

# Передача цифрового сигнала в системе связанных хаотических осцилляторов

В. К. Соколова, А. В. Кондрашов, А. Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** представлены результаты экспериментального исследования приемо-передающей системы, построенной на генераторах динамического хаоса. В основе принципа передачи лежит процесс переключения хаотических режимов. Прием сигнала осуществляется за счет эффекта хаотической синхронизации. В результате исследования определена связь между длительностью передаваемых импульсов и эффективностью работы приемо-передающей системы. При передаче импульсов длительности менее 5 мс резко возрастало число ошибок принятого сигнала. Основной причиной их возникновения оказался рост времени, в течении которого хаотические генераторы передатчика и приемника переходили в синхронный режим. В случаях, когда синхронизация не возникала или была слишком кратковременной, выделяемый приемником информационный сигнал был сильно разрушен шумом.

**Ключевые слова:** динамический хаос, телекоммуникационная система, хаотическая синхронизация

## 1. Введение

Динамический хаос представляет большой интерес для исследователей, поскольку он может быть использован при разработке телекоммуникационных систем [1-3], для генерации случайных чисел [4], шифрования изображений [5] и др. Основным преимуществом приемопередающих систем на хаосе является высокий уровень конфиденциальности. Значительное число ныне известных приемо-передающих систем построено на явлении хаотической синхронизации, заключающемся в полном совпадении форм временных реализаций в связанных хаотических генераторах [6].

В настоящей работе была сконструирована приемо-передающая система на основе связанных хаотических генераторов Чуа [7]. В качестве информационного сигнала была выбрана периодическая последовательность прямоугольных импульсов. Передача производилась путем переключения между двумя хаотическими генераторами. В основе принципа работы приемника лежала хаотическая синхронизация. Проведена компьютерная обработка принятого хаотического сигнала и оценено время переключения между синхронным и несинхронным режимами.

## 2. Экспериментальный макет

На рисунке 1 представлена экспериментальная схема телекоммуникационной системы. Передатчик состоял из двух хаотических генераторов Чуа и переключателя на основе микросхемы ADG919.

Хаотические генераторы были сконструированы по схеме описанной в работе [7]. Они состояли из конденсаторов  $C_{11} = C_{12} = 10$  нФ и  $C_{21} = C_{22} = 100$  нФ, катушек индуктивности  $L_1 = L_2 = 18.4$  мГн, нелинейных резисторов  $N_{R1}, N_{R2}$  и резисторов  $R_1, R_2$ , значения сопротивлений которых отличались для генератора 1 и генератора 2, но обеспечивали хаотическую генерацию. Нелинейный резистор был построен по схеме, описанной в работе [1]. В качестве выходных сигналов генераторов использовались сигналы, снимаемые с конденсаторов  $C_{11}$  и  $C_{12}$ .

Выходы хаотических генераторов подключались через повторители на операционных усилителях к радиочастотным входам переключателя (RF1, RF2).

Выходом передатчика являлся выходной порт переключателя (RFC). Информационный сигнал подавался на логический вход переключателя (CTRL).

Для проведения экспериментального исследования источником информационного сигнала был выбран генератор прямоугольных импульсов. Высокое значение напряжения соответствовало логической «1», низкое – логическому «0». При подаче «1» хаотический сигнал с генератора 1 подавался через переключатель на выход передатчика. При подаче «0» выход передатчика соединялся с генератором 2. Таким образом сигнал в цепи связи представлял собой периодическую последовательность хаотических временных реализаций с разных генераторов. Отметим, что параметры  $R_1$  и  $R_2$  подбирались такими, чтобы генерируемые ими сигналы были схожими во временной и спектральной областях. Сигнал с выхода передатчика через цепь связи подавался на вход приемника.

Цепь связи представляла собой резистор  $R_C$  и повторитель на операционном усилителе. Резистор учитывал потери в цепи связи. Повторитель обеспечивал направленность связи передатчика и приемника.

