

УДК 621.391.01

П. В. ИВАНЮК, д. ф.-м. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, к. ф.-м. н. Р. Л. ПОЛИТАНСКИЙ,
О. М. ЭЛИЯШИВ

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
E-mail: ivanyukpetro@ukr.net

ХАОТИЧЕСКОЕ МАСКИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ЛЮ

В работе рассчитан спектр показателей Ляпунова для хаотической системы Лю. Показана возможность установки режима синхронизации между генераторами, основанными на исследованной системе. Экспериментально реализована система передачи информации с использованием генераторов хаотических колебаний.

Ключевые слова: хаос, гиперхаос, хаотическое маскирование, хаотическая синхронизация, система Лю, спектр показателей Ляпунова.

Детерминированный хаос применяется в различных отраслях инженерии, в частности в телекоммуникационных системах, базирующихся на этом явлении. Примерами динамических систем с хаотическим поведением могут служить системы Лоренца, Спротта, Ресслера и др. В последние годы были разработаны новые системы, которые при определенных условиях генерируют хаотические и гиперхаотические колебания. В частности, это системы Лю (Liu System) [1, 2] и Чена (Chen's model) [3], являющиеся модификациями системы Лоренца.

Широкополосность, ортогональность, сложность структуры хаотических сигналов и сильная чувствительность к начальным условиям обуславливают перспективность их использования в системах связи для повышения криптоустойчивости. Это делает актуальным исследование их свойств, поиск путей аппаратной реализации генераторов хаотических колебаний и систем связи с их использованием.

Целью настоящей работы является определение значений параметров, при которых в хаотической системе Лю генерируются хаотические, гиперхаотические, квазипериодические и периодические колебания, а также экспериментальная реализация системы передачи информации с использованием схемотехнических решений генераторов хаотических колебаний и системы связи на их основе.

Математическая модель исследуемой системы

Гиперхаотическая система Лю описывается четырьмя нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка следующего вида [2]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x), & \dot{y} &= bx - hxz + \lambda w, \\ \dot{z} &= cx^2 - dz, & \dot{w} &= -ny, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z, w и $a, b, h, \lambda, c, d, n$ — переменные и константы соответственно.

