

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ ОДНОМОДОВЫХ ОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СМЕШАННЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бурдин А.В., Бурдин В.А., Султанов А.Х., Дельмухаметов О.Р.

Представлен алгоритм расчета хроматической дисперсии одномодовых оптических волокон (ОВ), реализующий метод смешанных конечных элементов в векторной постановке. Возможности алгоритма демонстрируются на примерах расчетов для микроструктурированных ОВ (МОВ). Корректность оценок подтверждается результатами их сравнения с известными решениями и экспериментальными данными.

Постановка задачи

Непрерывный рост потребности в увеличении полосы пропускания линий передачи телекоммуникационных сетей определяет интерес к задачам исследования хроматической дисперсии оптических волокон (ОВ). К наиболее точным и универсальным методам прогноза параметров ОВ относится метод конечных элементов (МКЭ) с полностью векторным представлением электрических и магнитных полей [1-6].

Одну из основных проблем применения МКЭ для анализа диэлектрических волноводов вызывает появление нефизических решений – «духов». Такие решения исключаются при использовании метода смешанных конечных элементов [4-8]. Однако применение метода смешанных конечных элементов для решения задачи в векторной постановке требует значительных вычислительных ресурсов. Это, в первую очередь, связано с построением и обработкой разреженных матриц. Проблема усугубляется тем, что точность решения задачи на собственные значения должна быть очень высокой, так как для расчета хроматической дисперсии необходимо знать первую и вторую производные спектральной зависимости постоянной распространения, которые при использовании МКЭ могут быть рассчитаны только путем численного дифференцирования.

Таким образом, для реализации решения задачи прогноза хроматической дисперсии на основе МКЭ необходимо построение алгоритмов, обеспечивающих удовлетворительную точность решения спектральной задачи при относительно умеренных требованиях к вычислительным ресурсам.

В работе представлен алгоритм, реализующий векторный метод смешанных конечных элемен-

тов с разложением поля на ребрах и узлах треугольных элементов. Алгоритм не предъявляет специальных требований к вычислительным ресурсам и может быть реализован на обычных персональных компьютерах уровня Intel Core 2 Quad 8200@2.33 ГГц, 8 Гб ОЗУ.

Метод смешанных конечных элементов и алгоритм расчета постоянной распространения диэлектрического волновода

В работе использовался метод смешанных конечных элементов, основанный на известном решении, в котором для представления поперечных компонент поля задавались векторные базисные функции, определенные на ребрах треугольных элементов [7-8]. Рассмотрим это решение подробнее.

В общем случае для анализа направляемых мод векторным методом конечных элементов, необходимо дискретизировать ограниченную область волокна с заданными граничными условиями. Для оптического волновода с произвольным профилем показателя преломления, произвольной формой поперечного сечения и идеально проводящими стенками, векторное уравнение Гельмгольца, полученное из уравнений Максвелла, записывается в виде:

$$\nabla \times ([p] \nabla \times \phi) - k_0^2 [q] \phi = 0, \quad (1)$$

где ϕ может выступать в качестве вектора напряженности электрического E или магнитного H поля. Показатель преломления материала n_x, n_y, n_z в направлениях x, y, z соответственно, связан с тензорами диэлектрической $[q]$ и магнитной $[p]$ проницаемости следующим образом:

$$[p] = \begin{bmatrix} p_x & 0 & 0 \\ 0 & p_y & 0 \\ 0 & 0 & p_z \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$[q] = \begin{bmatrix} q_x & 0 & 0 \\ 0 & q_y & 0 \\ 0 & 0 & q_z \end{bmatrix}.$$

Для $\phi = E$:

$$p_x = p_y = p_z = 1, \quad q_x = n_x^2, q_y = n_y^2, q_z = n_z^2.$$

Для $\phi = H$:

$$q_x = q_y = q_z = 1,$$

$$p_x = 1/n_x^2, p_y = 1/n_y^2, p_z = 1/n_z^2.$$

Полагая волновод однородным вдоль оси z , записывают ϕ как

$$\phi = \bar{\phi}(x, y) \cdot \exp(-j\beta z).$$

Разбивая поперечное сечение волокна на треугольные конечные элементы смешанного типа, компоненты поля в каждом треугольнике представляют как разложение

$$\bar{\phi} = i_x \cdot \bar{\phi}_x + i_y \cdot \bar{\phi}_y + i_z \cdot \bar{\phi}_z = \left[\left[i_x \{U\}^T + i_y \{V\}^T \right] \{\bar{\phi}_t\}_e + i_z j\beta \{N^T\} \{\bar{\phi}_z\}_e \right], \quad (3)$$

где $\{\phi_t\}_e$ и $\{\phi_z\}_e$ значения тангенциальной и аксиальной составляющих поля на ребрах и узлах элементов, $\{U\}$ и $\{V\}$ базисные функции для реберных и узловых конечных элементов, соответственно.

