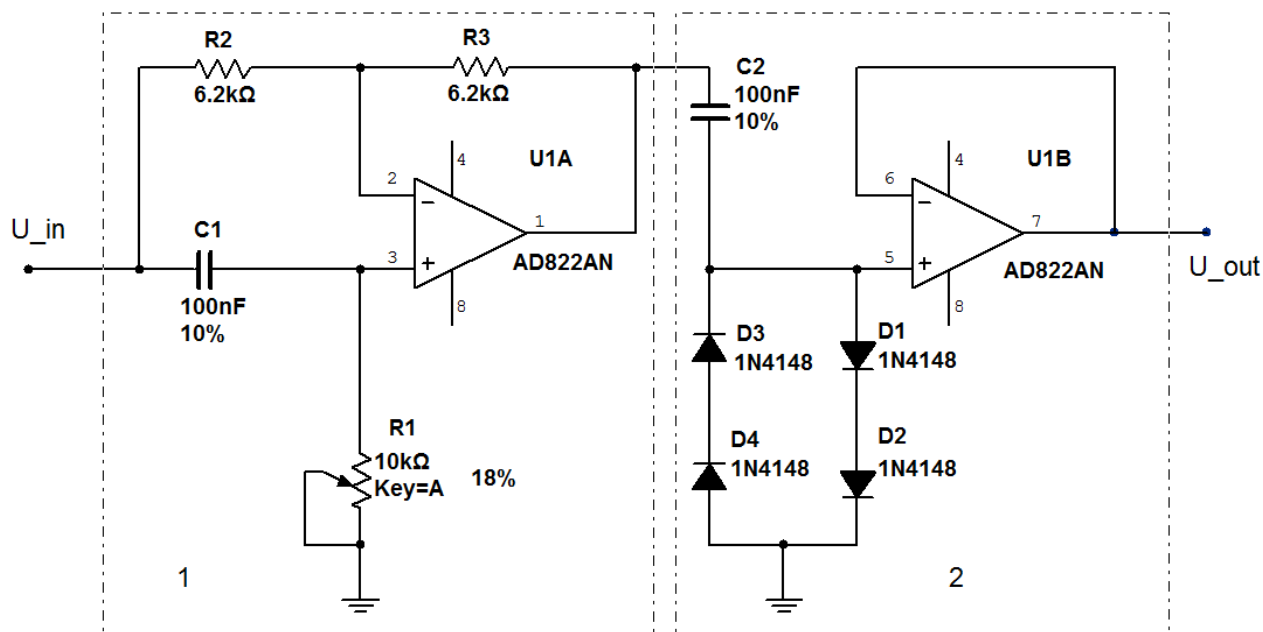


Рисунок 5 – Принципиальная схема линейной (1) и нелинейной (2) фазосдвигающей цепей

Рисунок 7 показывает, что при малых амплитудах сдвиг фазы остается постоянным, т.е. работает только линейный каскад фазосдвигающей цепи. Начиная с определенного значения амплитуды входного сигнала нелинейный каскад начинает вносить свой вклад в разность фаз, делая характеристику нелинейной. В следующей главе будет показано, что именно нелинейный сдвиг фазы колебаний среднего поля в зависимости от их амплитуды приводит к новым интересным эффектам.

Создание нелинейного фазосдвигающего преобразователя, который обеспечивает нелинейность глобальной связи, также является один из основных результатов данной работы.

