

Радиофизическая модель системы Рёсслера с использованием RC-фильтров

В. И. Пономаренко[✉], А. В. Курбако, А. С. Караваев, Ю. М. Ишбулатов, Б. П. Безручко,
М. Д. Прохоров

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия
E-mail: ✉ ponomarenkovi@gmail.com, kurbako.sasha@mail.ru, karavaevas@gmail.com, ishbulatov95@mail.ru,
bezruchkobp@gmail.com, mdprokhorov@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.06.2026, принята к публикации 22.06.2026,
опубликована онлайн 23.06.2026

Аннотация. Цель работы. Разработка и экспериментальная реализация радиофизической аналоговой модели системы Рёсслера на основе RC-фильтров нижних частот первого порядка, позволяющей уменьшить количество активных элементов в схеме. Методы. Исходная система дифференциальных уравнений Рёсслера была адаптирована для экспериментальной реализации: введено масштабирование динамических переменных для приведения напряжений к рабочему диапазону операционных усилителей и аналогового умножителя. Вместо классических интеграторов на операционных усилителях использованы три RC-фильтра первого порядка. На основе этого разработана принципиальная схема, включающая всего два операционных усилителя и один аналоговый умножитель. Экспериментальное исследование выполнено с помощью цифрового осциллографа; зарегистрированы временные ряды и построены проекции фазовых портретов при различных значениях управляющего параметра. Результаты. Создана экспериментальная модель системы Рёсслера, содержащая всего два операционных усилителя и один аналоговый умножитель. При вариации управляющего параметра в разработанной схеме наблюдается каскад бифуркаций удвоения периода. По экспериментальным реализациям построены проекции фазовых портретов циклов периода 1, 2, 4 и хаотического аттрактора. Полученные проекции фазовых портретов качественно соответствуют полученным в численном моделировании системы Рёсслера при традиционно используемых значениях управляющих параметров. Подтверждена работоспособность предложенного подхода и возможность наблюдения хаотического аттрактора. Заключение. Предложен и экспериментально реализован новый подход к аналоговому моделированию системы Рёсслера, основанный на использовании RC-фильтров первого порядка вместо классических интеграторов на операционных усилителях. Такой подход позволяет упростить схемотехнику, сохраняя основные свойства моделируемой системы. Разработанная модель открывает перспективы для создания простых, дешевых и технологичных устройств для демонстрации хаотических режимов, что особенно важно для учебных лабораторий и исследовательских задач, где требуется наглядное физическое моделирование нелинейных динамических систем. Особое значение полученные результаты имеют для исследования в радиофизическом эксперименте коллективной динамики сетей взаимодействующих осцилляторов, для которых упрощение устройства узлового элемента критически важно.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование, система Рёсслера, хаотический аттрактор, RC-фильтры, бифуркации удвоения периода.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках Государственного задания Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН № FFWZ-2025-0016

Для цитирования: Пономаренко В. И., Курбако А. В., Караваев А. С., Ишбулатов Ю. М., Безручко Б. П., Прохоров М. Д. Радиофизическая модель системы Рёсслера с использованием RC-фильтров // Известия вузов. ПНД. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003224. EDN: CDBYQN

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Radiophysical model of the Rossler system using RC -filters

V. I. Ponomarenko[✉], A. V. Kurbako, A. S. Karavaev, Yu. M. Ishbulatov, B. P. Bezruchko,
M. D. Prokhorov

Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences,
Russia

E-mail: ✉ponomarenkovi@gmail.com, kurbako.sasha@mail.ru, karavaevas@gmail.com, ishbulatov95@mail.ru,
bezruchkobp@gmail.com, mdprokhorov@yandex.ru