После подстановки (3) в (1) и применения процедуры метода конечных элементов для анализа направляемых мод была получена система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая в общем виде представлена как:

$$([K] - \beta^2 [M])\{\phi\} = \{0\}. \quad (4)$$

Вывод и описание СЛАУ подробно описаны в работах [7-8]. Решая задачу на собственные значения для (4), находят постоянные распространения требуемых мод диэлектрического волновода.

Предлагаемый алгоритм базируется на решении СЛАУ (4). Он включает последовательность следующих операций: задание геометрии сечения ОВ, генерация сетки, задание значений показателя преломления в узлах сетки, формирование локальных и глобальных матриц, решение задачи на собственные значения, обработка и визуализация результатов. Одна из операций, требующая наиболее значительных затрат из-за особенностей работы с разреженными матрицами – сборка глобальных матриц. Можно сократить время решения задачи формирования матриц, если распараллелить процесс. Другой путь – оптимизация алгоритма сборки глобальных матриц. В данном случае использовали алгоритм, согласно которому сначала формируют столбцы матрицы, а затем из них комплектуют глобальную матрицу [9]. Это

позволило во много раз сократить время счета. Причем чем больше размер матрицы, то есть чем мельче сетка, тем более выгодным становится такой способ формирования. В результате, при высоких требованиях, предъявляемых к точности расчетов, процесс вычислений занимает секунды, а не часы, как при использовании стандартного подхода.

Учет материальной дисперсии кварцевого стекла

Для определения спектральных характеристик показателя преломления при произвольных значениях концентрации легирующих добавок используется метод учета дисперсионных свойств материала ОВ, основанный на линейной аппроксимации зависимости показателя преломления кварцевого стекла от концентрации легирующей добавки [10]:

$$n_C = n_S + C \cdot (n_D - n_S), \quad (5)$$

где n_C – показатель преломления кварцевого стекла с концентрацией C легирующей присадки; n_D – показатель преломления чистого материала легирующей присадки; n_S – показатель преломления чистого кварцевого стекла; C – концентрация легирующей добавки.

Расчет хроматической дисперсии

Хроматическая дисперсия рассчитывается по формуле [11-12]:

$$D = -\frac{k}{\lambda \cdot c} \cdot \frac{d^2 \beta}{dk^2}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (6)$$

где β – постоянная распространения; λ – длина волны; c – скорость света.

Производные рассчитывались методами численного дифференцирования при использовании аппроксимации спектральных характеристик сплайнами.

Расчет эффективного показателя преломления основной моды МОВ

В целях демонстрации возможностей предложенного алгоритма выполним расчеты для МОВ, отличающихся сложной конструкцией и большим диапазоном изменений значения показателя преломления.

На рис. 1 представлен поперечный разрез МОВ, описанного в работе [13]. Серым цветом отображены области из чистого кремния, белым цветом – заполненные воздухом. МОВ выполнено из чистого кварцевого стекла. «Дырки» заполнены воздухом.

Примеры двух вариантов дискретизации области МОВ показаны на рис. 2, при этом для генерации сетки было использовано 195800 элементов смешанного типа. Первый вариант (рис. 2а) – показатель преломления задается для элемента целиком и при этом сетка формируется так, чтобы грани элементов совпадали с геометрическими границами раздела сред. Второй вариант (рис. 2б) – показатель преломления присваивается вершинам треугольных элементов, а границы раздела сред пересекают грани треугольных элементов случайным образом. В таблице 1 приведены результаты расчета эффективного показателя преломления основной моды МОВ – $n_e = \beta/k$. Данные приведены для обоих вариантов в зависимости от числа элементов дискретизации. Там же указано время вычислений для компьютера Intel Core 2 Quad 8200@2.33 ГГц, 8 Гб ОЗУ. Расчеты выполнялись на длине волны 1550 нм.

