

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Синхронизация структур в мультиплексных сетях кубических
отображений с мемристивной межслойной связью
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4061 группы

направления 11.03.02 Инфокоммуникационные

технологии и системы связи

Института физики

Бахарева Данилы Дмитриевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ Т.Е. Вадивасова

Зав. кафедрой радиофизики

и нелинейной динамики,

д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2023 г.

Введение

Мемристор — пассивный электрический элемент, двухполюсник в микроэлектронике, способный изменять своё сопротивление в зависимости от протекшего через него электрического заряда, т. е. состояние сопротивления может сохраняться в течение длительного времени после удаления внешнего электрического поля.

Под мемристивными элементами[1] имеют в виду двухполюсники, с характеристикой вида:

$$y(t) = G_M(x, z, t)x(t), \quad \frac{dz}{dt} = f(x, z, t) \quad (1)$$

где x и y - некоторые переменные, соответствующие воздействию и отклику, а z - переменная, задающая мгновенное состояние мемристивного элемента.

В общем случае мемристор представляет собой два слоя токопроводящих проводников, пересекающихся под прямым углом [2]. У полученного элемента проводящие свойства претерпевают изменения за счет протекающих химических реакций в двухслойной пленке диоксида титана, толщина которого равна 5 нм. При этом первый слой специально обеднен кислородом и при подаче напряжения через титановые электроды, вакантные кислородные места начинают перемещаться между слоями, изменяя сопротивление устройства в миллионы раз. При этом изменившаяся проводимость слоёв останется такой до тех пор, пока не будет приложено обратное сопротивление. Таким образом, реализуется энергонезависимое хранение информации [3-6].

Характеристика мемристивного элемента G_M (например, проводимость) в текущий момент времени зависит от переменной $z(t)$, значение которой в данный момент зависит от её значений во все предыдущие моменты времени. Если в (1) функция, задающая динамику переменной z , имеет вид $f(x, z, t) = f(x)$, то

$$z(t) = z(0) + \int_0^t f[x(\theta)]d\theta, \quad (2)$$

т.е. состояние мемристивного элемента в момент времени t зависит от начального значения переменной z и «память» о начальном состоянии мемристивного элемента сохраняется бесконечно долго. Такой мемристор является идеальным.

Реальные мемристоры в настоящее время еще не столь идеальны и имеют ограниченную по времени память.

Принципиальное отличие мемристора от большинства типов современной полупроводниковой памяти и его главное преимущество перед ними заключаются в том, что он не хранит свои свойства в виде заряда. Это означает, что он полностью энергонезависим. Новый тип памяти показывает скорости чтения и записи в тысячу раз превышающие скорость обычной памяти, а также обладает высокой степенью прочности и плотности [7-9].

В бакалаврской работе исследуется синхронизация сложных пространственных структур в многослойной сети кубических отображений с мемристивной межслойной связью.

Целью данной выпускной квалификационной работы являлось изучение эволюции режимов в двух слоях с ростом значения параметра межслойной связи при различных значениях начального состояния всех элементов связи в случае идеальных мемристоров.

Для достижения данной цели ставились следующие задачи:

- установить возможные режимы для различных значений межслойной связи;
- установить сценарии эволюции режимов в двух слоях с ростом параметра межслойной связи при различных значениях начального состояния всех элементов.

1. Теоретическая часть

1.1. Описание исследуемой модели

Уравнения многослойной сети имеют вид

$$\begin{aligned}x_{j,i}(n+1) &= f(x_{j,i}(n)) + \frac{\sigma_i}{2P} \sum_{k=j-P}^{j+P} [f(x_{k,i}(n)) - f(x_{j,i}(n))] + kG(z_{j,i}(n)) [f(x_{j,i+1}(n)) - f(x_{j,i}(n))] + \\ &+ kG(z_{j,i-1}(n)) [f(x_{j,i-1}(n)) - f(x_{j,i}(n))], \\ z_{j,i}(n+1) &= (1-\gamma)z_{j,i}(n) + \varepsilon(x_{j,i}(n) - x_{j,i+1}(n)), \quad j=1, \dots, N, \quad i=1, 2, \dots, M. \quad (3)\end{aligned}$$