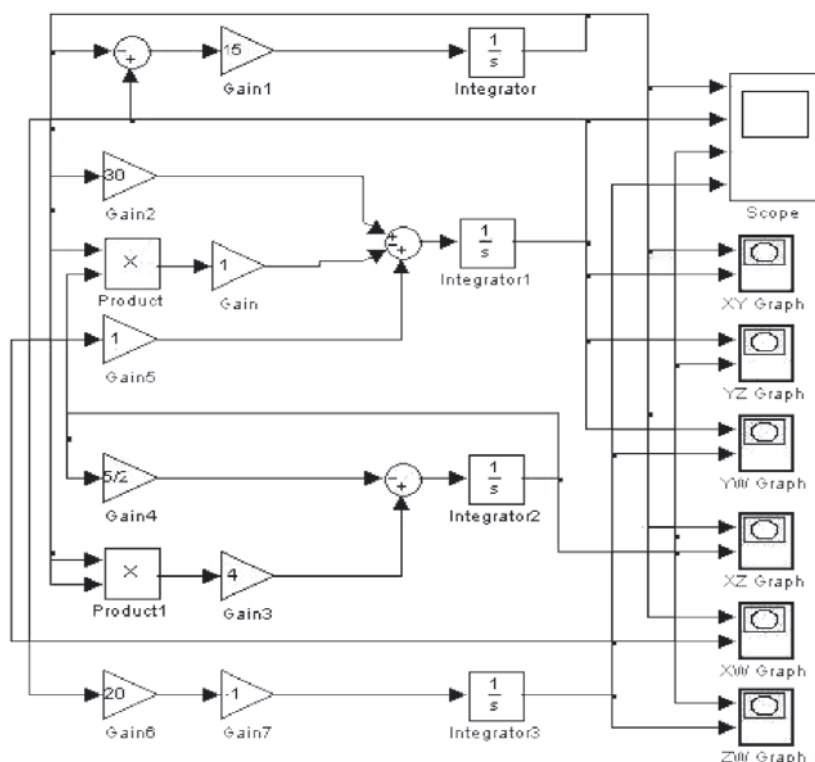


Рис. 1. Matlab-Simulink-модель генератора гиперхаотических колебаний

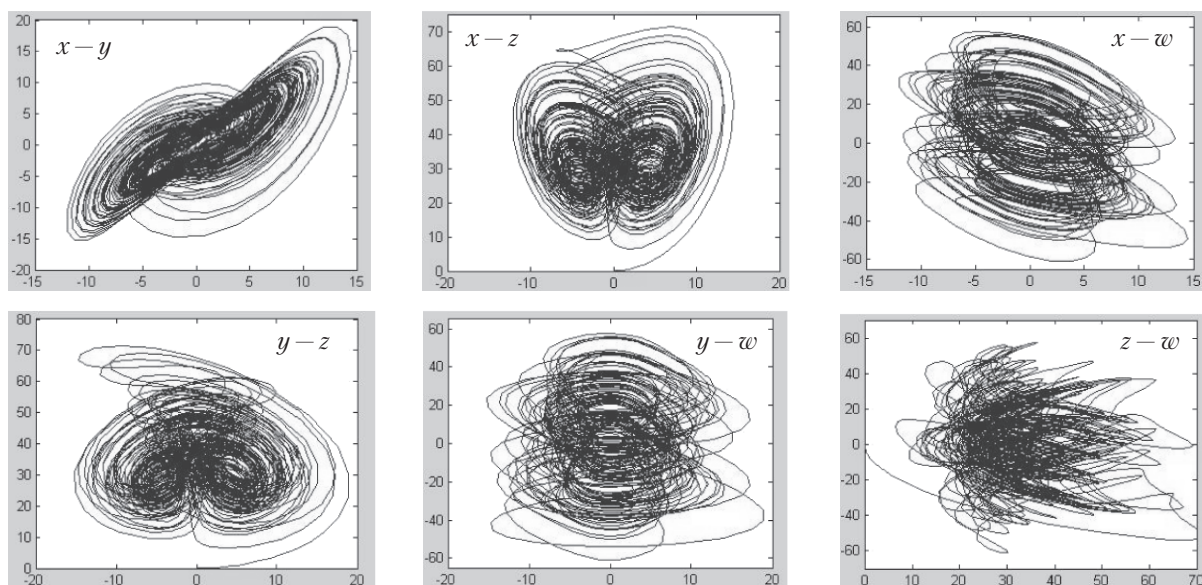


Рис. 2. Фазовые траектории системы в указанных на рисунках плоскостях

Для численного моделирования была разработана Matlab-Simulink-модель генератора гиперхаотических колебаний (рис. 1), состоящая из соединенных между собой блоков усиления, суммирования и вычитания, умножителей, интеграторов и устройств регистрации сигналов. Результаты моделирования системы при значениях параметров $a=15$, $b=30$, $h=1$, $\lambda=1$, $c=4$, $d=2,5$ приведены на рис. 2.

Определение спектра показателей Ляпунова

Существуют два подхода для описания хаотических сигналов [4, с. 26]. При первом считается, что процессы являются детерминированными, т. е. такими, которые реализуются с помощью определенного алгоритма, а их поведение во времени описывается соответствующими математическими выражениями с заданными начальными условиями. При этом определяются фрактальная размерность аттракторов и показатели Ляпунова, являющиеся характеристиками системы. При втором подходе предполагается, что сигнал является случайным и непредсказуемым во времени процессом. В ходе наблюдения за множеством реализаций такого процесса можно оценить некоторые статистические закономерности во временной структуре сигнала, описываемые корреляционной функцией, спектральной плотностью мощности, математическим ожиданием и дисперсией.

Определение спектра показателей Ляпунова дает возможность установить диапазон значений параметров системы, при которых возникают гиперхаотические, хаотические, квазипериодические и периодические колебания.

Показатели Ляпунова характеризуют степень зависимости системы от начальных условий и определяют скорость расхождения ее траекторий в фазовом пространстве. Существует не-

сколько алгоритмов определения показателей Ляпунова. Первый предусматривает отслеживание изменения во времени фазовых траекторий двух динамических систем с близкими начальными условиями. Согласно второму алгоритму необходимо решить систему уравнений динамики, которая описывает движение точки вдоль фазовой траектории, совместно с уравнениями в вариациях, описывающими эволюцию бесконечно малого возмущения этой траектории [5, с. 153]. Первый способ используют в случае невозможности численного решения уравнений в вариациях.

При определении нескольких показателей Ляпунова необходимо отслеживать эволюцию соответствующего количества векторов возмущения вдоль фазовой траектории сигнала. Для системы, описываемой уравнениями (1), это количество равняется четырем.

Показатели Ляпунова исследуемой системы рассчитывались с использованием алгоритма Беннеттина с модификациями [4, 5]. При этом осуществлялось одновременное решение системы дифференциальных уравнений (1) и четырех систем уравнений в вариациях, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1), & \dot{y}_1 &= bx_1 - hx_1 - hxz_1 + \lambda w_1, \\ \dot{z}_1 &= 2cx_1 - dz_1, & \dot{w}_1 &= -ny_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Система из двадцати уравнений решалась численным методом Рунге – Кутты с перенормировкой и ортогонализацией векторов возмущения в процессе вычислений для указанных выше значений параметров a , b , h , λ , c , d . Для каждого значения параметра $n \in (1, 100]$ определялись показатели Ляпунова при нормировании на единицу начальных ортогональных векторов возмущения x_0 , y_0 , z_0 , w_0 . Расчет завершился орто-