Received 02.06.2026, accepted 22.06.2026, available online 23.06.2026

Abstract. The *purpose* of the study is to develop and experimentally implement a radiophysical analog model of the Rössler system based on first-order low-pass RC filters, allowing for a reduction in the number of active elements in the circuit. *Methods.* The original system of Rössler differential equations was adapted for experimental implementation: scaling of the dynamic variables was introduced to bring the voltages within the operating range of the operational amplifiers and analog multiplier. Three first-order RC filters were used instead of classical operational amplifier integrators. Based on this, a schematic diagram was developed that includes only two operational amplifiers and one analog multiplier. The experimental study was performed using a digital oscilloscope; time series were recorded and phase portraits were constructed for various values of the control parameter. *Results:* An experimental model of the Rössler system was created, containing only two operational amplifiers and one analog multiplier. When varying the control parameter in the developed circuit, a cascade of period-doubling bifurcations was observed. Phase portraits of period cycles of 1, 2, and 4 and the chaotic attractor were constructed based on experimental implementations. The resulting phase portraits qualitatively correspond to those obtained in numerical simulations of the Rössler system with traditionally used control parameter values. The feasibility of the proposed approach and the possibility of observing the chaotic attractor are confirmed. *Conclusion:* A new approach to analog modeling of the Rössler system is proposed and experimentally implemented. This approach utilizes first-order RC filters instead of classical operational amplifier integrators. This approach simplifies the circuit design while preserving the fundamental properties of the simulated system. The developed model opens up prospects for creating simple, inexpensive, and technologically advanced devices for demonstrating chaotic regimes, which is especially important for educational laboratories and research tasks requiring visual physical modeling of nonlinear dynamic systems. The obtained results are of particular importance for the study of the collective dynamics of networks of interacting oscillators in a radiophysical experiment, for which simplification of the design of the nodal element is critically important.

Keywords: electronic modeling, Rössler system, chaotic attractor, RC filters, period-doubling bifurcations.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the state task of the Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences No. FFWZ-2025-0016.

For citation: Ponomarenko V.I., Kurbako A.V., Karavaev A.S., Ishbulatov Yu.M., Bezruchko B.P., Prokhorov M.D. Radiophysical model of the Rossler system using RC -filters. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003224

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

На протяжении последних десятилетий моделирование нелинейных динамических систем остается одним из ключевых инструментов в исследовании хаоса, бифуркаций и сложного поведения [1–3]. Классическим подходом к аналоговой реализации таких систем, как классические системы Лоренца [4], Рёсслера [5, 6] или нейроподобные системы [7–10] является метод, базирующийся на использовании операционных усилителей, включенных по схеме интеграторов [11–14]. Идеальный интегратор на операционном усилителе позволяет

Пономаренко В. И., Курбако А. В., Караваяев А. С., Ишбулатов Ю. М., Безручко Б. П.,
Прохоров М. Д.

математически строго воспроизвести систему дифференциальных уравнений, обеспечивая нужный временной масштаб.

Вопросы схемотехнической реализации систем обыкновенных дифференциальных уравнений широко обсуждаются в литературе. Классический подход базируется на использовании операционных усилителей, интеграторов, аналоговых умножителей и пассивных элементов с использованием средств аналоговой схемотехники [15]. В [16] приведено детальное описание методологии перехода от математической модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений к принципиальной схеме на электронных компонентах, включая масштабирование переменных и выбор номиналов.

Система Рёсслера занимает особое положение в нелинейной науке. Она сочетает в себе математическую простоту (в отличие от системы Лоренца содержит только одно нелинейное слагаемое), способность демонстрировать хаотическое поведение, а также имеет высокое учебно-методическое значение. В частности, разработка простых и наглядных электронных схем для демонстрации хаотических аттракторов играет важную роль в учебных лабораториях, так как позволяет студентам на практике изучать основные понятия теории хаоса и нелинейной динамики, что невозможно при использовании только компьютерного моделирования. Одна из множества практических реализаций системы Рёсслера приведена в работе [17]. Альтернативные схемотехнические решения включают использование операционных усилителей с токовой обратной связью, позволяющих сократить количество активных компонентов за счет обработки как токовых сигналов, так и сигналов напряжения [18]. Для задач интегральной реализации перспективным является применение операционных трансимпедансных усилителей, что продемонстрировано в работах по дробно-порядковой системе Рёсслера [19]. Развитие цифровых методов привело к появлению реализаций на базе программируемых логических интегральных схем, что расширяет возможности гибридного моделирования, сочетающего аналоговые и цифровые элементы [20]. Во всех перечисленных подходах важным функциональным узлом остается интегратор, выполненный на операционном усилителе, или в виде цифрового устройства.

