

©2011 р. С.Д. Галюк, М.Я. Кушнір, Л.Ф. Політанський

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

СИНХРОНІЗАЦІЯ ХАОСУ ЧЕРЕЗ КАНАЛ ЗВ'ЯЗКУ З ОБМЕЖЕНОЮ ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ

Досліджено синхронізацію хаотичних систем при моделюванні каналу зв'язку за допомогою еквівалентних фільтрів. Виявлено, що незалежно від частотної характеристики фільтра, змінюючи коефіцієнт зв'язку можна досягнути узагальненої синхронізації хаосу. Експериментально досліджено узагальнену синхронізацію між однонаправлено зв'язаними через фільтр схемами Чуа.

Ключові слова: узагальнена синхронізація, фільтрація, канал зв'язку, схема Чуа.

Исследовано синхронизацию хаотических систем при моделировании канала связи с помощью эквивалентных фильтров. Обнаружено, что независимо от частотной характеристики фильтра изменяя коэффициент связи, возможно достичь обобщенной синхронизации хаоса. Экспериментально исследовано обобщенную синхронизацию при однонаправленной связи схем Чуа и наличии фильтра в канале связи.

Ключевые слова: обобщенная синхронизация, фильтрация, канал связи, схема Чуа.

Synchronization of chaotic systems in the presence of filtering in the communication channel is investigated. It is found that regardless of the frequency response of the filter by changing the coupling factor may achieve generalized synchronization of chaos. Experimentally investigated the generalized synchronization in unidirectional communication circuits Chua and a filter in the communication channel.

Keywords: generalized synchronization, filtering, communication channel, Chua's scheme.

Вступ

Фільтрація сигналу, що передається по каналу зв'язку є одним зі збурюючих факторів, що впливає на якість передачі інформації у хаотичних системах зв'язку. Хаотичні сигнали за своєю природою є широкосмуговими, тому амплітудні і фазові спотворення хаотичного сигналу при проходженні через канал зв'язку спотворюють вхідний сигнал приймача, що часто призводить до неможливості встановлення синхронізації між передавачем і приймачем. На сьогодні відомі такі способи боротьби з фільтрацією сигналів у каналі зв'язку: використання вузько-смугових хаотичних сигналів, використання на вході приймача коректуючих фільтрів з АЧХ оберненою до АЧХ каналу зв'язку, включення у кола хаотичного генератора приймача і передавача фільтруючих елементів з характеристиками, еквівалентними характеристикам каналу зв'язку [1]. Перераховані способи при умові сильних завад стають неефективними і не дозволяють задовільно

синхронізувати хаотичні системи.

Для передавання інформації серед багатьох способів хаотичної синхронізації найбільшу увагу приділено повній і узагальненій синхронізації. Відомо, що досягнути повної синхронізації хаотичних систем при наявності навіть слабкої фільтрації в каналі зв'язку неможливо [2,3]. Отже, використання таких способів хаотичної модуляції як хаотичне маскування, перемикування хаотичних режимів та нелінійне підмішування є проблематичним при використанні каналів зі смугою пропускання меншою за смугу частот хаотичного сигналу. Проведені в останні роки дослідження показали, що найбільш перспективним способом синхронізації хаосу з точки зору використання у системах передавання інформації є узагальнена синхронізація [4]. Границя узагальненої синхронізації у порівнянні з іншими видами хаотичної синхронізації володіє значною стійкістю до шумів. Для окремих систем (схеми Чуа, системи Реслера) залежність границі

синхронізації хаотичної системи від параметра нелінійна. Це дозволяє використовувати перемикач між режимом синхронізації і десинхронізації для передавання цифрової інформації в умовах високого рівня завад

Мета роботи полягає у дослідженні явищ синхронізації хаотичних систем при передаванні сигналу через канал з обмеженою пропускнуою здатністю та питанню використання вузькосмугових хаотичних сигналів для передавання інформації.

1. Узагальнена синхронізація хаосу

Узагальнена синхронізація означає, що після закінчення перехідних процесів між станами двох зв'язаних систем існує деяка функціональна залежність:

$$y = F(x), \quad (1)$$

де x, y – вектори стану ведучої і веденої систем. Функція $F(x)$ може мати складний вигляд і навіть бути фрактальною.