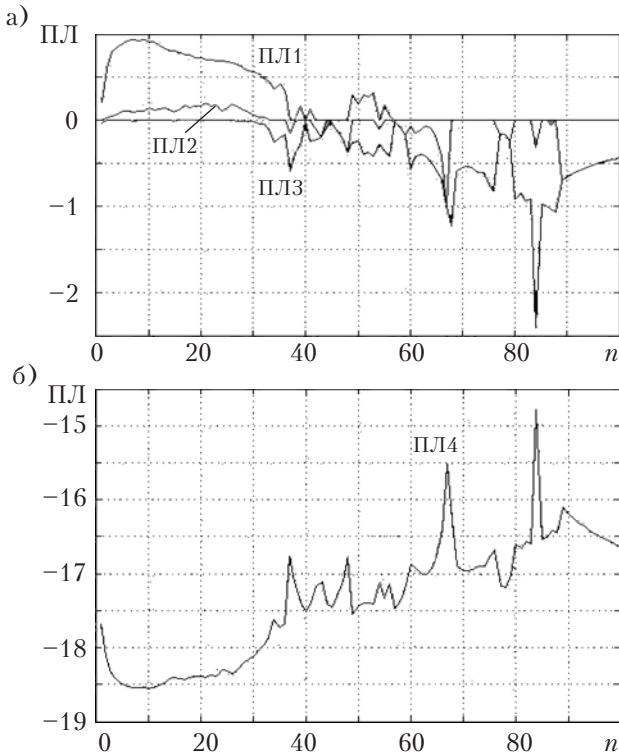


Рис. 3. Спектр показателей Ляпунова для системы уравнений (1):

а – первые три показателя; б – четвертый показатель

гонализацией и нормализацией на фиксированную константу векторов возмущения согласно методу Грамма–Шмидта [6]. Рассчитанный спектр показателей Ляпунова (ПЛ) приведен на рис. 3.

Как следует из рис. 3, б, четвертый ПЛ отрицателен для любого значения n . Его минимальное значение составляет $-18,58$ при $n=10$ и максимальное $-14,78$ при $n=84$.

Периодические колебания имеют место при отрицательных значениях трех показателей Ляпунова и равенстве нулю четвертого. При отрицательных значениях двух ПЛ и двух нулевых значениях наблюдаются квазипериодические колебания. Хаотические колебания имеют место при условии, что значение одного из ПЛ равно нулю, значения одного – положительное, а два остальных – отрицательные. Гиперхаотические колебания наблюдаются при двух положительных значениях показателя Ляпунова из четырех.

Из полученных результатов следует, что при значениях $n \in (0, 33]$ система имеет два положительных ПЛ, и, как следствие, в ней возникают гиперхаотические колебания. При значениях $n \in (38, 42]$ и $n \in (48, 57]$ система имеет один положительный ПЛ, т. е. в системе будут иметь место хаотические колебания. При значениях $n \in (42, 48]$, $(57, 68]$, $(76, 80]$, $(83, 100]$ системой генерируются периодические колебания. При значениях $n \in (68, 76]$, $(80, 83]$ имеют место квазипериодические колебания.

Синхронизация генераторов хаотических колебаний

Существует множество методов синхронизации хаотических систем – полная, обобщенная, фазовая, опережающая и др. [7]. Под полной синхронизацией понимают точное совпадение векторов состояний взаимодействующих между собой систем. Это возможно при идентичности их параметров.

Режим синхронизации двух идентичных хаотических систем Лю, функциональная схема которой приведена на рис. 4, обеспечивался путем установления между ними обратной линейной связи.

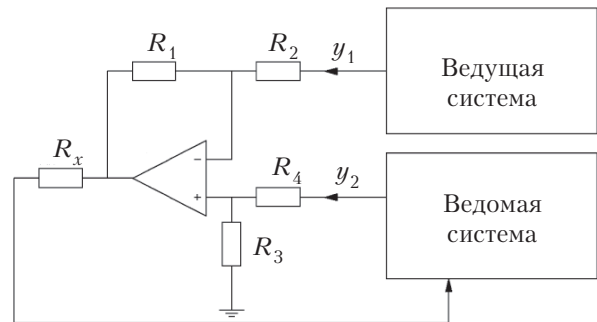


Рис. 4. Функциональная схема синхронизации двух хаотических систем линейной обратной связью (сопротивление резисторов $R_1 \dots R_4$ – 10 кОм)

Ведущую и ведомую системы Лю, можно описать системами линейных дифференциальных уравнений первого порядка следующего вида [8]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1), \quad \dot{y}_1 = bx_1 - hx_1z_1 + \lambda w_1, \\ \dot{z}_1 &= cx_1^2 - dz_1, \quad \dot{w}_1 = -ny_1 \end{aligned} \quad (3)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= a(y_2 - x_2), \\ \dot{y}_2 &= bx_1 - hx_2z_2 + \lambda w_2 + e(y_1 - y_2), \\ \dot{z}_2 &= cx_1^2 - dz_2, \\ \dot{w}_2 &= -ny_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $y_1 - y_2$ – погрешность синхронизации ведущей и ведомой систем.