Граничные условия: $x_{j \pm N, i}(n) = x_{j, i}(n)$,

Здесь j – номер элемента в слое, i – номер слоя, n – дискретное время. Каждый слой представляет собой кольцо отображений с нелокальной связью, которая характеризуется коэффициентом внутрислойной связи σ_i и числом соседей P_i ($i = 1, \dots, M$) с каждой стороны. Параметры внутрислойной связи в разных слоях в общем случае могут различаться. Элементы сети при отсутствии связи описываются идентичными кубическими отображениями, задаваемыми функцией последования $f(\cdot)$ в соответствии с выражением (2):

$$f(x) = (\alpha - x^2)x \exp\left\{-\frac{x^2}{10}\right\}. \quad (4)$$

Сила связи слоев характеризуется коэффициентом k . Характеристика элементов связи $G(z)$ описывается выражением (3):

$$G(z) = 1 + \mu z^2, \quad (5)$$

где z – динамическая переменная, управляющая характеристикой нелинейной инерционной связи (мемристивная переменная), γ и ε – параметры мемристивной связи. Параметр γ характеризует скорость, с которой мемристивный элемент «забывает» свое первоначальное состояние. Его можно назвать параметром неидеальности мемристивного элемента связи. Случай $\gamma = 0$ соответствует идеальному мемристивному элементу.

Фиксированными параметрами системы (1) являются:

- Размер слоев ансамбля $N = 500$;
- Параметры элементов сети $\alpha = 2.8$, что соответствует хаосу в логистическом отображении;
- Параметры элементов мемристивной связи $\mu = 4$, $\varepsilon = 0.001$;
- Параметр связи в первом слое $\sigma_1 = 0.42$ (коэффициент внутрислойной связи в первом слое);
- Число соседей элемента в слое с каждой стороны $P = 50$.

В качестве управляющих параметров системы (1) использовались

- Коэффициенты внутрислойной связи σ_i , $i = 2, 3, \dots, M$;
- Параметр межслойной связи k и параметр забывания γ ;
- Также в качестве управляющего параметра будет рассматриваться начальное состояние всех элементов связи, которое будет полагаться одинаковым для всех элементов: $z_j(0) = z_0$.

2. Практическая часть

В практической части научно-исследовательской работы рассмотрена сеть из двух идентичных слоев: $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.42$. С помощью программы `iteration.c` при случайных начальных условиях были подобраны режимы в двух не взаимодействующих слоях при параметре межслойной связи $k=0$ и параметре забывания $\gamma \neq 0$. Начальные условия для исследования были подобраны такие, при которых в слоях устанавливались химерные состояния, пространственные профили которых приведены на Рис.1. Мгновенные значения переменных, соответствующие данным установившимся режимам фиксировались и использовались в качестве начальных условий во всех дальнейших расчетах для случая идентичных слоев.