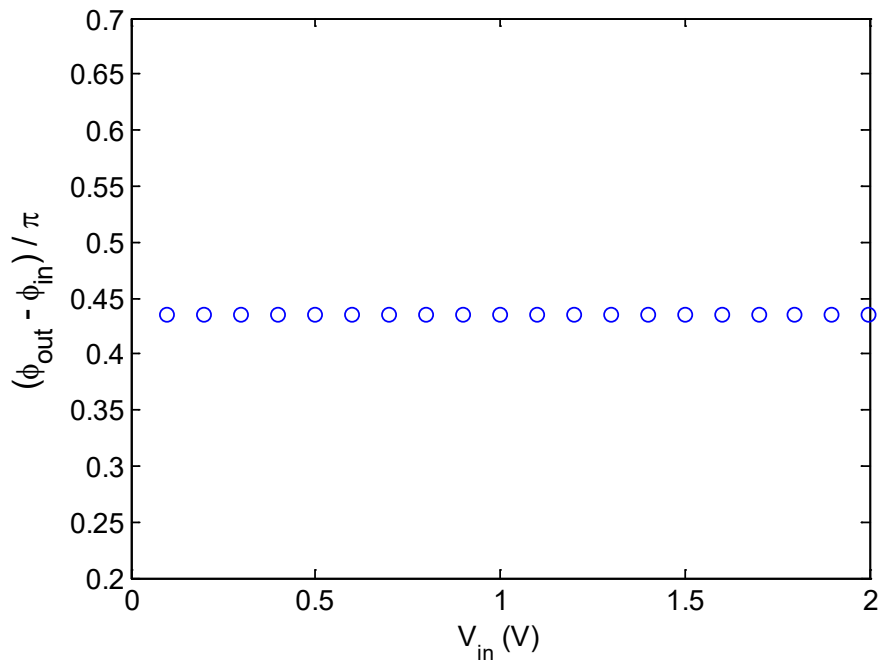


Рисунок 6 – Экспериментально снятая характеристика линейной фазосдвигающей цепи

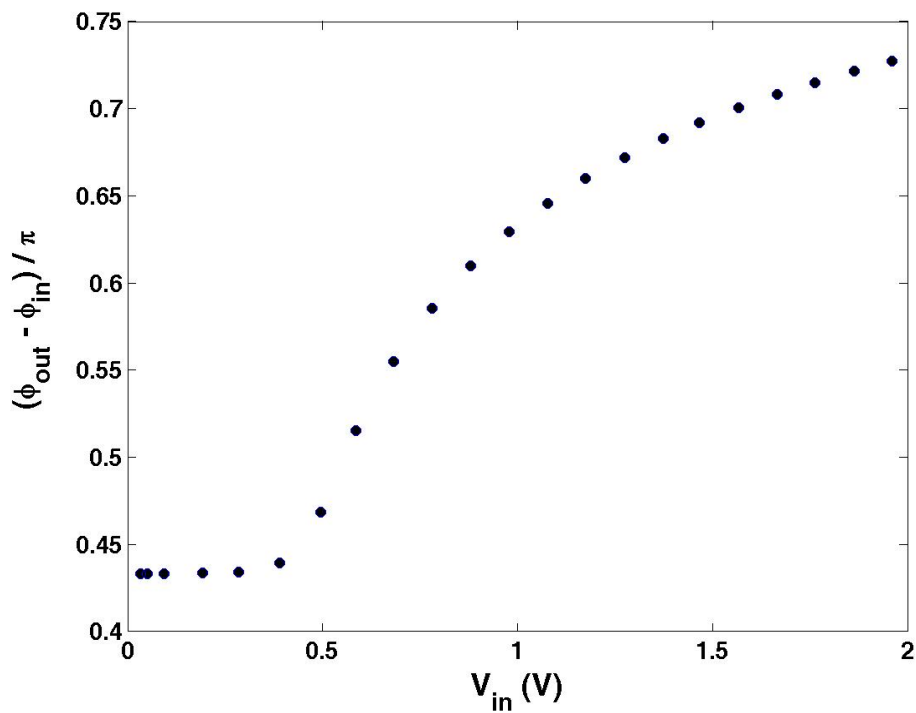


Рисунок 7 – Экспериментально снятая характеристика нелинейной фазосдвигающей цепи

## 2. Заключение

Переход Курамото в глобально связанных осцилляторах представляет собой универсальный принцип, объясняющий, как синхронизация может возникнуть в системе разнородных осцилляторов под действием глобальных связей. Эта модель имеет широкое применение, от нейробиологии до инженерии и сетевого анализа, и продолжает служить основой для исследований синхронизации в сложных системах.

### Список использованных источников

1. Temirbayev A., Zhanabaev Z., Tarasov S., Ponomarenko V., Rosenblum M., Experiments on oscillator ensembles with global nonlinear coupling, //Phys. Rev. E.-2012.-Vol. 85, p. 015204 (R).
2. Жанабаев З.Ж., Темирбаев А.А., Тарасов С.Б., Розенблюм М., Алмасбеков Н.Е., Синхронизация в ансамбле нелинейно связанных радиотехнических генераторов//Вестник КазНУ. Серия физическая. №1(36). 2011г. стр. 76-82.
3. Zhanabaev Z., Temirbayev A., Tarasov S., Nalibayev Y. Experimental study of an oscillator ensemble with global and nonlinear coupling// Eurasian physical technical journal, volume 8, No.2(16), 2011.
4. Жанабаев З.Ж., Розенблюм М., Темирбаев А.А., Тарасов С.Б., Алмасбеков Н.Е. Схемотехническое исследование синхронизации в ансамбле глобально связанных генераторов // Журнал проблем эволюции открытых систем.-2010.-Т.2, вып. 12.- С. 41-46.
5. Temirbayev A., Zhanabaev Z., Tarasov S., Ponomarenko V., Rosenblum M., Experimental Observation of Quasiperiodic Dynamics in Globally Coupled Oscillator Ensembles//20-th Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, July 11-13, 2012, pp. 157-160., Wolfenbuttel, Germany.