В ряде прикладных задач, связанных с физической реализацией динамических систем, более эффективным может оказаться подход, связанный с использованием RC -фильтров нижних частот. Такой подход нами был предложен в работе [21] для моделирования системы Лоренца. В этой статье было показано, что использование RC -фильтра нижних частот позволяет уменьшить число активных элементов, необходимых для реализации системы Лоренца. Построение таких простых систем отражает исследовательскую философию Дж. Спротта [22]: искать самые простые реализации электронных схем, которые несут в себе хаос. Это помогает понять фундаментальные механизмы нелинейной динамики.

В данной работе предложена экспериментальная реализация системы Рёсслера с использованием RC -фильтров первого порядка, также позволяющая уменьшить число активных элементов в схеме. Система Рёсслера выбрана в качестве объекта исследования в силу ее минимальной размерности, необходимой для возникновения хаотического аттрактора.

В статье представлены результаты численного моделирования системы Рёсслера при стандартном наборе параметров, построение принципиальной схемы модели системы Рёсслера и сравнение данных компьютерных вычислений с экспериментальными. Полученные результаты открывают новые перспективы для создания простых и технологичных моделей на базе RC -фильтров. Особое значение полученные результаты имеют в экспериментальных исследованиях сетей взаимодействующих осцилляторов, для которых упрощение схемотехнической реализации отдельных осцилляторов может предоставить возможность масштабирования сети.

1. Адаптация системы Рёсслера для реализации в эксперименте

Система дифференциальных уравнений Рёсслера вида (1) является одной из простейших систем с хаотическим аттрактором:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= -y(t) - z(t), \\ \dot{y}(t) &= x(t) + ay(t), \\ \dot{z}(t) &= b + z(t)(x(t) - c),\end{aligned}\tag{1}$$

где a , b , c — положительные параметры. Сам Рёсслер изучал систему при значениях параметров $a = 0.2$, $b = 0.2$ и $c = 5.7$, при которых система уравнений (1) демонстрирует хаотический аттрактор.

На рис.1 представлены проекции фазового портрета системы Рёсслера.

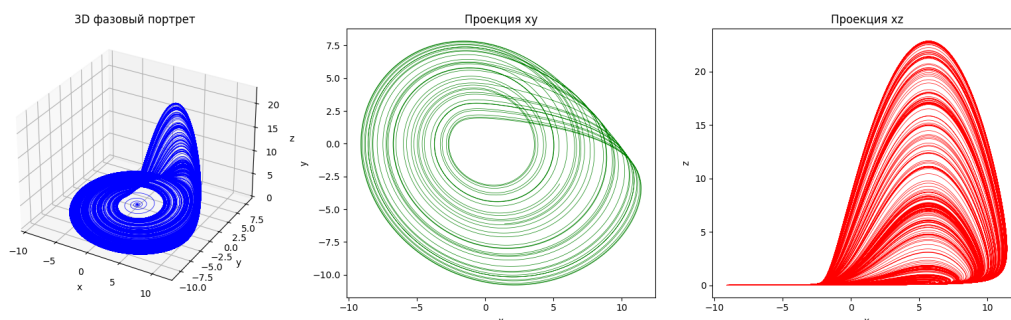


Рис. 1. Проекция фазовых портретов системы Рёсслера при $a = 0.2$, $b = 0.2$ и $c = 5.7$.

Fig. 1. Phase portrait projections of the Rössler system at $a = 0.2$, $b = 0.2$, and $c = 5.7$.