Ведущая и ведомая системы формируют хаотические сигналы $x_1(t)$, $y_1(t)$, $z_1(t)$, $w_1(t)$ и $x_2(t)$, $y_2(t)$, $z_2(t)$, $w_2(t)$ соответственно. В качестве примера рассмотрим обеспечение процесса синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ ведущей и ведомой систем.

Для моделирования процесса синхронизации ведущей и ведомой систем использовалась программная среда Micro-cap 9.

Глубина связи между системами регулируется изменением величины сопротивления R_x . Качественно о степени корреляции между сигналами $y_1(t)$ и $y_2(t)$ при разных значениях R_x можно

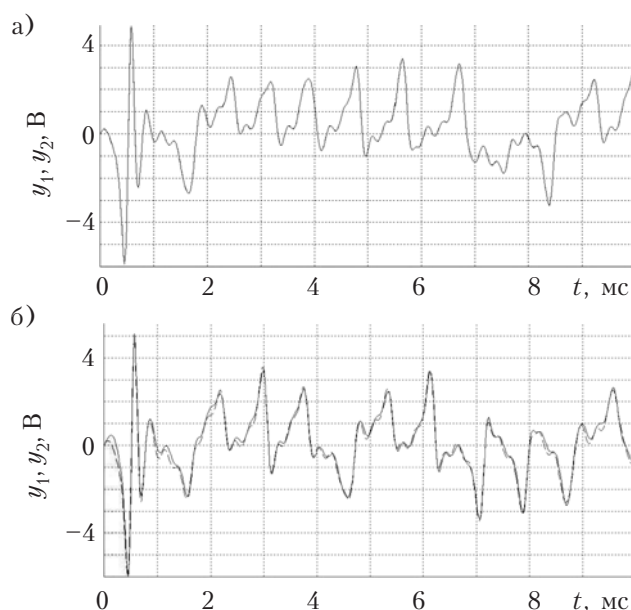


Рис. 5. Временные диаграммы хаотических сигналов y_1 и y_2 для исследуемой системы при значениях $R_x = 100$ Ом (а) и $R_x = 3$ кОм (б)

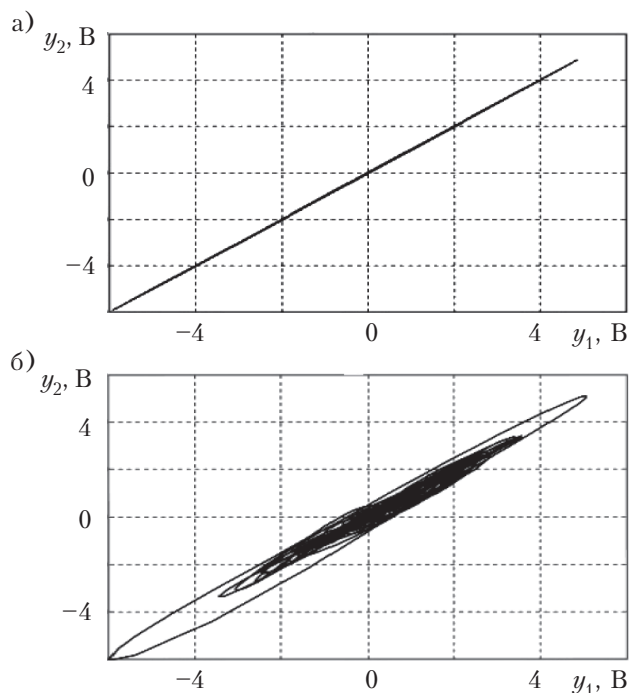


Рис. 6. Зависимость амплитуды сигнала y_2 от амплитуды сигнала y_1 для исследуемой системы при $R_x = 100$ Ом (а) и $R_x = 3$ кОм (б)

судить по их временным диаграммам, приведенным на **рис. 5**: при $R_x = 100$ Ом диаграммы идентичны, что указывает на синхронизацию ведущей и ведомой систем, в отличие от $R_x = 3$ кОм. Дальнейшее увеличение сопротивления R_x приводит к полной десинхронизации систем.