Таблица 1

Число элементов	Вариант 1 n_e	Вариант 2 n_e	t, c
6 490	1.4520958	1.4515926	19
31 480	1.4520879	1.4518774	123
89 640	1.4520832	1.4520146	583
170 010	1.4520819	1.4520378	1959

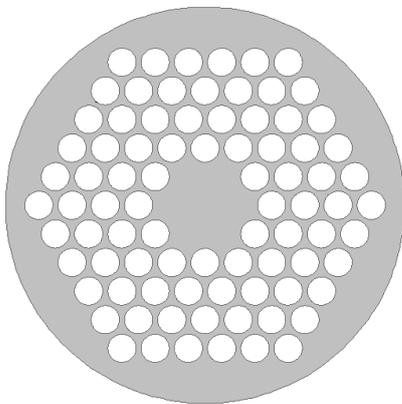


Рис. 1. Поперечный разрез МОВ

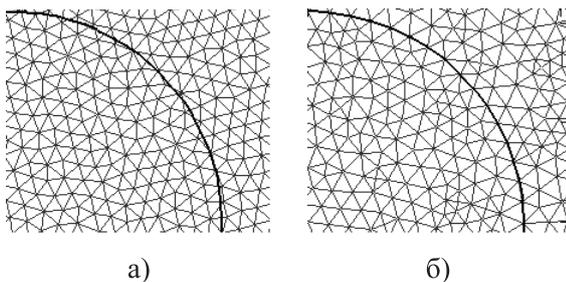


Рис. 2. Варианты формирования сетки

На рис. 3 показано полученное в результате расчетов распределение интенсивности фундаментальной моды по сечению исследуемого МОВ.

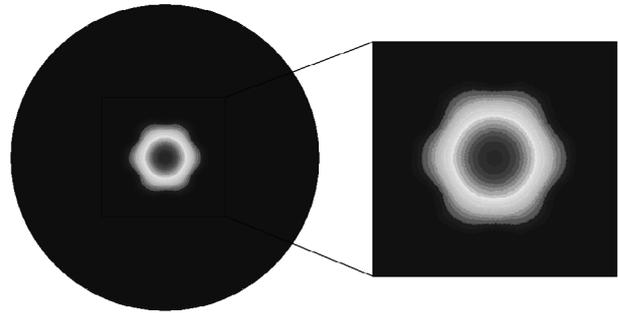


Рис. 3. Распределение интенсивности фундаментальной моды

Рассчитанные по предложенному алгоритму оценки n_e , приведенные в таблице 1, отличаются от представленных в [13] результатов, полученных с помощью КР-метода $n_e = 1,4509$ и коммерческой программы FIMMWAVE $n_e = 1,4533$; менее чем на 0,01%.

Расчет хроматической дисперсии МОВ

Расчет спектральных характеристик хроматической дисперсии был выполнен для МОВ, для которого в работе [14] приведены данные конструкции, а также характеристики экспериментальных образцов, полученные в результате измерений.

На рис. 4 представлено поперечное сечение исследуемого МОВ. Серым цветом отображены области из чистого кремния, белым цветом – заполненные воздухом, а черным – области из кремния легированного окисью германия.

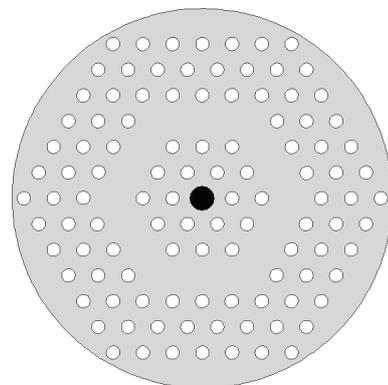


Рис. 4. Поперечный разрез МОВ

На рис. 5 представлены спектральной характеристики хроматической дисперсии дан-

ного одномодового МОВ. В частности, приведенные в [14] результаты расчета методом конечных разностей во временной области (FDTD) – кривая 1, и результаты измерений характеристики образца МОВ кривая 2, а также результаты расчета по предложенному алгоритму – кривая 3.