Для того, чтобы реализовать систему уравнений (1) в эксперименте, необходимо сделать размерными время и динамические переменные. Время будем измерять в секундах и в качестве масштабного коэффициента введем постоянную времени $RC=1$ ms. Динамические переменные будем измерять в вольтах. Из рис.1 видно, что динамические переменные x , y , z меняются в широких пределах, достигая значений 20-25 при выбранных значениях управляющих параметров. Для того, чтобы соответствующие напряжения модели находились в рабочем диапазоне умножителя и операционных усилителей, уменьшим их в 3 раза, введя замену $x = 3X$, $y = 3Y$, $z = 3Z$. При такой замене все переменные не превышают 7 V, что вполне укладывается в диапазон рабочих напряжений операционных усилителей. Как мы увидим далее, в окончательной системе уравнений с учетом масштабного коэффициента произведение ZX на выходе умножителя не будет превышать 10 V, что укладывается в диапазон умножителя AD633, который мы будем использовать в схеме. Кроме того, для того, чтобы привести третье уравнение системы (1) к виду уравнения фильтра низких частот первого порядка (подобно тому, как мы это делали в [21]), левую и правую часть третьего уравнения системы (1) поделим на параметр c и таким образом получим систему уравнений (2), в соответствии с которой будем строить принципиальную схему модели. Здесь, как мы видим, за счет деления на параметр произведение $3\frac{Z(t)X(t)}{c}$ помещается в рабочий диапазон умножителя. Следует отметить, что если исследовать систему при других значениях управляющих параметров, когда динамические переменные станут еще больше, экспериментатор может провести замену переменных с увеличенным коэффициентом, например $x = 4X$, $y = 4Y$, $z = 4Z$, и повторить еще расчеты для конкретных номиналов элементов схемы.

$$\begin{aligned}
 RC\dot{X}(t) &= -Y(t) - Z(t), \\
 RC\dot{Y}(t) &= X(t) + aY(t), \\
 \frac{RC}{c}\dot{Z}(t) &= \frac{b}{c} + 3\frac{Z(t)X(t)}{c} - Z.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Таким образом, для реализации системы Рёсслера потребуется три RC -фильтра, причем для переменных X , Y постоянная времени будет $RC=1$ ms, а для переменной Z - постоянная времени $\frac{RC}{c} \approx 0.0175$ ms.

2. Принципиальная схема и результаты эксперимента

На рис. 2 представлена принципиальная схема предлагаемой модели. За переменную X отвечает фильтр $R6C1$. Напряжение на его входе формируется дифференциальным усилителем на операционном усилителе U1A и резисторах $R1 - R5$, $R8$. Пример расчета такого дифференциального усилителя приведен например в [23]. Таким образом, на вход подается напряжение, равное $X - Y - Z$. Если записать уравнение для фильтра, то напряжение на его выходе равно $X(t) = \frac{1}{c} \int \frac{(-Y(t) - Z(t) + X(t)) - X(t)}{R} dt$. Если это выражение продифференцировать и раскрыть скобки, то получим первое уравнение системы (2).

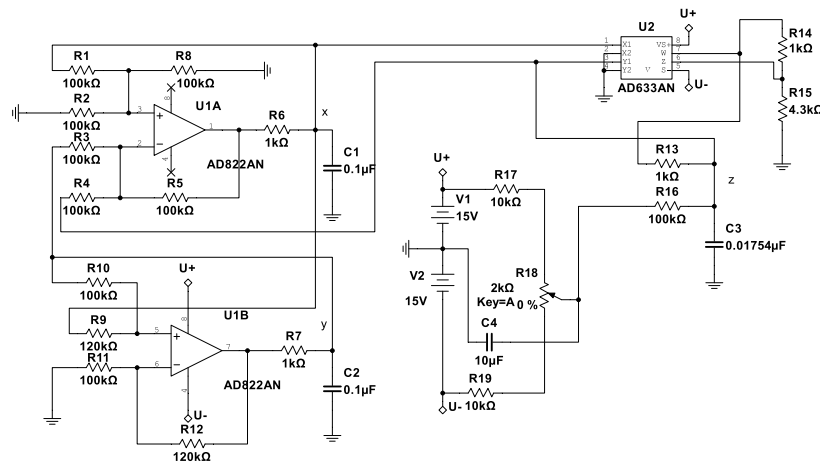


Рис. 2. Принципиальная схема модельной системы Рёсслера на базе RC -фильтров.

Fig. 2. Schematic diagram of the Rössler model system based on RC filters.