Наличие синхронизации исследуемых систем подтверждается зависимостями амплиту-

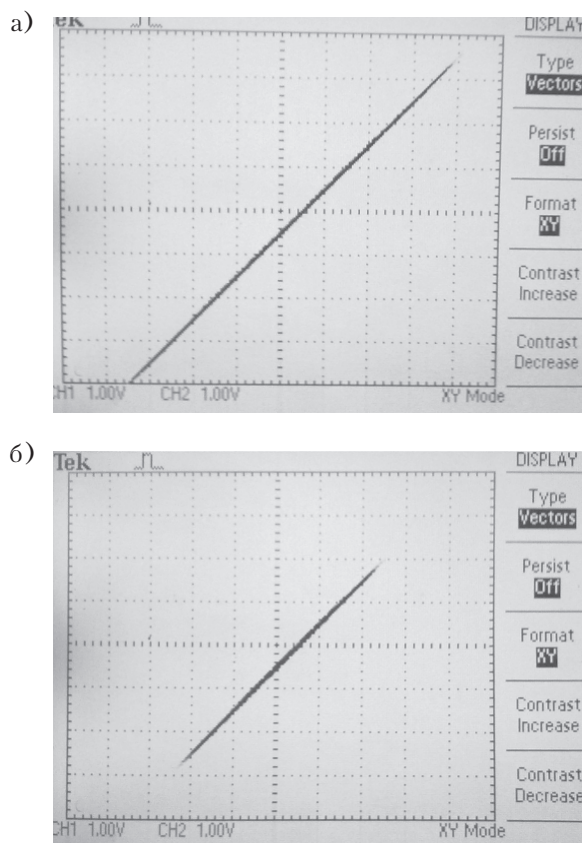


Рис. 7. Экспериментальные зависимости $x_2 = f(x_1)$ (а) и $y_2 = f(y_1)$ (б)

ды сигнала ведомой системы $y_2(t)$ от амплитуды сигнала $y_1(t)$ ведущей, которые приведены на **рис. 6, а**: при $R_x = 100$ Ом зависимость $y_2 = f(y_1)$ линейна с углом наклона $\varphi = \pi/4$, что указывает на идентичность сигналов. Увеличение сопротивления R_x до 3 кОм приводит к десинхронизации систем (**рис. 6, б**).

Из результатов экспериментальных исследований режима синхронизации ведущей и ведомой систем, приведенных на **рис. 7**, следует, что синхронизация сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ (**рис. 7, а**) обеспечивается установлением синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ (**рис. 7, б**).

Хаотическое маскирование

Хаотическое маскирование является одним из самых простых способов скрытой передачи информации [7, 9]. При хаотическом маскировании информационный сигнал аддитивно подмешивается к хаотическому сигналу в сумматоре на выходе ведущей системы, после чего результирующий сигнал передается по каналу связи. Синхронизация системы связи осуществляется установлением одинаковых динамических режимов работы приемной и передающей частей системы связи с помощью переданного и идентичного ему сигнала, сгенерированного приемной стороной. На приемной стороне происходит детектирова-

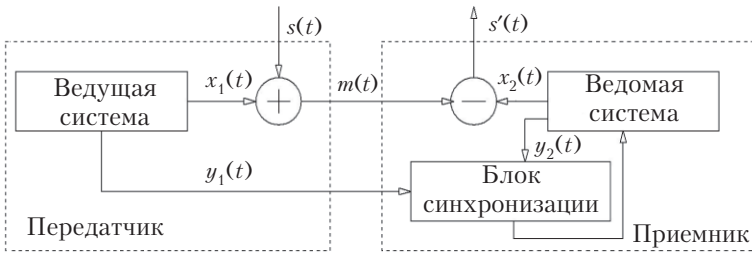


Рис. 8. Структурная схема передачи информации с хаотическим маскированием

ние информационного сигнала путем вычитания от принятого сигнала синхронного отклика.

На рис. 8 приведен возможный вариант структурной схемы передачи информации с хаотическим маскированием.

Моделирование работы системы передачи информации осуществлялось также в программной среде Micro-cap 9. Нелинейный передатчик системы состоит из генератора хаотических колебаний и блока суммирования сигналов, а приемник — из идентичного генератора и блока вычитания.

В качестве генератора хаотических колебаний в передатчике и приемнике использовалась система Лю, описываемая дифференциальными уравнениями (1). Экспериментально система передачи информации была реализована на операционных усилителях и аналоговых умножителях сигналов. В блоках суммирования и вычитания сигналов (рис. 9) первый операционный усилитель выполняет функцию буфера.

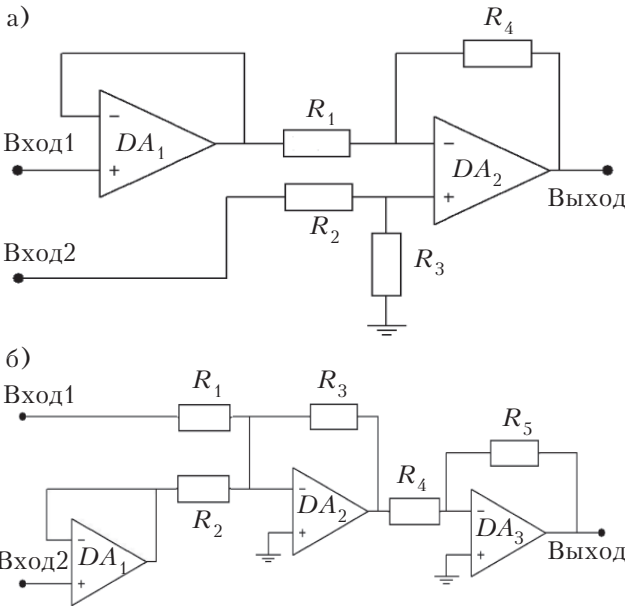


Рис. 9. Схемы вычитания (а) и суммирования (б) аналоговой информации (сопротивление резисторов $R_1 \dots R_4$ — 10 кОм)

