

Моделирование программно-аппаратной синхронизации осцилляторов Чуа

К. В. Кузнецов, В. В. Перепеловский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

kvkuznetsov@stud.etu.ru, vvperepelovsky@gmail.com

Аннотация. В статье исследуются особенности синхронизации цифровой и аналоговой моделей хаотических систем Чуа, взаимодействующих по тракту аналого-цифрового преобразования. Рассмотрен вариант однонаправленной хаотической синхронизации. Численная модель осциллятора Чуа основана на методе Эйлера. Представлен анализ процесса синхронизации в зависимости от параметров аналого-цифрового преобразователя. Рассмотрена особенность синхронизации систем с дискретным и непрерывным временем.

Ключевые слова: Схема Чуа, хаотическая синхронизация, хаотические системы, нелинейная динамика, хаос, цифро-аналоговое преобразование, цифровая модель, аналоговая модель

I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно растущие требования, предъявляемые к информационно-телекоммуникационным системам, обуславливают поиски новых путей передачи информационных сигналов. Перспективный метод такой передачи данных основывается на использовании сигналов с хаотической структурой. Такие сигналы обладают повышенной криптографической стойкостью, а в ряде случаев позволяют обеспечить скрытность передачи данных [1–4]. Использование хаотических сигналов предполагает наличие источника сигнала, приемника сигнала и способа синхронизации источника и приемника. В качестве источника и приемника сигнала может выступать осциллятор Чуа. В качестве источника сигнала – аппаратная реализация осциллятора Чуа. В качестве приемника сигнала возможно использовать программную реализацию осциллятора Чуа. Передача данных, в таком исполнении, требует программно-аппаратную синхронизацию источника и приемника. Особенностью такого рода синхронизации является взаимодействие непрерывной и дискретной моделей Чуа. В случае неэквивалентности моделей полная синхронизация не может быть достигнута [5]. Данная особенность может быть применена при решении задачи идентификации систем, или атак на криптосистемы, основанные на хаотических генераторах псевдослучайных чисел.

Целью настоящей статьи является анализ особенностей программно-аппаратной синхронизации осцилляторов Чуа.

II. ОСЦИЛЛЯТОРЫ ЧУА

В работе используется осциллятор Чуа, представленный электрической схемой на рис. 1, демонстрирующей режимы хаотической динамики. [6] Схема состоит из конденсаторов C1 и C2, катушки индуктивности L, резистора R и диода Чуа – N_R .

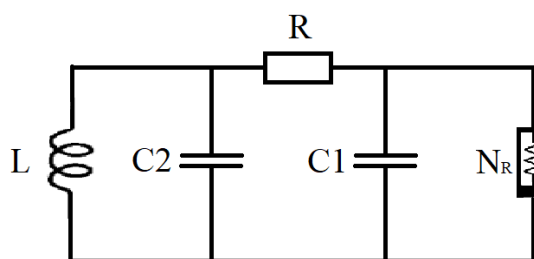


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема Чуа

Существуют несколько режимов синхронизаций осцилляторов и видов их соединений. В данной работе исследуется режим полной синхронизации [2] – это режим, при котором достигается совпадение векторов состояния взаимодействующих систем. Соединены осцилляторы однонаправленной связью. Математическая модель синхронизации описывается двумя системами дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{cases} dx_1/dt = \alpha_1 [y_1 - x_1 - h(x_1)], \\ dy_1/dt = x_1 - y_1 + z_1, \\ dz_1/dt = -\beta_1 y_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} dx_2/dt = \alpha_2 [y_2 - x_2 - h(x_2)], \\ dy_2/dt = x_2 - y_2 + z_2 + \gamma [(x_1 - x_2) - (y_1 - y_2) + (z_1 - z_2)], \\ dz_2/dt = -\beta_2 y_2, \end{cases} \quad (2)$$

где система (1) описывает ведущий осциллятор, а $x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1$ – его значения и параметры соответственно; система (2) описывает ведомый осциллятор, а $x_2, y_2, z_2, \alpha_2, \beta_2$ – его значения и параметры соответственно; γ – коэффициент связи между осцилляторами; $h(x)$ – кусочно-линейная функция, описывающая диод Чуа.