Аналогичным образом формируется переменная Y при помощи фильтра $R7C2$ и суммирующего усилителя на ОУ U1B, $R9 - R12$. Поскольку в правой части второго уравнения системы (2) уже есть переменная Y , умноженная на положительный параметр a , на вход

фильтра мы должны подать напряжение $X(t) + (1 + a)Y(t)$, тогда на выходе получим Y . Для суммирования напряжений с нужными коэффициентами воспользуемся схемой неинвертирующего суммирующего усилителя, описанной например в [24]. Параметр a в этой схеме можно менять при помощи одновременного изменения резисторов $R9$ и $R12$ так, что $a = R9/R10 - 1$. На схеме представлены номиналы, соответствующие параметру $a = 0.2$.

Переменная Z формируется при помощи фильтра $R13C3$ с постоянной времени, равной примерно 0.0175 ms. С выхода умножителя $U2$ приходит напряжение, равное примерно $0.52XZ$. Коэффициент перед произведением задается при помощи резисторов $R14R15$. Постоянный параметр $\frac{b}{c}$ достаточно мал (при $b = 0.2$, $c = 5.7$ он составляет примерно 0.035), поэтому для того, чтобы не использовать здесь суммирующий усилитель, мы подаем увеличенное в 100 раз напряжение через резистор $R16$ на конденсатор $C3$. Поскольку $R16$ в 100 раз больше, чем $R13$, вклад постоянного параметра становится равным $\frac{b}{c}$, что и нужно для реализации третьего уравнения системы (2). Для того, чтобы убедиться, что такая конфигурация соответствует третьему уравнению в (2), запишем уравнение для фильтра $R13R16C3$. На $R13$ приходит напряжение с умножителя, равное $3\frac{Z(t)X(t)}{c}$, а на $R16$ - напряжение с делителя $R17R18R19$, равное $100\frac{b}{c}$. Напряжение на выходе $Z = \frac{1}{C3} \int (\frac{ZX/c-Z}{R13} + \frac{100b/c-Z}{R16})$. В этом уравнении можно пренебречь вкладом $Z/R16$, поскольку $R16 \gg R13$, тогда после дифференцирования получаем третье уравнение системы (2).

Для изменения параметра $\frac{b}{c}$ служит делитель $R17R18R19$. Для изменения параметра c необходимо изменить постоянную времени фильтра $R13C3$ и одновременно коэффициент передачи умножителя, соответствующий величине $\frac{3}{c}$ в (2).

Для проверки работы схема, моделирующая поведение системы Рёсслера и представленная на рис. 2, была реализована в эксперименте. Очевидно, что наиболее удобным для подстройки в процессе эксперимента является параметр b , поскольку для вариации параметров a, c требуется одновременное изменение сразу двух номиналов элементов схемы. При вариации параметра b в системе наблюдается переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. На рис. 3 представлены экспериментальные проекции фазовых портретов разработанной схемы в периодическом и хаотическом режимах.

Регистрация временных рядов проводилась при помощи двухканального цифрового осциллографа Keysight MSOX3022T. Регистрировались напряжения схемы, пропорциональные переменным X и Y . На рис.3, а - в представлены периодические проекции фазовых портретов периода 1, 2, 4, на рис.3, г - хаотический. Полученные экспериментально проекции фазовых портретов качественно соответствуют численным расчетам.

Заключение

В данной работе предложен и экспериментально реализован новый подход к аналоговому моделированию системы Рёсслера, основанный на использовании RC -фильтров нижних частот первого порядка вместо классических интеграторов на операционных усилителях. Показано, что такой подход позволяет существенно упростить схемотехнику: разработанная схема содержит всего два операционных усилителя и один аналоговый умножитель, тогда как традиционные реализации требуют трех интеграторов на операционных усилителях и некоторого количества усилителей и сумматоров. Проведено масштабирование исходных дифференциальных уравнений для согласования динамических переменных с рабочим диапазоном используемых компонентов (± 10 V) и выбора постоянных времени ($RC=1$ ms для переменных X, Y и $RC/c=0.0175$ ms для переменной Z). Экспериментально показано, что при вариации параметра b в предложенной схеме наблюдается характерный