Генераторы хаотических колебаний в ведущей и ведомой системах формируют сигналы $x_1(t)$, $y_1(t)$, $z_1(t)$, $w_1(t)$ и $x_2(t)$, $y_2(t)$, $z_2(t)$, $w_2(t)$, обладающие свойствами хаотической динамики. Синхронизация сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ системы обеспечивается путем установления синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ с помощью схемы линейной обратной связи (см. рис. 4). Информационный сигнал $s(t)$, просуммированный с несущим хаотическим сигналом $x_1(t)$, передается по линии связи. В качестве информационного сигнала выбиралась синусоида с амплитудой 3 В и частотой 600 Гц. В приемной

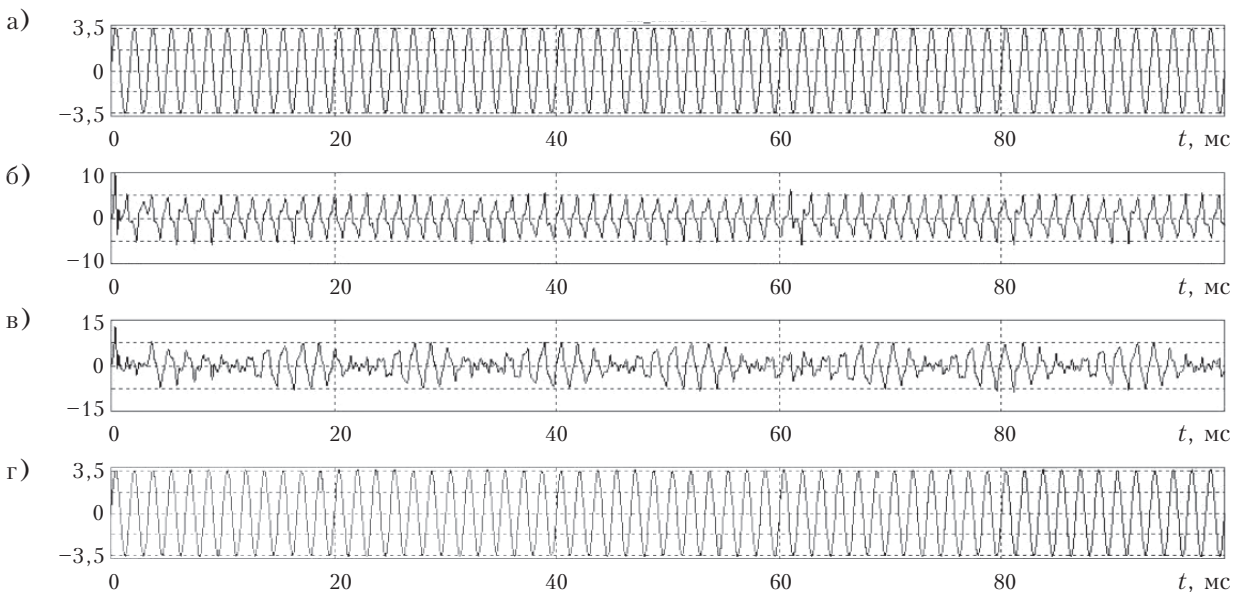


Рис. 10. Полученные в результате моделирования временные диаграммы амплитуды сигналов (в вольтах): а — входной информационный сигнал; б — хаотический сигнал; в — аддитивна смесь информационного и хаотического сигналов; г — выходной сигнал на приемной стороне системы