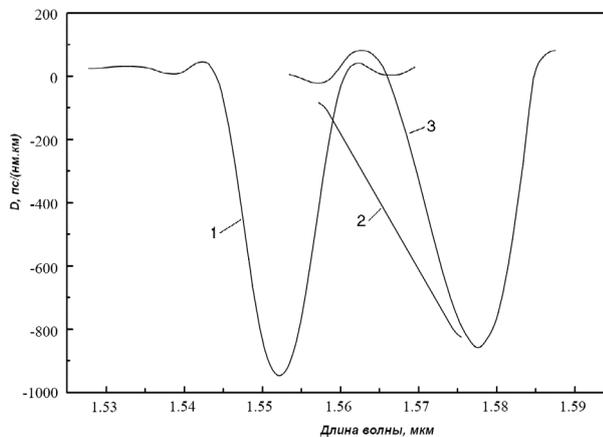


Рис. 5. Спектральные характеристики хроматической дисперсии одномодового МОВ

Как видим, спектральная характеристика хроматической дисперсии 3, рассчитанная по предложенному в данной работе алгоритму, достаточно хорошо соответствует экспериментальной кривой 2 и лучше согласуется с данными измерений по сравнению с представленными в [14] результатами расчетов на основе метода FDTD.

Заключение

Предложен алгоритм расчета хроматической дисперсии оптических волокон, реализующий метод смешанных конечных разностей. На примерах вычислений оценок хроматической дисперсии одномодовых МОВ и сопоставления их с экспериментальными данными показано, что предложенный в работе алгоритм обеспечивает удовлетворительную погрешность оценок при относительно невысоких требованиях к вычислительным ресурсам и может быть реализован на обычных персональных компьютерах уровня Intel Core 2 Quad 8200@2.33 ГГц, 8 Гб ОЗУ.

Литература

- Боголюбов А.Н., Делицын А.Л. Новая постановка задачи расчета мод диэлектрических волноводов методом конечных элементов // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. Т.36, №2, 1995. – С. 95-98.
- Нечаев О.В., Шурина Э.П., Федорук М.П. Использование векторного метода конечных элементов для численного решения квазистационарных уравнений Максвелла // Вычислительные технологии. Т.9, №5, 2004. – С. 73-81.
- Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Минаев Д.В., Сычкова А.В. Расчет диэлектрических волноведущих систем конечно-разностным методом // Радиотехника и электроника. Т.38, №5, 1993. – С. 804-809.
- Боголюбов А.Н., Делицын А.Л. Расчет диэлектрических волноводов методом конечных элементов, исключая появление нефизических решений // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 1, 1996. – С. 9-13
- Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Векторный метод конечных элементов. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2001. – 69 с.
- Koshiba M., Hayata, K., Suzuki M. Improved Finite-Element Formulation in Terms of the Magnetic Field Vector for Dielectric Waveguides // IEEE Trans. Microw. Theory & Tech. Vol. MTT-33, No. 3, 1985. – P. 227-233.
- Koshiba M., Inoue K. Simple and Efficient Finite Element Analysis of Microwave and Optical Waveguides // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 40, №2, 1992. – P. 371-377.
- Koshiba M., Maruyama S., Hirayama K. A vector finite element method with the high-order mixed interpolation-type triangular elements for optical wave-guiding problems // J. Lightwave Techn. Vol. 12, No. 3, 1994. – P. 495-502.
- Davis T.A. Direct Methods for Sparse Linear Systems. SIAM, 2006. – 217 p.
- Бурдин В.А. Метод учета дисперсионных свойств кварцевого стекла в задачах расчета хроматической дисперсии оптических волокон // ИКТ. Т.6, №2, 2008. – С. 37-41.
- Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. – 512 с.
- Шуюпова Я.О., Котляр В.В. Расчет мод фотонно-кристаллического световода разными методами // Компьютерная оптика. Т.33, №1, 2009. – С. 27-36.
- Sigang Yang, Yejin Zhang, Lina He, Shizhong Xie, Jinyan Li, Wei Chen, Zuowen Jiang, Jinggang Peng, Haiqing Li. Experimental demonstration of very high negative chromatic dispersion dual-core photonic crystal fiber // Proceedings OFC. OThA, 2007. – 3 p.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Логинов С.С., Польский Ю.Е.

Рассматривается подход к стабилизации многомодовых нелинейных динамических систем на примере формирователей колебаний, основанный на обобщенных многомодовых моделях. Показано, что наличие нескольких подходов к разделению нелинейной динамической системы на моды дает возможность рассмотреть решение задачи стабилизации с различных позиций. Приведено два подхода к решению задачи стабилизации динамической системы типа Лоренца, позволяющих обеспечить требуемое поведение системы.