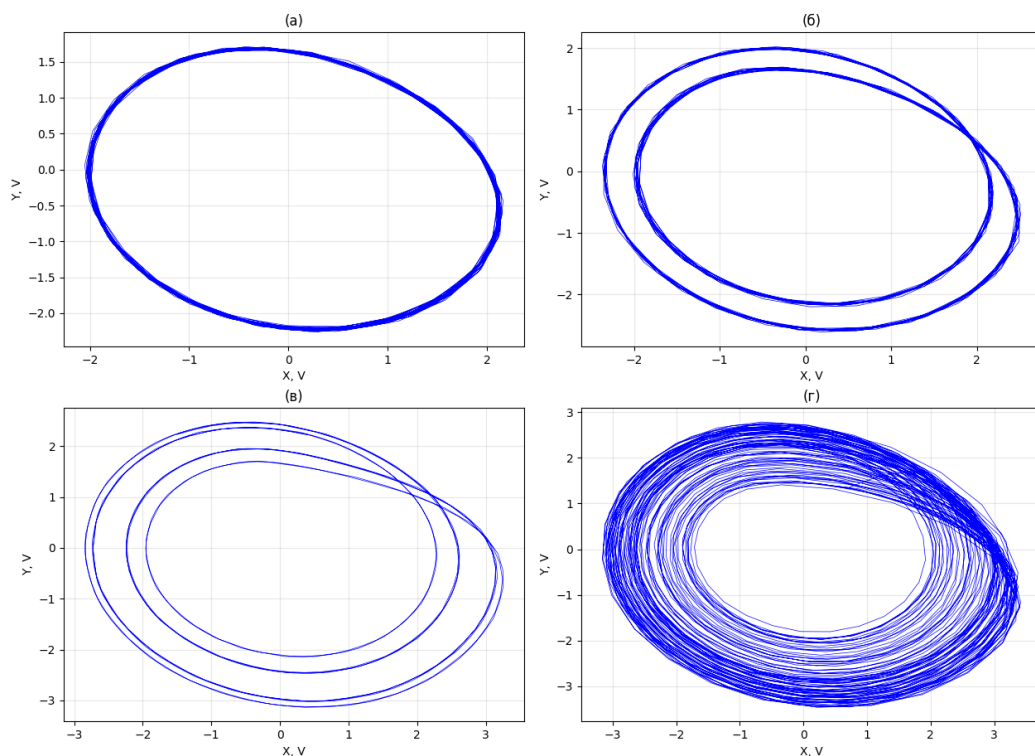


Рис. 3. Проекция фазовых портретов экспериментальной модели Рёсслера на плоскости (X, Y) . Циклы периода 1 (а), 2(б), 4(в) и хаотический режим (г).

Fig. 3. Phase portrait projections of the experimental Rössler model on the (X, Y) plane. Period 1 (a), 2 (b), 4 (c) cycles and the chaotic regime (d).

для системы Рёсслера каскад бифуркаций удвоения периода и переход к хаотическому аттрактору.

Полученные результаты открывают новые перспективы для создания компактных, энергоэффективных и технологичных генераторов хаотических сигналов на базе RC -фильтров. Предложенная схема может найти применение в учебных лабораториях, в системах нейроморфных вычислений, в распределенных динамических системах, а также в устройствах, где критичны простота реализации и малое число активных компонентов, в частности, в исследовании коллективной динамики сетей осцилляторов.

Список литературы

1. Кузнецов С. П. Динамический хаос и гиперболические аттракторы. От математики к физике. Изд-во ИКИ, Москва - Ижевск, 2013. - 488 с.
2. Анищенко В. С. Сложные колебания в простых системах. Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах. Москва: Издательская группа URSS № 44. — 2021. 318 с.
3. Безручко Б. П., Короновский А. А., Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Путь в синергетику: Экскурс в десяти лекциях М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2020. - 304 с.
4. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow // Journal of the Atmospheric Sciences. 1963. Vol. 20, no. 2. P. 130-141.
5. Rössler O.E. An equation for continuous chaos // Phys Lett A. 1976. Vol. 57, no. 5. P. 397–398.