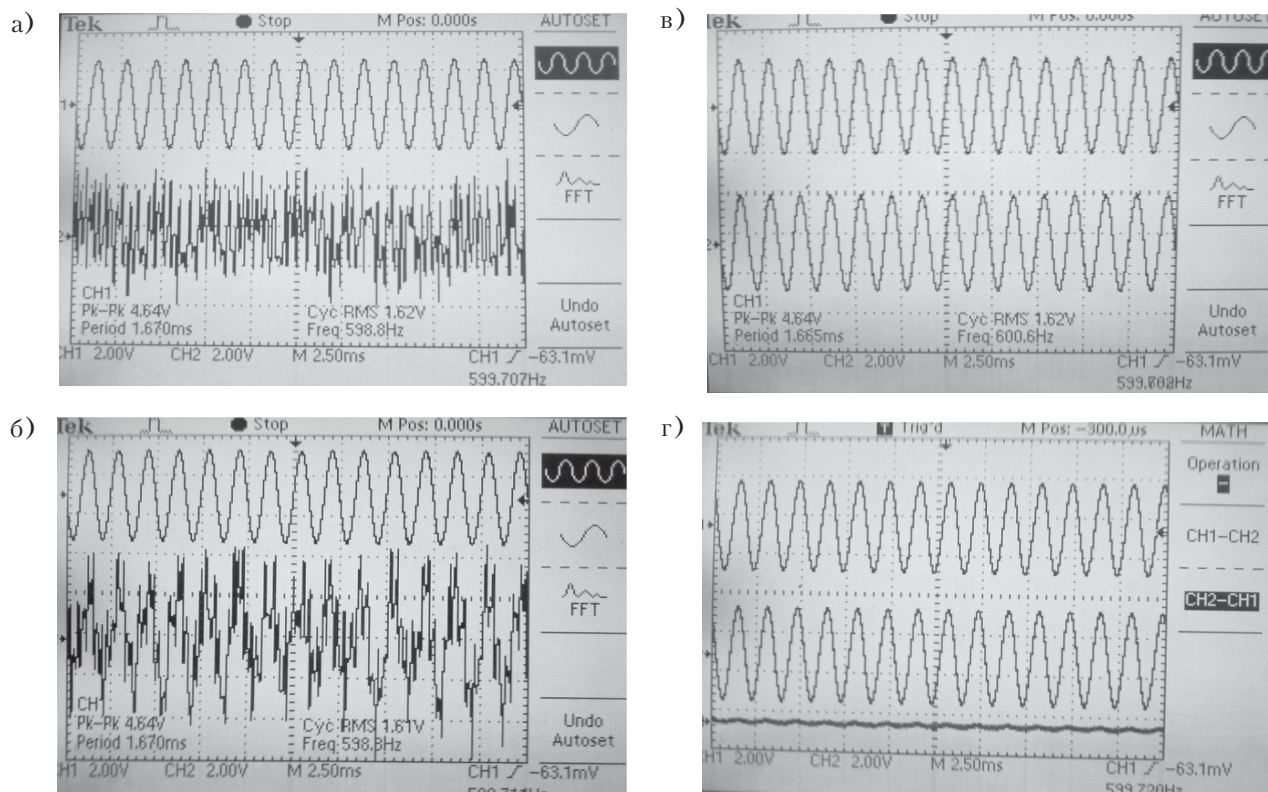


Рис. 11. Экспериментальные временные диаграммы сигналов:

a – входной информационный сигнал и хаотический сигнал; *б* – входной информационный сигнал и переданный по линии связи модулированный сигнал; *в* – информационный сигнал на входе и выходе системы; *г* – информационный сигнал на входе, выходе системы и разница между ними

части системы происходит вычитание от модулированного сигнала $m(t)$ хаотического сигнала $x_2(t)$, синхронизированного с $x_1(t)$, в результате чего получается выходной информационный сигнал. При моделировании предполагалось, что канал связи является идеальным.

Из полученных в результате моделирования временных диаграмм, приведенных на рис. 10, следует, что выходной сигнал на приемной стороне совпадает с входным информационным сигналом.

Результаты моделирования процесса передачи информации с хаотическим маскированием были подтверждены экспериментальными исследованиями, в которых использовался синусоидальный информационный сигнал частотой 600 Гц и амплитудой 1,6 В, формируемый генератором низкочастотных сигналов ГЗ-118. В качестве генератора хаотических колебаний использовался генератор, описываемый системой дифференциальных уравнений (1), свойства которого исследованы в [10].

Как следует из представленных на рис. 11 экспериментальных временных диаграмм, разница между полученным сигналом на приемной стороне системы связи и переданным информационным сигналом незначительна (рис. 11, *г*), что указывает на возможность использования

предложенной системы для передачи информации с хаотическим маскированием.

Проведенные исследования позволили реализовать на базе системы Лю генератор различных видов колебаний и синхронизировать два таких генератора с помощью линейной обратной связи, а также реализовать систему связи с использованием генераторов хаотических колебаний.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wang Fa-Qiang, Liu Chong-Xin. Hyperchaos evolved from the Liu chaotic system // Chinese Physics. – 2006. – Vol. 15, N 5. – P. 963–968.
2. Luo Xiao-Hua, Luo Xiao-Hua et al. Circuitry implementation of a novel four-dimensional nonautonomous hyperchaotic Liu system and its experimental studies on synchronization control // Chinese Physics B. – 2009. – Vol. 18, N 6. – P. 2168–2175.
3. Jinhu Lu, Guanrong Chen, Suochun Zhang. The compound structure of a new chaotic attractor // Chaos, Solitons and Fractals. – 2002. – N 14. – P. 669–672.
4. Шахтарин Б. И., Кобылкина П. И., Сидоркина Ю. А. Генераторы хаотических колебаний: учебн. пособие. – Москва: Гелиос АРВ, 2007. [Shakhtarin B. I., Kobylkina P. I., Sidorkina Yu. A. Generatory khaoticheskikh kolebaniy: uchebn. posobie. Moscow: Gelios ARV, 2007]
5. Кузнецов С. П. Динамический хаос. – Москва: Изд-во Физматлит, 2001. [Kuznetsov S. P. Dinamicheskii khaos. Moscow: Izd-vo Fizmatlit, 2001]