Расчеты производились методом Эйлера. [8]

III. ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ СИНХРОНИЗАЦИИ ОТ РАЗРЯДНОСТИ АНАЛОГОВО – ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ МЕЖДУ ОСЦИЛЛЯТОРАМИ ЧУА

Блок-схема программно-аппаратной синхронизации осцилляторов Чуа, представленная на рис. 2, содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В связи с наличием АЦП процесс синхронизации осцилляторов может зависеть от ряда параметров АЦП, таких как: число разрядов, время преобразования, частоты дискретизации и др. [9]

АЦП выполняет 3 основных операции:

- дискретизация входного воздействия;
- квантование по уровню;
- кодирование информации в двоичный код.

В данной работе было произведено моделирование процесса синхронизации в среде «LabView», с учетом аналого-цифрового преобразования. Исследовалась зависимость степени синхронизации двух систем от разрядности АЦП. Мерой (степенью) полной синхронизации двух осцилляторов служила величина дисперсии, рассчитываемая по формуле:

$$D = \sum_{n=1}^N (x_{1_n} - x_{2_n})^2 / N \quad (3)$$

где D – степень синхронизации, N – число итераций метода Эйлера, n – номер итерации (номер шага интегрирования).

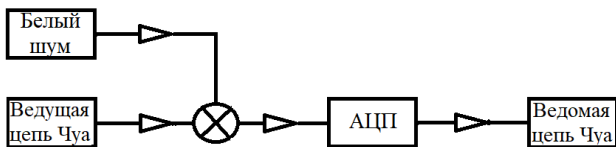


Рис. 2. Модель исследования процесса синхронизации осцилляторов Чуа

При исследовании была рассчитана величина дисперсии для различных значений разрядности АЦП и коэффициента связи. Параметры и начальные значения системы фиксированы. Полученные зависимости, представленные на рис. 3, позволяют подобрать нужные параметры АЦП для необходимой степени синхронизации осцилляторов Чуа.

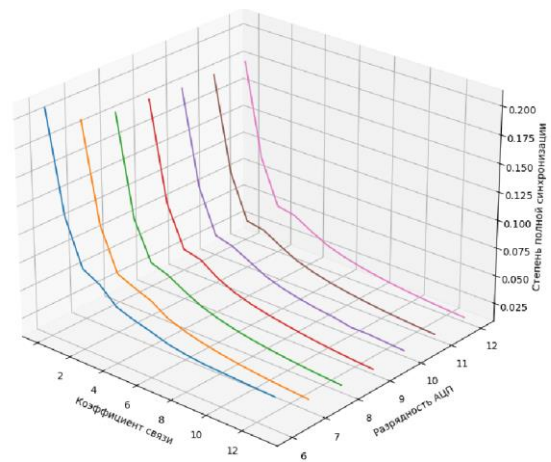


Рис. 3. Зависимость степени синхронизации от разрядности АЦП и коэффициента связи между осцилляторами Чуа, при N = 5000

IV. ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ СИНХРОНИЗАЦИИ ОТ ШАГА ИНТЕГРИРОВАНИЯ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ЧУА

Моделирование синхронизации двух осцилляторов Чуа, представленных в цифровом виде позволяет точное задание параметров двух систем. Однако, в рамках программно-аппаратного экспериментального стенда добиться точного задания всех параметров аппаратной части систем, крайне затруднительно. Поэтому исследовалась синхронизация при различии начальных фаз и шагах интегрирования синхронизируемых цепей Чуа.