6. *Rössler O. E.* Continuous chaos - four prototype equations // Ann. New York Acad. Sci. 1976. Vol. 316. P. 376-392.
7. *FitzHugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. Vol. 1. P. 445-466.
8. *Hindmarsh J. L., Rose R. M.* A model of the nerve impulse using two first-order differential equations // Nature. 1982. Vol. 296. P. 162-164.
9. *Hindmarsh J. L., Rose R. M.* A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. 1984. Vol. 221, no.1222. P. 87-102. DOI: 10.1098/rspb.1984.0024.
10. *Izhikevich E. M.* Simple Model of Spiking Neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003. Vol. 14, no. 6. P. 1569-1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440.
11. *Schutter Erik De.* Computational Neuroscience: Realistic Modeling for Experimentalists. CRC Press, 2000. 368 p.
12. *Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Hramov A. E.* Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators // Nonlinear Dynamics. 2019. Vol. 98. P. 735-748. DOI: 10.1007/s11071-019-05224-x.
13. *Xie Y., Yao Z., Ren G., Ma J.* Estimate physical reliability in Hindmarsh-Rose neuron // Physics Letters A. 2023. Vol. 464. 128693. DOI: 10.1016/j.physleta.2023.128693.
14. *Ortega G., Nunez R., Ramirez J. P.* A modified hybrid Izhikevich neuron: modeling, synchronization, and experiments. 2020. Vol. 53. Iss. 2. P. 5683-5688. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1592.
15. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники, 3-е издание. Часть первая. Аналоговая: Перевод с англ. - М: Издательство БИНОМ. 2024. 758 с., ил.
16. *Ulmann B.* Analog and hybrid computer programming. Walter De Gruyter Oldenbourg. 2023. DOI: 10.1515/9783110787733.
17. *Semenov V.* Electronic Modelling of Deterministic and Stochastic Oscillators. Experimental Implementations of Ordinary Differential Equations. Springer. 2024. 166 p.
18. *Suneja K., Pandey N., Pandey R.* Systematic Realization of CFOA Based Rössler Chaotic System and Its Applications // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47. P. 2941-2955. DOI: 10.1007/s13369-021-06379-9
19. *Dinesh M., Prasad S.* Realization of Integrable Incommensurate-Fractional-Order-Rössler-System Design Using Operational Transconductance Amplifiers (OTAs) and Its Experimental Verification // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2017. Vol. 27, no. 5. 1750077. DOI: 10.1142/S0218127417500778
20. *Kuate P. D. K., Tchahou Tchendjeu A. E., Fotsin H.* A modified Rössler prototype-4 system based on Chua's diode nonlinearity: Dynamics, multistability, multiscroll generation and FPGA implementation // Chaos, Solitons and Fractals. 2020. Vol. 140. 110213. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110213.
21. *Пономаренко В. И., Прохоров М. Д.* Система Лоренца как нелинейно связанные радиофизические RC-фильтры первого порядка // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 11. С. 1126-1131. DOI: 10.31857/S0033849424110113.
22. *Спротт Дж. К.* Элегантный хаос: алгебраически простые хаотические потоки. - М. - Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. - 2012. - 328 с.
23. *Хохлов А. В., Слепнев А. В., Сергеев К. С.* Аналоговая схемотехника. Курс лекций и лабораторный радиофизический практикум по схемотехническому моделированию /. - Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2020. - 118 с. ил.
24. *Гринфельд С. Н.* Физические основы электроники: Учебное пособие. – Комсомольск-на-Амуре: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т», 2004. 137 с.

