

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 9. Синхронизация в электрических и механических осцилляторах.**

**Цель лекции:** Рассмотреть основы синхронизации в электрических и механических осцилляторах, их характеристики и механизмы взаимодействия, а также примеры практического применения в технике и науке.

### **1. Введение в синхронизацию осцилляторов**

Синхронизация — это процесс, при котором две или более колебательные системы начинают взаимодействовать таким образом, что их частоты и фазы приходят в согласование. Принцип синхронизации встречается в природе повсеместно: от биологических систем, таких как сердцебиение, до электронных цепей и маятников. Для электрических и механических осцилляторов синхронизация играет важную роль в обеспечении согласованной работы систем, и её можно наблюдать как в простых, так и в сложных инженерных устройствах.

Синхронизацию в осцилляторах можно разделить на:

- **Полную синхронизацию**, при которой частоты и фазы колебаний осцилляторов полностью совпадают.
- **Частичную или фазовую синхронизацию**, когда частоты остаются равными, но фазы могут отличаться на постоянную величину.
- **Частотную синхронизацию**, при которой частоты приходят к общему значению, а фазы продолжают изменяться независимо.

### **2. Синхронизация в электрических осцилляторах**

Электрические осцилляторы, такие как LC-цепи, генераторы, кристаллические осцилляторы, играют важную роль в работе радиопередатчиков, компьютеров и систем связи. Синхронизация в электрических осцилляторах позволяет стабилизировать их частоту и фазу, что необходимо для передачи и обработки сигналов.

#### **2.1 Принцип работы электрических осцилляторов**

Электрический осциллятор — это схема, способная к автономным колебаниям, возникающим за счёт постоянного обмена энергией между элементами цепи, такими как конденсаторы и индуктивности в LC-цепи. Например, генератор переменного тока может быть построен на основе LC-контура, где конденсатор и катушка индуктивности поочередно обмениваются энергией, создавая колебания с собственной частотой.

#### **2.2 Механизм синхронизации электрических осцилляторов**

Синхронизация электрических осцилляторов обычно осуществляется путём их подключения к источнику сигнала с определённой частотой или посредством связи между осцилляторами. При этом внешний сигнал «притягивает» частоты осцилляторов к своей частоте. Такой вид синхронизации применяется в генераторах радиосигналов, микропроцессорах и других устройствах, где требуется точная и устойчивая частота.

Существует два основных механизма синхронизации:

- **Внешняя синхронизация**, когда осциллятор подчиняется сигналу с заданной частотой, поступающему от внешнего источника.
- **Взаимная синхронизация**, когда два или более осциллятора воздействуют друг на друга и приходят к единой частоте и фазе.

### 2.3 Примеры и применение синхронизации в электрических осцилляторах

Синхронизация электрических осцилляторов находит применение во множестве технологий:

- **Часы и таймеры**: генераторы кварцевых часов синхронизированы с сетевым током или атомными стандартами для поддержания точного времени.
- **Телекоммуникации**: в радиотехнике и системах связи синхронизация генераторов необходима для передачи стабильного и устойчивого сигнала.
- **Цифровые схемы**: микропроцессоры работают синхронно благодаря тактовому генератору, который задает ритм работы всей системы.

## 3. Синхронизация в механических осцилляторах

Механические осцилляторы, такие как маятники, пружинные системы и вращающиеся колеса, демонстрируют свои особенности синхронизации, которые впервые были замечены в наблюдениях за маятниками. Например, знаменитый голландский физик Христиан Гюйгенс в XVII веке обнаружил, что два маятника, установленных на одной раме, со временем синхронизировали свои колебания.

### 3.1 Принцип работы механических осцилляторов

Механический осциллятор состоит из массы, которая колеблется под действием силы восстановления, например, гравитации или упругости пружины. При отклонении от положения равновесия масса движется в противоположную сторону, совершая колебания с определённой амплитудой и частотой.