При исследовании зависимости степени синхронизации от разности начальных фаз двух осцилляторов было выявлено, что при достаточно большом количестве итераций зависимость от начальных фаз является слабой, данный результат отмечен в работах. [10–11]

Численное исследование синхронизации при различии в шагах интегрирования синхронизируемых цепей Чуа представлено на рис. 4. Ведущая модель цепи Чуа (численная модель схемы, показанной на рис. 1) имела шаг интегрирования 10^{-6} .

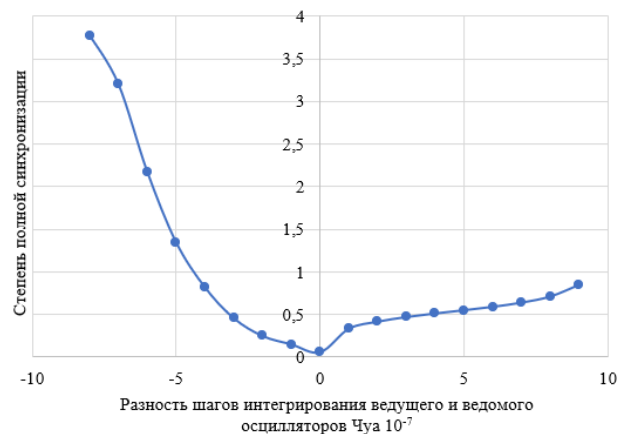


Рис. 4. Зависимость синхронизации цепей Чуа от разности шагов интегрирования ведущего и ведомого осциллятора

Численный анализ (рис. 4) показывает необходимость тщательного подбора шага интегрирования у ведомой системы Чуя.

Кроме различия в параметрах двух систем, в реальных электрических схемах присутствуют шумы. Исследование влияния шума на процесс программно-аппаратной синхронизации показал устойчивость программно-аппаратной системы к шумам, полученный результат соответствует работе. [2]

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, показана возможность синхронизации аналоговой и численной моделей осцилляторов Чуя. Произведен анализ процесса синхронизации в зависимости от параметров АЦП. Исследована зависимость степени программно-аппаратной синхронизации от разности шагов интегрирования ведущего и ведомого осциллятора Чуя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гребенев, М.С., Кондрашов А.В., Перепеловский В.В. Передача двоичных данных на хаотически сформированных несущих частотах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника 5 (2018): 5-12.
- [2] Короновский Алексей Александрович, Москаленко Ольга Игоревна, Храмов Александр Евгеньевич. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации. // Успехи физических наук 179.12 (2009): 1281-1310.
- [3] Соколова В.К., Кондрашов А.В., Устинов А.Б. Передача цифрового сигнала в системе связанных хаотических осцилляторов // XI Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Сборник докладов. Санкт-Петербург. 30 мая - 3 июня 2022 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 422-426 с.
- [4] R.C. Qiu et al., Cognitive Radio Network for the Smart Grid: Experimental System Architecture, Control Algorithms, Security, and Microgrid Testbed, // IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 724-740, Dec. 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2160101.
- [5] Бутусов Д.Н., Каримов А.И., Тутуева А.В., Красильников А.В., Горяинов С.В., Вознесенский А.С. Гибридное моделирование системы Рёсслера посредством синхронизации аналоговой и дискретной моделей // Программные системы и вычислительные методы. 2018. № 4. С. 1-14. DOI: 10.7256/2454-0714.2018.4.27828
- [6] 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
- [7] Астахов Владимир Владимирович, et al. Управление и синхронизация хаоса в системе связанных генераторов // Радиотехника и электроника 41.11 (1996): 1323-1331.
- [8] Чемодуров В.Т., Сеитжелилов М.С. 4.1. МЕТОД ЭЙЛЕРА // Численные методы в строительстве. 2016. 70-74.
- [9] Федерков Б.Г., Телец В.А., Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоиздат, 1990. 320с
- [10] Шабунин А.В. Управление мультистабильностью и вынужденная синхронизация в связанных автоколебательных системах с бифуркациями удвоенного периода // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика 20.2 (2012): 29-39.
- [11] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. 252 с.