Довільні вхідні і відповідні вихідні сигнали каналу зв'язку пов'язані між собою функціональною залежністю:

$$x' = W(x, r(t)), \quad (2)$$

де функція $W(x)$ є математичною моделлю каналу, і в загальному випадку залежить від вектору параметрів каналу $r(t)$, що можуть змінюватися з часом, x' – вихідні сигнали каналу зв'язку. Звичайно, що вигляд функції $W(x)$ неможливо точно аналітично описати, оскільки характеристики будь-якого каналу залежать від багатьох факторів. Підставивши рівняння (2) в (1) отримуємо:

$$y = F(W(x)) \equiv G(x, r(t)). \quad (3)$$

Рівняння (1) і (3) в загальному випадку описують функціональну залежність між станами двох систем, отже логічно припустити, що може існувати однозначна функція $G(x, r(t))$ і тоді системи x та y знаходяться у режимі узагальненої синхронізації.

2. Синхронізація схем Чуа

Розглянемо одну з найпростіших хаотичних систем - схему Чуа. Для виявлення режиму узагальненої синхронізації використаємо метод допоміжної системи. Після закінчення перехідних процесів узагальненій синхронізації відповідає синхронна поведінка

веденої системи та допоміжної системи [5]. Для ідентичних систем повна синхронізація є окремим випадком узагальненої синхронізації, при цьому $y = F(x) \equiv x$.

Нехай пропускну здатність каналу зв'язку обмежена зверху по частоті. Змоделюємо такий канал за допомогою RC-фільтра нижніх частот. Математична модель системи в безрозмірному виді матиме вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha_1(y_1 - x_1 - g(x_1)) \\ \dot{y}_1 = x_1 - y_1 + z_1 \\ \dot{z}_1 = -\beta_1 y_1 \\ v = u(y_1 - v) \\ \dot{x}_{2,3} = \alpha_{2,3}(y_{2,3} - x_{2,3} - g(x_{2,3})) + e(v - y_{2,3}) \\ \dot{y}_{2,3} = x_{2,3} - y_{2,3} + z_{2,3} \\ \dot{z}_{2,3} = -\beta_{2,3} y_{2,3} \end{cases} \quad (4)$$

де $x_i, y_i, z_i, i=1, 2, 3$ – змінні стану системи, пропорційні відповідно напругам на конденсаторах C_{1i}, C_{2i} та струму через індуктивності L_i , v – безрозмірний вхідний сигнал фільтра. Параметри системи: $\alpha_1=9,27$, $\alpha_2=9,26$, $\alpha_3=9,28$, $\beta_1=12,84$, $\beta_2=12,85$, $\beta_3=12,84$, u – безрозмірна частота зрізу фільтра. Нелінійна характеристика генератора описується виразом:

$$g(x_i) = m_0 x_i + \frac{1}{2}(m_1 - m_0)[|x_i + 1| + |x_i - 1|]$$

де $m_0=-1,238$, $m_1=-0,6665$.

На рис.1 приведено залежності помилки синхронізації r_g між веденою і допоміжною системами від коефіцієнта зв'язку для різних значеннях частоти зрізу фільтра u , отримана шляхом математичного моделювання системи (4) в середовищі *MatLab*. Диференціальні рівняння розв'язувалися методом Рунге-Кутта четвертого порядку. З аналізу результатів моделювання слідує, що узагальнена синхронізація можлива для всіх досліджуваних частот зрізу фільтра. Поріг синхронізації залежить від рівня фільтрації і зростає при збільшенні u . Очевидно це явище зумовлене впливом двох факторів: зменшенням потужності і зростанням складності (збільшенням фрактальної розмірності) вхідного сигналу внаслідок фільтрації [6].