6. Іванюк П. В., Політанський Р. Л. Розрахунок спектру показників Ляпунова для гіперхаотичних систем // Труды V Міжнар. конфер. CSE-2011 "Комп'ютерні науки та інженерія". — Україна, м. Львів. — 2011. — С. 254—255. [Ivanyuk P. V., Polityans'kii R. L. Rozrakhunok spektru pokaznykiv Lyapunova dlya giperkhaotichnikh sistem // Trudi V Mizhnar. konfer. CSE-2011 "Komp'yuterni nauki ta inzheneriya". Ukraine, Lviv. 2011. P. 254]

7. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытной передачи информации // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179, № 12. — С. 1281—1310. [Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Khramov A. E. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2009. Vol. 179, N 12. P. 1281]

8. Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. Синхронізація гіперхаотичних систем Лю оберненим лінійним зв'язком // МРФ'2011. Том 2. Міжнарод. конфер. «Телекомунікаційні системи і технології». — Україна, г. Харків. — 2011. — С. 61—63. [Ivanyuk P. V., Polityans'kii L. F., Polityans'kii R. L. Sinkhronizatsiya giperkhaotichnikh sistem Lyu obernenim liniinim zv'yazkom // MRF'2011. Tom 2. Mezhdunar. konfer. «Telekommunikatsionnye sistemy i tekhnologii». Ukraine, Kharkov. 2011. P. 61]

9. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. — Москва: Физматлит, 2002. [Dmitriev A. S., Panas A. I. Dinamicheskii khaos. Novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi. Moscow: Fizmatlit, 2002]

10. Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. Дослідження хаотичних процесів, генерованих системою Лю // Восточно-Европейський журнал передових технологій. — 2011. — № 4/9 (52). — С. 11—15. [Ivanyuk P. V., Polityans'kii L. F., Polityans'kii R. L. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal передovykh tekhnologii. 2011. N 4/9 (52). P. 11]

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.03 2012 г.

Ivanyuk P. V., Polityansky L. F., Polityansky R. L. **Chaotic masking of information signals using generator based on the Liu system.**

Keywords: chaos, hyperchaos, chaotic masking, chaotic synchronization, Liu system, Lyapunov exponent spectrum.

Lyapunov exponent spectrum for a chaotic Liu system was calculated in this work. The possibility to set the synchronization between generators based on the system under investigation was shown. A communication system was experimentally realized using chaotic generators.

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.

Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. **Хаотичне маскування інформаційних сигналів з використанням генератора на базі системи Лю.**

Ключові слова: хаос, гіперхаос, хаотичне маскування, хаотична синхронізація, система Лю, спектр показників Ляпунова.

В роботі розраховано спектр показників Ляпунова для хаотичної системи Лю. Показано можливість встановлення режиму синхронізації між генераторами, що базуються на дослідженій системі. Експериментально реалізовано систему передачі інформації з використанням генераторів хаотичних коливань.

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

НОВЫЕ КНИГИ

Губарев В. В. Информатика: прошлое, настоящее, будущее.— Москва: Технофера, 2011.— 432 с.

В пособии излагается взгляд автора на то, что такое информатика, ее состав, основные понятия, концепция описания ее истории и поколений средств вычислительной техники. Особое внимание уделяется хронологии создания базовых средств и технологий информатики, сведениям о лицах, внесших весомый вклад в развитие разных разделов информатики, а также ближайшим перспективам их развития. Содержатся многочисленные справочные, в частности статистические, сведения и перечень междисциплинарных проблемных вопросов, касающихся понятия информации, информатики и ее разделов. В книгу включены учебные и справочные материалы, предназначенные для изучения в рамках учебного процесса при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная математика и информатика», «Программная инженерия», «Системный анализ и управление», «Информационные системы и технологии», «Прикладная информатика» (по отраслям), «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», «Управление в технических системах», «Бизнес-информатика», «Информационная безопасность» и т. п. Пособие может быть полезно студентам, обучающимся по направлениям «Математика и компьютерные науки», «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Интеллектуальные системы в гуманитарной сфере», «Инфо-коммуникационные технологии и системы связи» и т. п., многим преподавателям и аспирантам, а также всем, желающим системно познать, что такое информатика, ее концептуальные основы, структура, история и методология, этапы становления и направления развития.