Приемник представлял собой хаотический генератор Чуа. Он состоял из конденсаторов  $C_{13} = 10$  нФ и  $C_{23} = 100$  нФ, катушки индуктивности  $L_3 = 18.4$  мГн, нелинейного резистора  $N_{R3}$  и резистора  $R_3$ . Сигнал из цепи связи подавался на конденсатор  $C_{23}$ . Сопротивление  $R_3$  подбиралось таким образом, чтобы обеспечивать хаотическую синхронизацию с генератором 2 при условии отсутствия синхронизации с генератором 1. Нелинейный резистор был аналогичен использованному в передатчике. В качестве выходного сигнала приемника использовался сигнал, снимаемый с конденсатора  $C_{23}$ .

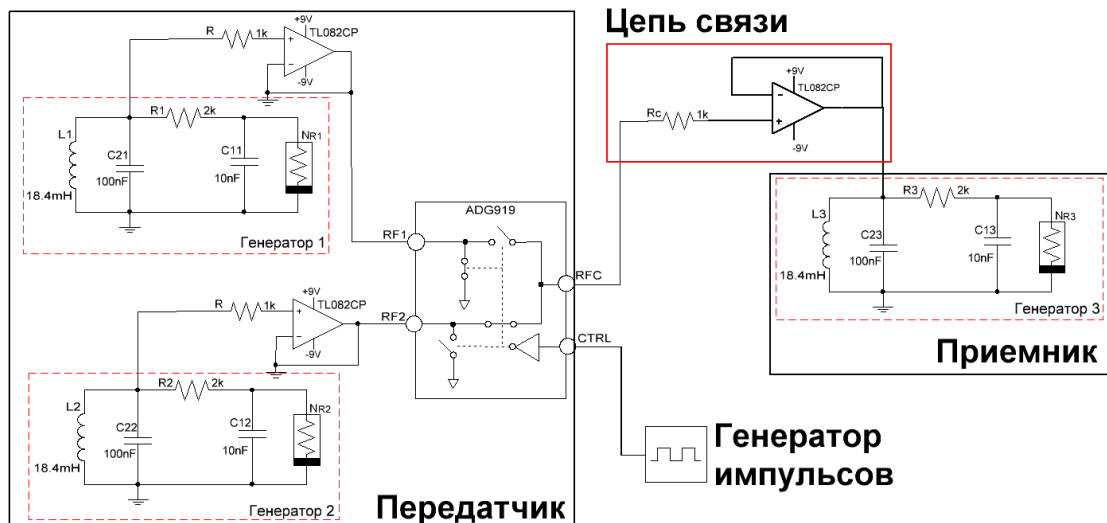


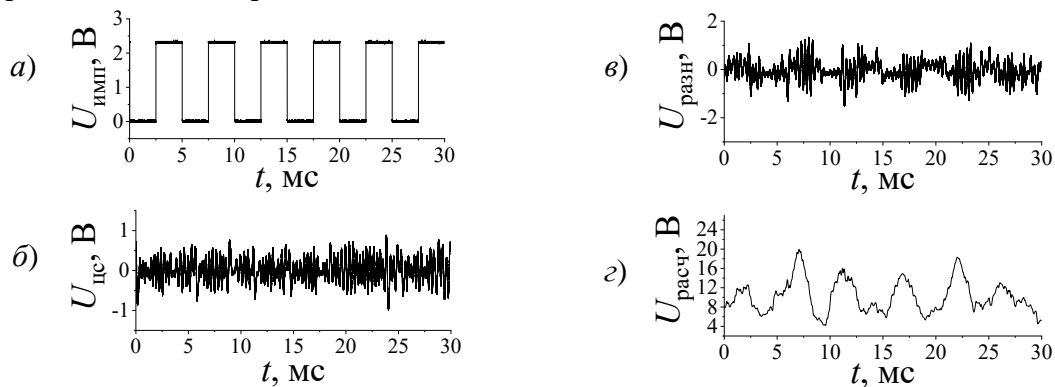
Рисунок 1. Схема экспериментального макета приемо-передающей системы

При проведении эксперимента в качестве входного сигнала использовались прямоугольные импульсы длительностью 80 мс, 40 мс, 20 мс, 10 мс, 5 мс, 2.5 мс и 1.25 мс. Для каждой длительности импульсов  $T$  измерялись выходной сигнал генератора 2, сигнал на выходе передатчика и выходной сигнал приемника.