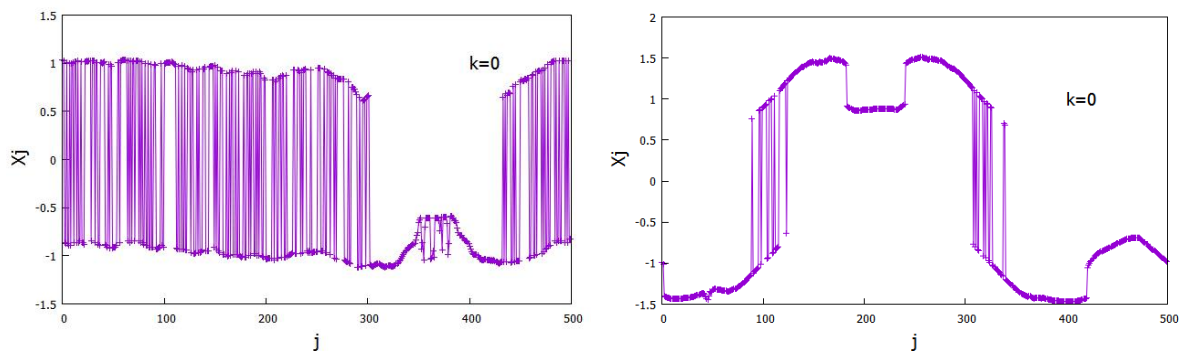
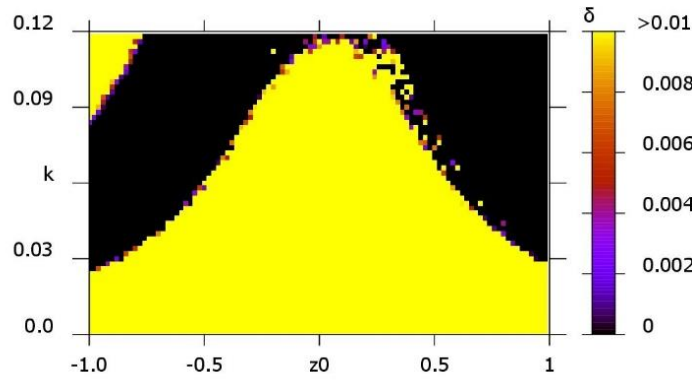


Рисунок 1. Мгновенные пространственные профили установившихся химерных состояний в двух идентичных не взаимодействующих слоях сети ($k = 0$) при $N = 500$; $\alpha = 2.8$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.42$; $P = 50$. Время установления 10000 итераций

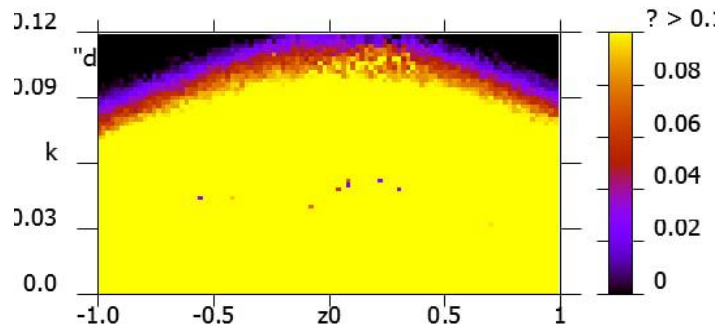
Для трех различных начальных условий, когда установились разнообразные режимы, были получены диаграммы значений средней погрешности синхронизации δ для идеальных и неидеальных мемристоров на плоскости на плоскости $z_0 - k$. Ниже приведены диаграммы для одной вариации начальных условий, как самые яркие примеры (Рисунки 2-3). При этом значений средней погрешности синхронизации δ , рассчитывалось по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n_{it}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n_c} \sum_{j=0}^N (x_{j2}^{(n)} - x_{j1}^{(n)})^2, \quad (6)$$

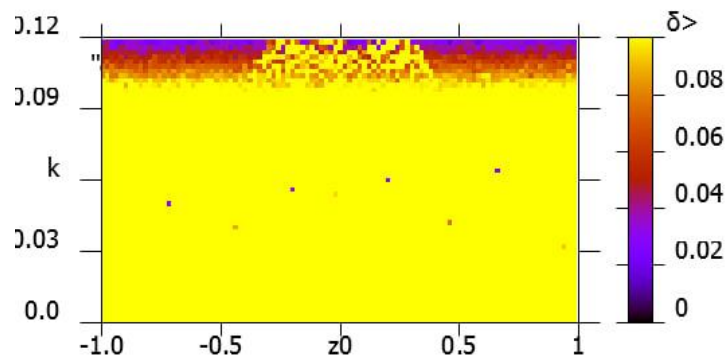
где n_{it} — число итераций, для которых проводилось усреднение.



а)



б)



в)

Рисунок 2. Диаграммы значений средней погрешности синхронизации δ для идеальных мемристоров на плоскости на плоскости $z_0 - k$ для начальных условий $edum=-222$ для различных параметров забывания γ для идентичных слоев: а) $\gamma=0$, б) $\gamma=0.0001$, в) $\gamma=0.001$.