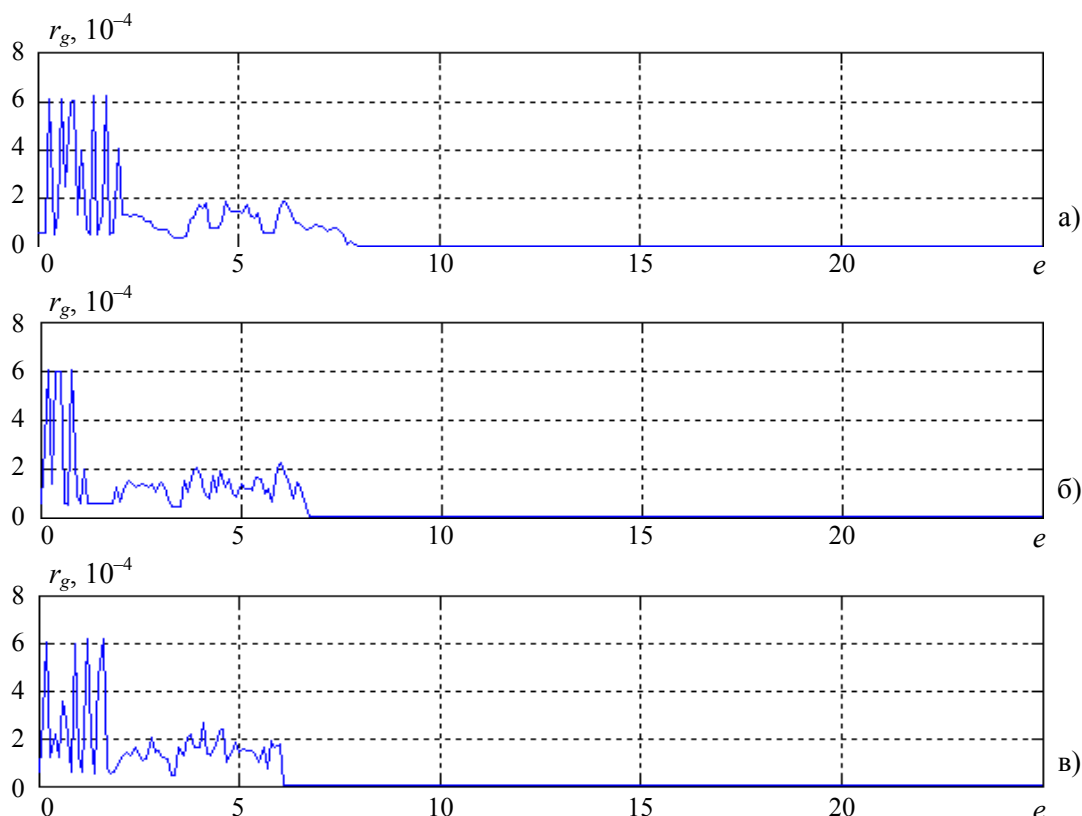


Рис. 1. Залежність помилки синхронізації r_g між веденою і допоміжною системами від коефіцієнта зв'язку e при значенні частоти зрізу фільтра $u=0,2$ (а), $u=1$ (б), $u=3$ (в).

Великі порогові значення коефіцієнта зв'язку ($e > 7$) свідчать, що синхронізація виникає внаслідок повного пригнічення режиму власних коливань ведучої системи.

3. Експериментальне дослідження

Експериментально досліджувана схема приведена на рис.2. Параметри елементів схеми наступні: $R_1=1587$ Ом, $R_2=1582$ Ом, $R_3=1585$ Ом, $L_1=L_2=L_3=22$ мГн $C_{11}=11,3$ нФ, $C_{12}=11$ нФ, $C_{13}=11,5$ нФ, $C_{21}=98,2$ нФ, $C_{22}=98,4$ нФ, $C_{23}=98,2$ нФ, $C=98,2$ нФ $R=0 \dots 10$ кОм R_{e1} , $R_{e2}=0 \dots 10$ кОм, $NR1$, $NR2$, $NR3$ – діоди Чуа [1]. За допомогою змінних резисторів R_{e1} і R_{e2} регулюється коефіцієнт зв'язку між системами, за допомогою опору R регулюється частота зрізу фільтра.

Хаотичний атрактор веденої системи при вказаних вище значеннях параметрів має вигляд подвійного завитка (рис.2а), спектр вихідного сигналу займає смугу частот 8 кГц на рівні -10 дБ (рис.2б).