### 3. Результаты эксперимента и их анализ

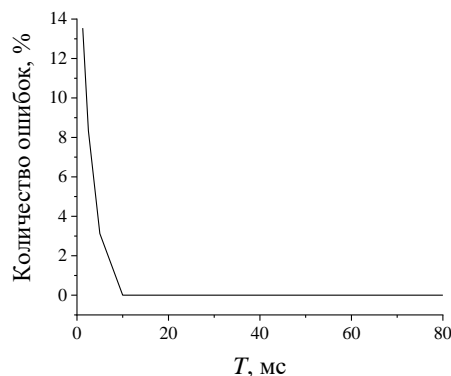
Результаты эксперимента для различных длительностей импульсов были схожими, поэтому подробно опишем только результат, полученный для  $T = 5$  мс. На рисунке 2(a) представлена исходная последовательность прямоугольных импульсов. Скважность равнялась 2, амплитуда импульсов – 2 В. На рисунке 2(б) изображен

сигнал в цепи связи. Можно заметить, что по данной временной реализации затруднительно определить, сигнал с какого генератора передается в тот или иной момент времени. На рисунке 2(в) представлена разность выходного сигнала приемника и выходного сигнала генератора 2. Из рисунка видно, что логическим «1» передаваемого сигнала соответствуют хаотические импульсы с низкой амплитудой, а «0» - с высокой. Данный эффект объясняется возникновением и разрушением хаотической синхронизации между генераторами передатчика и приемника. Таким образом, если сигнал имеет амплитуду, близкую к нулю, значит он передавался с генератора 2. Если же амплитуда имеет значение, отличное от нуля, то сигнал передавался с генератора 1. На рисунке 2(г) можно увидеть импульсы, полученные в результате компьютерной обработки экспериментально полученного сигнала. Обработка сигнала производилась методом скользящего окна.



**Рисунок 2.** Временная реализация при длительности импульса 5 мс а) исходная последовательность импульсов; б) сигнал на выходе передатчика; в) разность сигнала на ведомом генераторе и ведущем генераторе; г) восстановленная последовательность импульсов

Используя временную реализацию, полученную в результате компьютерной обработки, и исходную последовательность импульсов, было определено число ошибок, возникающих при передаче. На рисунке 3 показан график зависимости числа ошибок по отношению к общему числу передаваемых импульсов. Из рисунка видно, что с ростом длительности импульса число ошибок снижается. При длительности импульса больше 10 мс число ошибок становится равно нулю. При длительности импульса меньше 5 мс число ошибок резко возрастает.



**Рисунок 3.** Зависимость количества неправильно определенных импульсов от длительности импульса

По временным реализациям восстановленных импульсов можно оценить время перехода из несинхронного режима работы в синхронный и наоборот. Для этого все фронты и срезы восстановленных импульсов были построены на одном графике. Затем

для более наглядного представления переключения импульсов был построен график плотности точек временных реализаций. Изображения полученные для 80 и 5 мс, представленный на рисунке 4.

При длительности импульса 80 мс время перехода составило  $20 \pm 10$  мс. Таким образом время синхронной работы связанных генераторов составило три четверти длительности передаваемого импульса. Благодаря этому выходные импульсы было легко идентифицировать. При 5 мс время перехода составило примерно  $3.3 \pm 0.5$  мс. Таким образом за время импульса генераторы находились в синхронном режиме только одну пятую часть длительности импульса. С учетом не идеальности синхронизации генераторов это приводило к появлению ошибок при передаче. При меньших длительностях импульсов время перехода становилось практически равным длительности импульса, что и приводило к резкому росту числа ошибок.