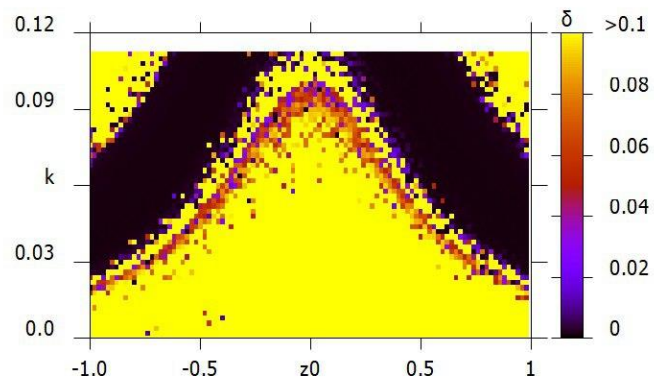
Цветом на диаграммах показаны уровни значений ошибки синхронизации δ . Они ограничены сверху величиной 0.01. Все значения δ , которые больше 0.01 показаны желтым цветом. Это ограничение было сделано, чтобы проявить различия значений ошибки в граничной области между синхронным и несинхронным режимом. Следует отметить, что граница синхронизации имеет форму колоколообразной кривой с максимумом при $z_0 = 0$.

Следом мы ввели в систему параметр забывания γ рассмотрели связь через неидеальный мемристор ($\gamma = 0.0001$) на Рис.2б. Можно отметить, что с появлением параметра забывания синхронизация структур наблюдается только при достаточно больших значениях параметра межслойной связи k , область синхронного поведения значительно уменьшилась для всех различных начальных условий. Область несинхронного режима при этом стала намного шире, в частности для значений z_0 в окрестности ± 1 . Также наблюдается значительное увеличение размера переходной области по сравнению с размером переходной области идеального мемристора.

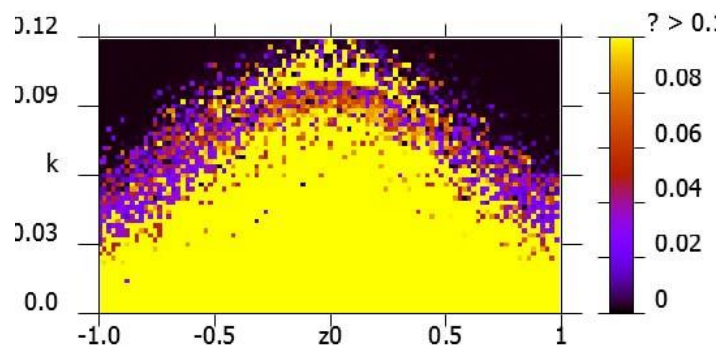
Диаграммы ошибки синхронизации, полученные при $\gamma = 0.001$, приведены на Рис.2в. Почти на всей области параметров наблюдается режим несинхронности. Лишь для достаточно больших значениях параметра межслойной связи $k \geq 0.1$ начинают наблюдаться переходные процессы от несинхронного режима к режиму синхронизации. Стоит отметить, что область переходных режимов, также как и для предыдущего случая неидеального мемристора при $\gamma = 0.001$, является достаточно большой по сравнению со случаем идеального мемристора. В окрестности значения $z_0 = 0$ наибольшая несинхронность слоёв.

Затем был выбран режим, устанавливающийся в двух слоях сети (3) в отсутствии межслойной связи ($k = 0$) в случае, когда коэффициенты внутрислойной связи различны и имеют значения $\sigma_1 = 0.42$, $\sigma_2 = 0.38$. Далее, была получена диаграмма значений средней погрешности синхронизации δ на плоскости $z_0 - k$ в случае идеальных мемристором связи. Она приведена на