### 3.2 Механизм синхронизации механических осцилляторов

В механических осцилляторах синхронизация происходит, когда осцилляторы передают энергию друг другу через упругую или жёсткую связь. Например, если два маятника установлены на одной общей раме, их колебания начинают взаимодействовать через передачу вибраций, что приводит к синхронизации. Также можно использовать электромагнитные взаимодействия или вязкостные связи.

### 3.3 Примеры и применение синхронизации в механических осцилляторах

Синхронизация механических осцилляторов встречается в следующих системах:

- **Часы:** в часах с маятниками синхронизация поддерживает равномерный ход и точное измерение времени.
- **Мосты:** вибрации моста могут вызвать синхронизацию движений людей или транспорта, что потенциально может привести к резонансу и разрушению конструкции.
- **Волновые генераторы:** механические генераторы волн, например, в морских установках, могут синхронизироваться для эффективного использования энергии.

## 4. Математические модели синхронизации

Для описания синхронизации электрических и механических осцилляторов используются математические модели, такие как:

- **Уравнение Ван дер Поля** для описания нелинейных автоколебательных систем.
- **Модель Курамото** для систем с большим числом осцилляторов.

**Уравнение Ван дер Поля:**

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2)\frac{dx}{dt} + \omega^2x = 0$$

где  $x$  — отклонение от положения равновесия,  $\mu$  — коэффициент нелинейности,  $\omega$  — частота.

Это уравнение описывает автоколебания и эффект стабилизации, возникающий при синхронизации.

**Модель Курамото:**

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i),$$

где  $\theta$  — фаза осциллятора  $i$ ,  $\omega_i$  — его собственная частота,  $K$  — коэффициент связи.

Эта модель описывает, как осцилляторы с разными частотами приходят к фазовой синхронизации за счет глобальной связи между ними.

## 5. Важность синхронизации в технике и природе

Синхронизация электрических и механических осцилляторов имеет фундаментальное значение в науке и технике:

- **Надёжность систем:** синхронизация повышает устойчивость систем к сбоям, так как осцилляторы работают согласованно.
- **Эффективность передачи сигналов:** в радиосвязи синхронизация генераторов уменьшает интерференцию и искажения.
- **Энергосбережение:** согласованная работа осцилляторов снижает потребление энергии, особенно в механических системах.

## Заключение

Синхронизация в электрических и механических осцилляторах представляет собой ключевое явление, определяющее эффективность и надёжность различных устройств. Изучение синхронизации важно не только для фундаментальных исследований, но и для разработки новых технологий в радиоэлектронике, энергетике, часовом деле и даже в архитектуре.

## Список использованных источников

1. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J., Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.-508p.
2. Rosenblum M., Pikovsky A., Self-organized quasiperiodicity in oscillator ensemble with global nonlinear coupling //Phys. Rev. Lett.- 2007.-Vol. 98, №6.- P.064101(4).
3. Греченко Т.Н., Психофизиология: учебное пособие. – М.: Гайдарики, 1999. – 358 с.
4. Aschoff J., Daan S., Groos G.A., Vertebrate Circadian Systems. Structure and Physiology.- Berlin: Springer,1982.-250p.
5. Moore R.Y., A clock for the ages //Science.- 1999.-Vol. 284.-P.2102-2103.

6. Golomb D., Hansel D., Mato G., Mechanisms of synchrony of neural activity in large networks in Neuroinformatics and Neural Modeling, ser. Handbook of Biological Physics, F. Moss and S. Gielen, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2001.- Vol. 4, pp. 887–968.
7. Strogatz S. H., From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators //Physica D.- 2000.-Vol.143, no. 1-4, pp. 1–20.
8. Ott E., Chaos in Dynamical Systems. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2nd edition, 2002.
9. Kuramoto Y., Chemical Oscillations, Waves and Turbulence. Berlin: Springer, 1984.
10. 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).
11. 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.
12. 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