Повышение надежности и безотказности работы формирователей колебаний в системах связи требует обеспечения стабилизации их параметров и характеристик при помощи внешних стабилизирующих воздействий. В зависимости от назначения формирователей колебаний, относящихся к многомодовым нелинейным динамическим системам (ДС), к модовому составу формируемых ими колебаний могут предъявляться различные требования. Так, в традиционных системах связи возникает задача стабилизации регулярных мод, а в перспективных широкополосных системах связи на основе эффектов хаотической динамики – хаотических мод. Для решения указанных задач требуется разработка системного подхода к стабилизации режимов поведения многомодовых ДС. Сопоставительный анализ существующих тенденций системного подхода к решению задач стабилизации ДС показывает, что наиболее целесообразным является его математическая формализация, учитывающая физические принципы построения реальных систем [1-2]. Среди существующих методов математического описания ДС следует выделить описание ДС на основе обобщенных многомодовых моделей [2-3]. Использование обобщенных многомодовых моделей в задачах стабилизации режимов поведения различных ДС может, на наш взгляд, служить основой для выявления новых подходов и методов стабилизации характеристик формирователей колебаний. Целью настоящей работы является разработка подходов к стабилизации режимов поведения и характеристик нелинейных систем и устройств формирования колебаний на основе обобщенных многомодовых моделей (ОММ).

Описание ДС в рамках ОММ предполагает разделение сложной системы на моды состояния,

описывающие состояние ДС (например, структуру плазмы или параметры и характеристики формирователей колебаний) и моды поведения, описывающие динамику ДС (например, регулярный или хаотический режимы поведения сложной системы) [2; 9]. На рис. 1 представлена, уточненная по сравнению с [2; 9], обобщенная многомодовая модель ДС, учитывающая флуктуационные воздействия на моды поведения, ветвления в структуре и различия в характерных временах мод.

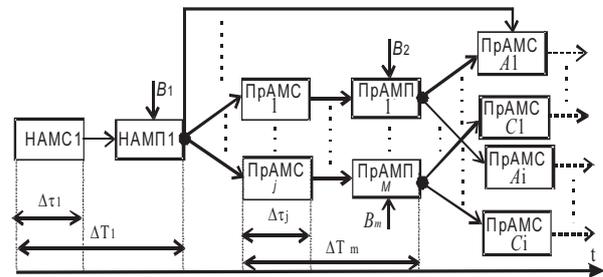


Рис. 1 НАМС – начальный ансамбль мод состояния; НАМП – начальный ансамбль мод поведения; ПрАМС_j – j-й промежуточный ансамбль мод состояния; ПрАМП_M – M-й промежуточный ансамбль мод поведения; • – начало ветвления в структуре обобщенной многомодовой модели; B_i – флуктуационные и внешние (регулирующие, стабилизирующие) воздействия

Следует отметить, что представление сложных ДС в виде набора мод (см. рис.1) не однозначно, причем для отдельных ДС возможны различные подходы к разделению на моды состояния и поведения. Поэтому требуется разработка средств разделения на моды состояния и поведения, адекватных задачам анализа и синтеза стабилизирующих воздействий. Наличие нескольких вариантов разделения ДС на моды дает возможность рассмотреть решение задачи стабилизации с различных позиций. Например, определить наиболее целесообразные для формирователей колебаний пути обеспечения требуемого (регулярного или стохастического) режима поведения и выявить параметры внешнего стабилизирующего воздействия. При этом основным критерием разделения ДС на отдельные моды являются малые величины связей между модами [1].

Для формирователей колебаний моды состояния возможно определить как тип колебаний, обуславливаемый параметрами и характеристиками (например, спектрально-корреляционных и вероятностных) устройства. В простейшем случае возможно различение двух типов мод состояния – регулярных и хаотических. На основе таких мод возможна однозначная диагностика режимов работы устройства. В общем случае возможно различение большего числа регулярных и хаотических мод, определяемых по указанным выше признакам. С другой стороны, под модой состояния возможно понимать параметры и характеристики ДС, описывающие динамику систем и устройств формирования колебаний, например, набор начальных условий, определяющих режим дальнейшего поведения формирователя.

Под модой поведения нелинейных систем и устройств формирования колебаний будем понимать закон (или совокупность законов) изменения ансамбля мод состояния, приводящие к изменению характера поведения ДС.