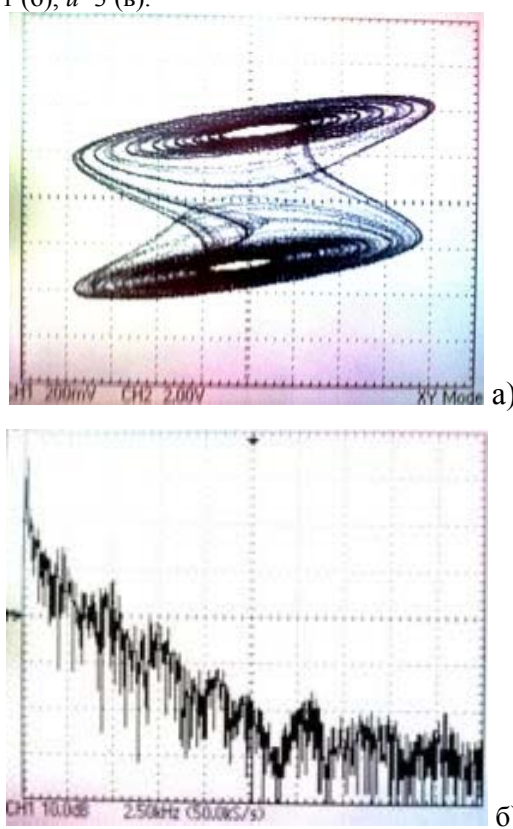


Рис. 3. Схема Чуа: хаотичний атрактор (а), спектр вихідного сигналу U_{C11} (б).

3.1. Синхронізація через фільтр нижніх частот

При моделюванні каналу за допомогою ФНЧ першого порядку досліджувана схема матиме вигляд рис.3. Отримані експериментально фазові портрети та спектр вхідного сигналу приведені на рис.4.

З фазового портрету сигналів U_{C21} і U_{C22} при $R_{e1}=R_{e2}=170$ Ом, $R=1,2$ кОм випливає, що при заданому значенні сили зв'язку повна

синхронізація між ведучою і веденою системами відсутня (рис.4б). Залежність U_{C22} від U_{C23} має вигляд прямої лінії (рис.4в), тобто ведена і допоміжна системи демонструють синхронну поведінку. Спектр вхідного сигналу веденої системи (рис.4д), внаслідок фільтрації, значно вузьчий за спектр вихідного сигналу веденої системи, проте узагальнена синхронізація має місце.

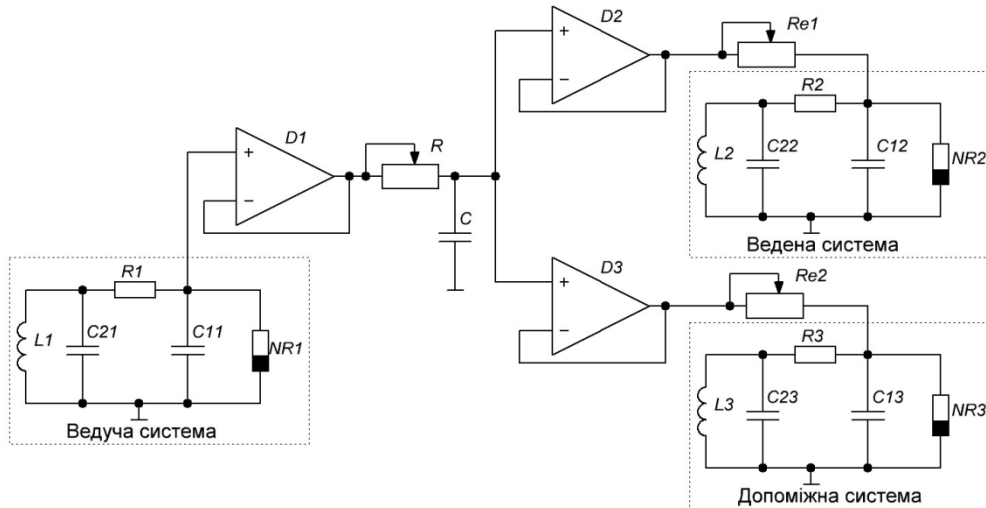


Рис. 3. Виявлення узагальної синхронізації методом допоміжної системи при моделюванні каналу RC-фільтром нижніх частот.