References

1. Kuznecov SP. Dinamicheskij haos i giperbolicheskie attraktory. Ot matematiki k fizike. Izd-vo IKI, Moskva - Izhevsk, 2013. - 488 p. (in Russian).
2. Anishchenko VS. Slozhnye kolebaniya v prostyh sistemah. Mekhanizmy vozniknoveniya, struktura i svoystva dinamicheskogo haosa v radiofizicheskikh sistemah. Moskva: Izdatel'skaya gruppa URSS № 44. — 2021. 318 p. (in Russian).
3. Bezruchko BP., Koronovskij AA., Trubeckov DL., Hramov AE. Put' v sinergetiku: Ekskurs v desyati lekciyah. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2020. - 304 p. (in Russian).
4. Lorenz EN. Deterministic nonperiodic flow // Journal of the Atmospheric Sciences. 1963. Vol. 20, no. 2. P. 130-141.
5. Rössler OE. An equation for continuous chaos // Phys Lett A. 1976. Vol. 57, no. 5. P. 397–398.
6. Rössler OE. Continuous chaos - four prototype equations // Ann. New York Acad. Sci. 1976. Vol. 316. P. 376-392.
7. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. Vol. 1. P. 445–466.
8. Hindmarsh JL, Rose RM. A model of the nerve impulse using two first-order differential equations // Nature. 1982. Vol. 296. P. 162–164.
9. Hindmarsh JL, Rose RM. A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. 1984. Vol. 221, no.1222. P. 87–102. DOI: 10.1098/rspb.1984.0024.
10. Izhikevich E.M. Simple Model of Spiking Neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003. Vol. 14, no. 6. P. 1569-1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440.
11. Schutter Eric De. Computational Neuroscience: Realistic Modeling for Experimentalists. CRC Press, 2000. 368 p.
12. Kulminskiy DD, Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Hramov AE. Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators // Nonlinear Dynamics. 2019. Vol. 98. P. 735–748. DOI: 10.1007/s11071-019-05224-x.
13. Xie Y, Yao Z, Ren G, Ma J. Estimate physical reliability in Hindmarsh-Rose neuron // Physics Letters A. 2023. Vol. 464. 128693. DOI: 10.1016/j.physleta.2023.128693.
14. Ortega G, Nunez R, Ramirez JP. A modified hybrid Izhikevich neuron: modeling, synchronization, and experiments. 2020. Vol. 53, iss. 2. P. 5683-5688. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1592.
15. Horowitz P, Hill U. The Art of Electronics, 3rd Edition. 2015. 1220 p.
16. Ulmann B. Analog and hybrid computer programming. Walter De Gruyter Oldenbourg. 2023. DOI: 10.1515/9783110787733.
17. Semenov V. Electronic Modelling of Deterministic and Stochastic Oscillators. Experimental Implementations of Ordinary Differential Equations. Springer. 2024. 166 p.
18. Suneja K, Pandey N, Pandey R. Systematic Realization of CFOA Based Rössler Chaotic System and Its Applications // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47. P. 2941–2955. DOI: 10.1007/s13369-021-06379-9
19. Dinesh M, Prasad S. Realization of Integrable Incommensurate-Fractional-Order-Rössler-System Design Using Operational Transconductance Amplifiers (OTAs) and Its Experimental Verification // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2017. Vol. 27, no. 5. 1750077. DOI: 10.1142/S0218127417500778
20. Kuate PDK, Tchahou Tchendjeu AE, Fotsin H. A modified Rössler prototype-4 system based on Chua's diode nonlinearity: Dynamics, multistability, multiscroll generation and FPGA implementation // Chaos, Solitons and Fractals. 2020. Vol. 140. 110213. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110213
21. Ponomarenko VI, Prokhorov MD. Lorenz system as nonlinearly connected first-order radiophysical

- RC-filters // Journal of Communications Technology and Electronics. - 2024. - Vol. 69. - N. 11. - P. 1126-1131. doi: 10.31857/S0033849424110113
22. Sprott JC. Elegant Chaos: Algebraically Simple Chaotic Flows. World Scientific Publishing Company. 2010. 304 p.
 23. Khohlov AV., Slepnev AV, Sergeev KS. Analog Circuit Design. Lecture Course and Radiophysical Laboratory Workshop on Circuit Modeling – Saratov : Izd-vo Sarat. un-ta, 2020. - 118 p. (in Russian).
 24. Grinfeld SN. Physical foundations of electronics: Textbook. – Komsomol'sk-na-Amure: Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Komsomol'skij-na-Amure gos. tekhn. un-t», 2004. 137 p. (in Russian).