В рамках ОММ (см. рис. 1) возможно выделить три постановки задачи стабилизации параметров и характеристик ДС:

1. Обеспечение такого ансамбля мод состояния, который с учетом флуктуационных воздействий на моды поведения позволит обеспечить требуемый характер поведения ДС (статическое воздействие).

2. Выявление параметров внешнего динамического воздействия на моды поведения, обеспечивающего требуемые режим поведения ДС при наличии флуктуаций.

3. Обеспечение требуемой динамики сложной системы за счет выявления вида и параметров комбинационного (совместного статического и динамического) воздействия на ДС, учитывающего ветвления в структуре ОММ и различие в характерных временах мод.

В нелинейных устройствах и системах формирования колебаний с динамическим хаосом реализация первого подхода возможна за счет выбора параметров систем и параметров временной дискретизации. Второй подход реализуется, например, за счет введения стабилизирующих воздействий на параметры систем и параметры временной дискретизации.

Вопросы стабилизации хаотических мод на основе первого из указанных выше подходов за счет статического управления параметрами временной дискретизации для систем Ресслера, Анищенко-Астахова, Лоренца, Чуа с хаотической динамикой были рассмотрены в работе [10].

При этом диагностируемые моды различались по корреляционным характеристикам. Наиболее эффективным с точки зрения стабилизации хаотических мод состояния с заданными корреляционными характеристиками является управление параметрами временной дискретизации систем Анищенко-Астахова и Лоренца. Однако статическое управление не всегда реализуемо в формирователях колебаний, что обусловлено возможностью ухудшения некоторых параметров выходного колебания (например, выходной мощности). Наилучшим образом обеспечить требуемую структуру мод состояния возможно путем введения динамических стабилизирующих воздействий.

Необходимо отметить, что при выборе стратегий стабилизации мод поведения НАМП₁ возможны ветвления (см. рис. 1) с переходом от НАМС₁ не только к ПрАМС₁, но и к ПрАМС₂. В случае стабилизации хаотической моды динамической системы Лоренца-ДСЛ (1) за счет квазирезонансных воздействий на параметры систем и параметры временной дискретизации возможен переход не только к новой хаотической моде, но и к регулярной моде в зависимости от глубины стабилизирующего воздействия и начального ансамбля мод состояния. Поэтому одной из важнейших практических задач является обеспечение и стабилизация требуемых режимов этой ДС. В случае квазирезонансной модуляции параметров системы Лоренца с динамическим хаосом

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -\sigma(t)X + \sigma(t)Y; \\ \dot{Y} &= r(t)X - Y - XZ; \\ \dot{Z} &= XY - b(t)Z,\end{aligned}\quad (1)$$

где X, Y, Z – переменные системы; r, b, σ – параметры системы Лоренца, широко используемой для описания таких ДС как лазеры [5], формирователи колебаний на основе эффектов хаотической динамики [6], возможно получение хаотических мод с интервалами корреляции, варьируемыми в пределах одного порядка. При модуляции параметров временной дискретизации на основе квазирезонансных воздействий возможна вариация интервалов корреляции в пределах 20 раз [7].

Одним из критериев выбора параметров стабилизирующего воздействия является обеспечение требуемого режима ДС (с регулярными или хаотическими модами) при минимальных энергетических затратах на его стабилизацию с сокращением временного интервала стабилизации.

Необходимо отметить, что допущение многократных переходов между областями фазо-

вого пространства с различными состояниями равновесия в системах с динамическим хаосом приводит к увеличению переходного процесса установления стабилизированного состояния системы. Однако многократные переходы позволяют повысить энергетическую эффективность управляющих стабилизирующих воздействий на нелинейные устройства и системы с хаотической динамикой [4].

Для повышения энергетической эффективности стабилизирующих воздействий необходимо обеспечивать минимальное удаление фазовой траектории от состояний равновесия системы в случае хаотической динамики системы Лоренца [4]. При минимальных отклонениях фазовых траекторий от состояний равновесия системы глубина стабилизирующих воздействий минимальна, а их энергетическая эффективность максимальна. Минимизация этих отклонений возможна двумя способами:

1. Путем увеличения продолжительности временного интервала стабилизации при допущении многократных переходов между областями фазового пространства с различными состояниями равновесия [4].