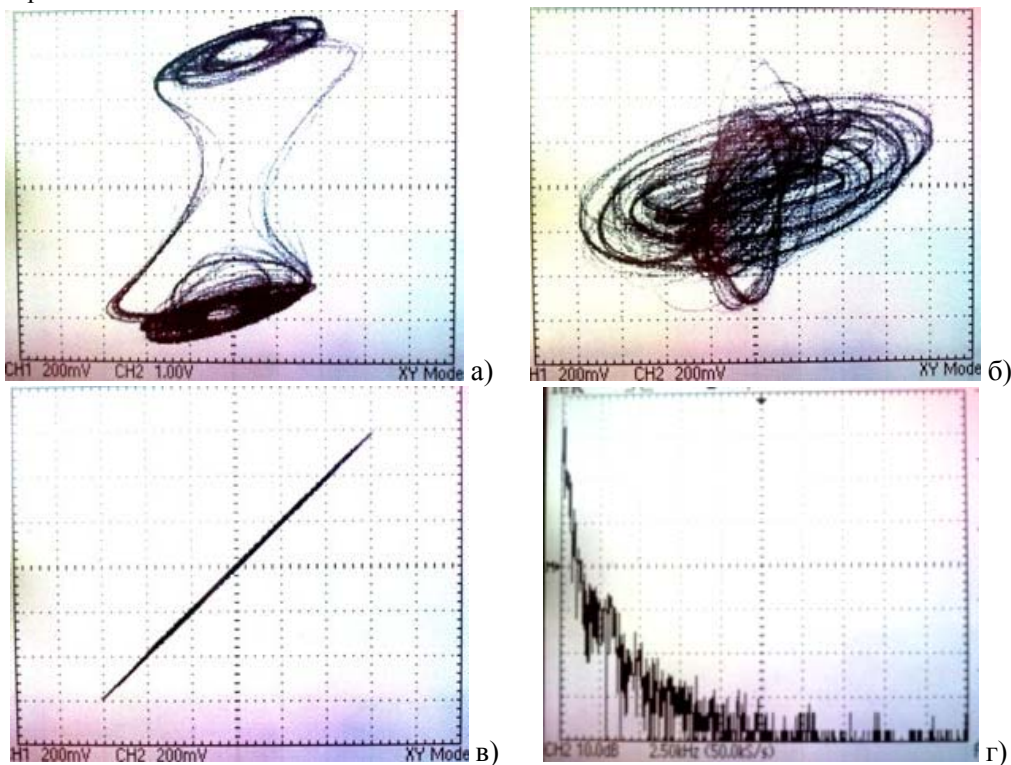


Рис. 4. Узагальнена синхронізація схем Чуа через фільтр низьких частот: хаотичний атрактор веденої системи (а), залежність $U_{C22}(U_{C11})$ (б), залежність $U_{C22}(U_{C23})$ (в) і спектр вхідного сигналу (г).

3.2. Синхронізація через смуговий фільтр

Хаотичні сигнали часто мають у спектрі постійну складову, що є небажаною при використанні таких сигналів в якості несучого коливання. Постійна складова не несе корисної інформації, проте зменшує енергетичну ефективність схеми ускладнює передавання сигналів по безпроводних каналах зв'язку. З іншого боку існує проблема формування смугових хаотичних сигналів і сигналів з заданим спектром, придатних для синхронізації хаотичних систем.

Розглянемо синхронізацію хаотичних систем з'єднаних через смуговий фільтр, схема якого наведена на рис.5. Параметри елементів фільтра: $C_1=100$ нФ, $C_2=1$ мкФ, $L=22$ мГн.

Спектр вхідного сигналу свідчить про

відсутність постійної складової у вхідному сигналі (рис.6а). Змінюючи коефіцієнт зв'язку за допомогою R_{e1} та R_{e2} експериментально вдалося досягнути синхронізації веденої і допоміжної систем при $R_{e1}=R_{e2}=1,617$ кОм. Залежність сигналів U_{C22} (U_{C23}) є прямою лінією, що свідчить про встановлення узагальненої синхронізації. В експерименті при збільшенні коефіцієнта зв'язку (зменшенні опорів R_{e1} і R_{e2}) узагальнена синхронізація зберігалася, проте амплітуди сигналів веденої системи зменшувалися.

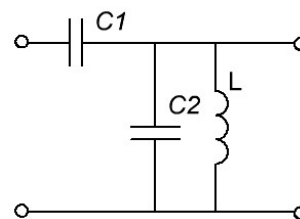


Рис. 5. Смуговий фільтр.