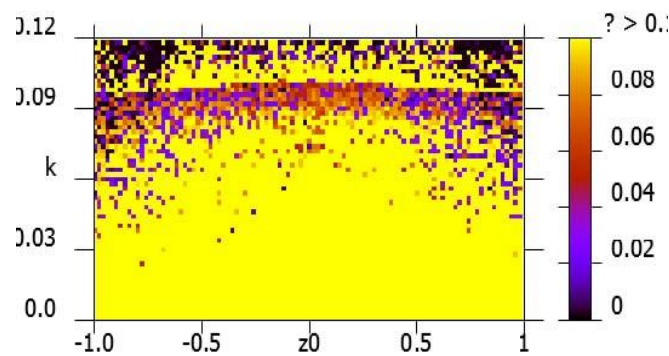
Рис.3. Подробнее диаграммы для неидентичных слоев описаны в самой бакалаврской работе.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Диаграммы значений средней погрешности синхронизации δ для идеальных мемристоров на плоскости на плоскости $z_0 - k$ для различных параметров забывания γ для неидентичных слоев при $\sigma_1=0.42$, $\sigma_2 = 0.38$: а) $\gamma = 0$, б) $\gamma=0.0001$, в) $\gamma=0.001$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- В двухслойной однородной сети хаотических бистабильных отображений при мемристивной связи слоев можно наблюдать эффект полной синхронизации пространственных структур.
- В случае идеальных мемристоров связи наблюдается сильная зависимость границы синхронизации от начальных состояний мемристоров. Так, задавая начальные значения переменных, управляющих мемристорами, близкими по модулю к единице, можно существенно уменьшить порог синхронизации по сравнению со случаем диссипативной связи.
- При слабом отклонении от идеальных мемристоров (при очень малых значениях параметра забывания γ) зависимость порога синхронизации от начальных состояний мемристоров частично сохраняется и исчезает с ростом γ .
- В случае неоднородной сети с разными внутрислойными коэффициентами связи мемристивная межслойная связь может привести к частичной синхронизации структур.
- В случае, когда неидентичные слои связаны через идеальные мемристоры связи поведение рассматриваемой модели сети становится неустойчивым.
- Система с мемристивной межслойной связью способна достигать режима частичной синхронизации сложных структур даже в неоднородных слоях при неидеальных мемристорах связи с достаточно большими значениями параметра забывания ($\gamma = 0.001$), в то время, как в идентичных слоях синхронизация для данного значения параметра отсутствовала в исследованном интервале значений коэффициента связи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. L.O. Chua, S.M. Kang, Memristive devices and systems // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol.64, no 2. pp.209–223.
2. D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, The missing memristor found // Nature. 2008. Vol.453. pp. 80–83.
3. T. Berzina, A. Smerieri, M. Bernabó, A. Pucci, G. Ruggeri, V. Erokhin, and M. Fontana, Optimization of an organic memristor as an adaptive memory element // J. Appl. Phys. 2009. Vol.105, no.12. 124515.
4. H. Jeong, J. Kim, J. Kim, J. Hwang, J. Kim, J. Lee, T. Yoon, B. Cho, S. Kim, R. Ruoff, and S. Choi, Graphene oxide thin films for flexible nonvolatile memory applications // Nano Lett. 2010. Vol. 10, no.11. pp.4381– 4386.
5. T. Chang, S.-H. Jo, K.-H. Kim, P. Sheridan, S. Gaba, W. Lu, Synaptic behaviors and modeling of a metal oxide memristive device // Appl Phys A. 2011. Vol.102. pp.857–863.
6. S. Erokhina, V. Sorokin, and V. Erokhin, Polyaniline-based organic memristive device fabricated bylayered-by-layered deposition technique // Electronic Materials Letters. 2015. Vol. 11, no.5. pp.801–805.
7. T. Chang, S.-H. Jo, K.-H. Kim, P. Sheridan, S. Gaba, W. Lu, Synaptic behaviors and modeling of a metal oxide memristive device // Appl Phys A. 2011. Vol.102. pp. 857–863.
8. L. Chen, Ch. Li, T. Huang, Y. Chen, Sh. Wen, J. Qi, A synapse memristor model with forgetting effect // Phys. Lett. A. 2013. Vol.377. pp. 3260–3265.
9. E. Zhou, L. Fang, B. Yang, A general method to describe forgetting effect of memristor // Phys. Lett. A. 2019. Vol.383(10). pp.942-948.