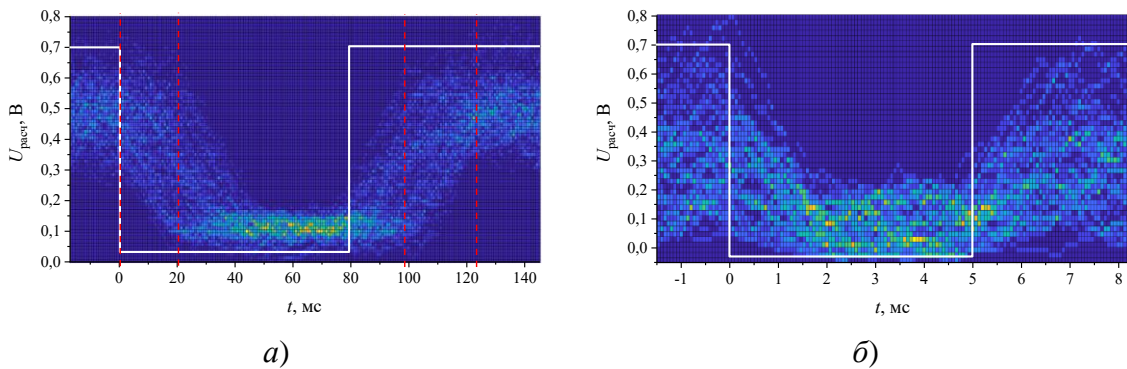


Рисунок 4. Срез и фронт импульсов при а)  $T = 80$  мс и б)  $T = 5$  мс

На рисунке 5 представлен график зависимости времени перехода от длительности импульса. Из данного графика видно, что при уменьшении длительности импульса отношение времени перехода к длине импульса растет. Связано это с тем, что при большой длительности импульса хаотический генератор успевает перейти в устойчивое синхронное состояние. При подаче коротких импульсов переключение режимов происходит слишком часто, и система связанных генераторов не успевает перейти в устойчивое состояние, из-за чего время перехода заметно возрастает.

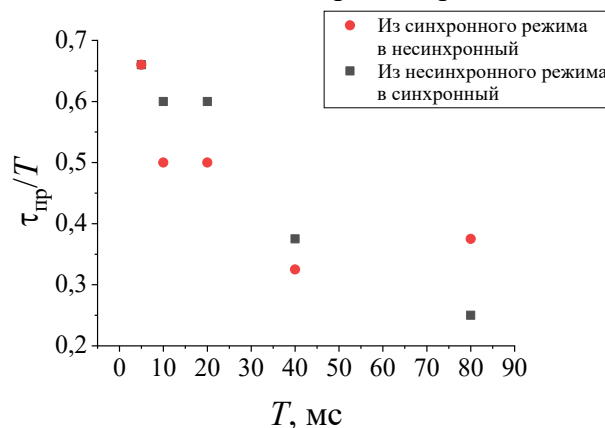


Рисунок 5. График зависимости времени перехода от длительности импульса

#### 4. Заключение

Была разработана и экспериментально исследована схема, реализующая передачу последовательности прямоугольных импульсов в приемо-передающей системе на связанных хаотических генераторах Чуа. Экспериментальное исследование показало, что предложенная схема может работать при длительности импульсов до 5 мс.

Установлена зависимость времени перехода из режима хаотической синхронизации в несинхронный режим и обратно в зависимости от длительности импульсов передаваемой последовательности.

#### Список литературы

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи //М.: Физматлит. – 2002. – 252 с.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы //М.: Дрофа. – 2006. – 719 с.
3. Baptista M. S. et al. Transmission of information and synchronization in a pair of coupled chaotic circuits: An experimental overview //The European Physical Journal Special Topics. – 2008. – V. 165. – №. 1. – P. 119-128.
4. Akgul A., Li C., Pehlivan I. Amplitude control analysis of a four-wing chaotic attractor, its electronic circuit designs and microcontroller-based random number generator //Journal of Circuits, Systems and Computers. – 2017. – V. 26. – 1750190 (1-5).
5. Matthews R. A. The use of genetic algorithms in cryptanalysis //Cryptologia. – 1993. – V. 17. – №. 2. – P. 187-201.
6. Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in chaotic systems //Physical review letters. – 1990. – V. 64. – №. 8. – P. 821-825.
7. Chua L. O. et al. A universal circuit for studying and generating chaos. I. Routes to chaos //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. – 1993. – V. 40. – №. 10. – P. 732-744.