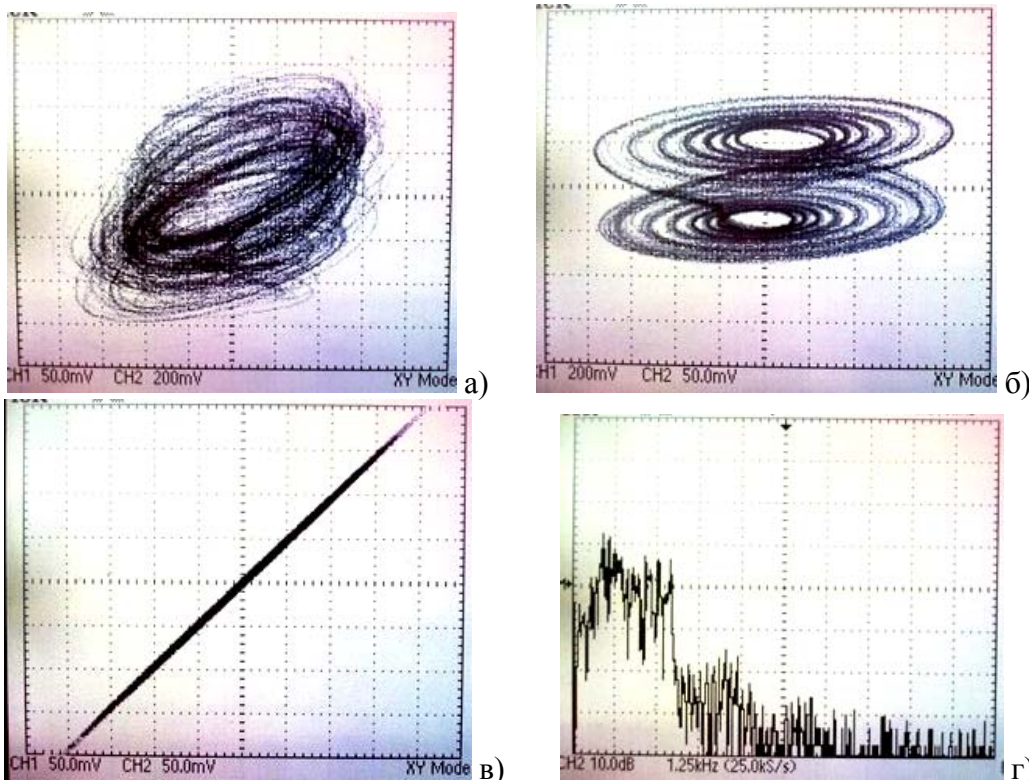


Рис. 6. Узагальнена синхронізація схем Чуа через смуговий фільтр: хаотичний аттрактор веденої системи (а), залежність U_{C22} (U_{C11}) (б), залежність U_{C22} (U_{C23}) (в) і спектр вхідного сигналу (г).

3.3. Синхронізація через режекторний фільтр

Розглянемо вплив затухання всередині спектру хаотичного сигналу на синхронізацію. Промодельноємо такий канал за допомо-

гою режекторного фільтра з наступними параметрами: $C=1$ мкФ, $L=22$ мГн, $R=220$ Ом. Схема фільтра наведена на рис.7. При вибраних параметрах резонансна частота фільтра становить 1,07 кГц.

Хаотичний атрактор веденої системи наведений на рис.8а, при $R_{e1}=R_{e2}=290$ Ом відрізняється від оригінального хаотичного атрактора ведучої системи рис.3а. Із рис.8б випливає, що повна синхронізація між ведучою і веденою системами відсутня. Водночас, залежність U_{C22} (U_{C23}) на рис.8в свідчить про рівність сигналів $U_{C22}=U_{C23}$, тобто системи

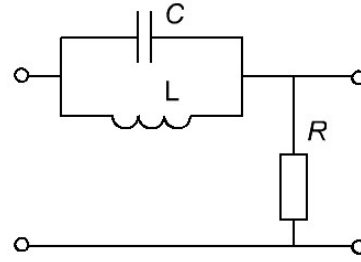
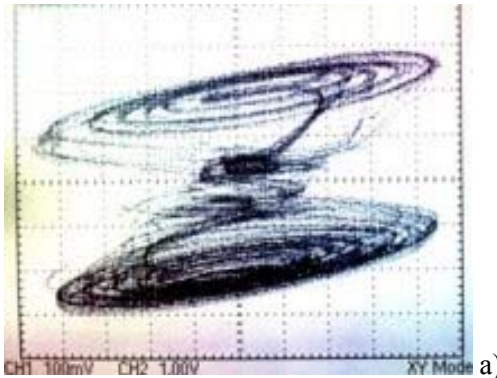
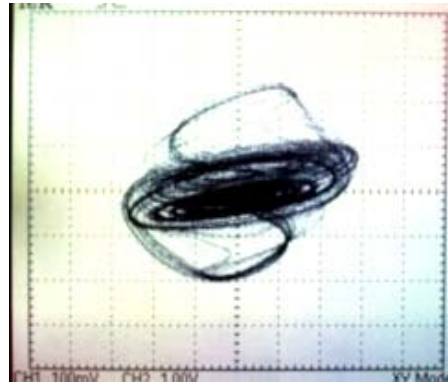


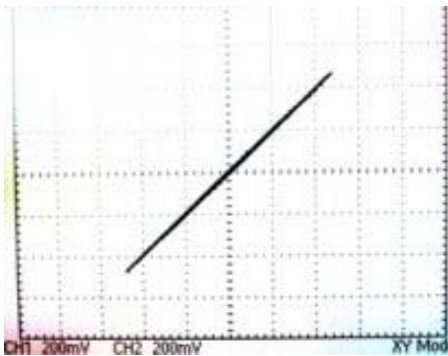
Рис. 7. Режекторний фільтр



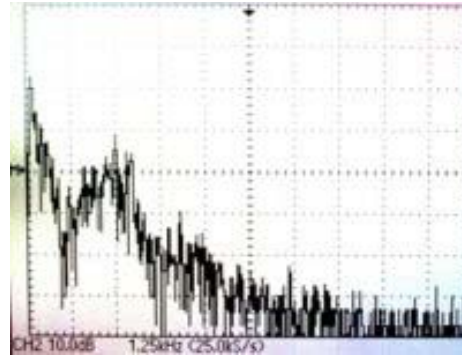
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Узагальнена синхронізація схем Чуа через режекторний фільтр: хаотичний атрактор веденої системи (а); залежність U_{C22} (U_{C11}) (б); залежність U_{C22} (U_{C23}) (в); спектр вхідного сигналу (г).

знаходяться в режимі узагальненої синхронізації. У спектрі вхідного сигналу чітко спостерігається згасання на частоті $f \approx 1,2$ кГц.

Висновки

При моделюванні каналу зв'язку за допомогою найпростіших еквівалентних фільтрів показано, що незалежно від смуги пропускання (згасання) фільтра існують значення коефіцієнта зв'язку, при яких можлива узагальнена синхронізація хаосу. Отримані результати можна пояснити розглядаючи хаотичну синхронізацію в термінах Фур'є-спектру. Режиму узагальненої синхронізації відповідає синхронізація більшості спектральних складових сигналів ведучої і веденої систем.

Експериментальне дослідження при використанні фільтра низьких частот, смугового та режекторного фільтрів підтвердили теоретичні припущення та результати моделювання. У всіх трьох випадках змінюючи силу зв'язку між системами вдалося досягнути узагальненої синхронізації, незважаючи на значні спотворення оригінального хаотичного сигналу. Отримані в роботі результати представляють практичний інтерес при розробленні та дослідженні систем зв'язку з використанням хаотичних сигналів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмитриев А.С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. – М.: Издательство Физико-математической литера-

- туры. 2002. – 252с.
2. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Синхронизация хаоса с учетом искажений сигнала в канале связи: Эксперимент и численное моделирование // Журнал технической физики. – 2008. – **78**(11). – С.77-84.
 3. Галюк С.Д., Кушнір М.Я., Політанський Л.Ф., Політанський Р.Л. Синхронізація хаотичних систем і фільтрація сигналів в каналі зв'язку // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – **43**(1/5). – С.20-24.
 4. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. Скрытая передача информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шумов // Журнал технической физики. – 2010. – **80**(4). – С.1-8.
 5. Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach // Phys. Rev. E. – 1996. – **53**(5). – P.4528-4535.
 6. Zhu Liqiang, Lai Y.-C., Hoppensteadt F. C., Bolt E.M. Numerical and experimental investigation of the effect of filtering on chaotic symbolic dynamics // Chaos. – 2003. – **13**(14). – P.410-419.