2. Путем обеспечения в многомодовой ДСЛ моды состояния с требуемыми начальными условиями в системе, обеспечивающих необходимую минимизацию отклонений фазовых траекторий от точек равновесия системы за времена, не превышающие период квазирезонансных колебаний в системе. Указанные моды состояния, как показано в работе, дают возможность сократить продолжительность временного интервала стабилизации на несколько порядков с одновременным повышением его энергетической эффективности.

Предлагаемое энергетически эффективное стабилизирующее воздействие на ДСЛ осуществлялось в работе путем задания особого начального ансамбля мод состояния (рис.1) при квазипериодических импульсных квазирезонансных воздействий (КР) вида

$$\xi = \xi_0 + \Delta \cos \omega t, \quad \omega > \Omega, \quad \frac{\Delta}{\xi_0} \ll 1, \quad (2)$$

где ξ_0 - один из параметров динамической системы типа Лоренца r или b ; Ω - частота квазирезонансных колебаний [4]. Оценка оптимальных параметров этих воздействий производилась по возможности стабилизации ДСЛ с динамическим хаосом при задании начальных условий (X_n, Y_n, Z_n) и действии на систему квазипериодических импульсных КР воздействий, с амплитудой m , достаточной для стабилизации ДСЛ без

смен фазовой траекторией областей с различными состояниями равновесия, при допустимом начальном отклонении системы от положения равновесия, не превышающем 5% [8].

На основе численного моделирования ДСЛ (1) получена оценка границ области фазового пространства ДСЛ, определяющих моду состояния ДСЛ, обеспечивающую стабилизацию системы с минимальными энергозатратами на КР воздействия и сокращением продолжительности временного интервала стабилизации. Для значений $R = 28$, $b = 8/3$, $\sigma = 10$ и $\Delta/r_0 \in [0,01; 0,1]$ протяженность области начальных условий ДСЛ определяется установленными неравенствами:

$$\begin{aligned} 26 \leq X_n \leq 28; \\ 4 < Y_n < 17; \\ 48 \leq Z_n < 50. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом значение безразмерного времени $t_0 = \frac{T_{\text{стаб}}}{T_{\text{кол}}}$, за которое достигается стабилизация ДСЛ, составляет не более $t_0 \sim 0,3 \div 0,7$; где $T_{\text{кол}}$ - собственный период колебаний системы (1), $T_{\text{стаб}}$ - время, за которое достигается стабилизация ДСЛ.

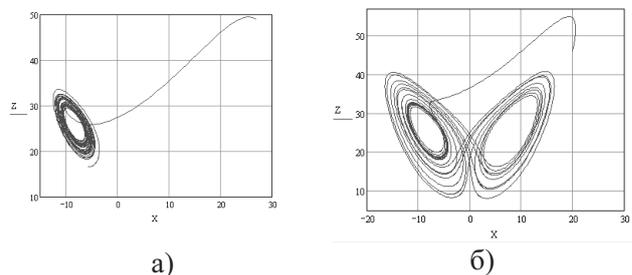


Рис. 2. Фазовый портрет ДСЛ (1) при $\Delta/r_0 = 0.01$; $m = 0.1$; $|\vec{r}| = 57$:

а) $X_n = 27$, $Y_n = 12$, $Z_n = 49$;

б) $X_n = 20$, $Y_n = 28$, $Z_n = 46$.

Результаты численного моделирования ДСЛ (1), подвергаемой стабилизирующим КР воздействиям при различных модах состояния (задаваемых различными начальными условиями, рис. 2а и рис. 2б) показали, что при сохранении величины радиус-вектора начальных отклонений от состояний равновесия

$$|\vec{r}| = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2}, \quad (3)$$

возможно обеспечение как регулярного (см. рис. 2а), так и хаотического (см. рис. 2б) режимов поведения рассматриваемой ДСЛ при одних и тех же уровнях КР воздействий.

Обеспечение начальных условий ДСЛ (1), принадлежащих ДСЛ (1) в выявленной области фазового пространства ($26 \leq X_n \leq 28$, $4 < Y_n < 17$, $48 \leq Z_n < 50$) с заданием требуемой величины $|r|$, возможно за счет специального предварительного импульсного воздействия на систему. Примером этого воздействия может служить импульсная предыонизация плазмы в системах возбуждения газовых лазеров с несамостоятельным разрядом [10].

Анализ подходов к стабилизации нелинейных устройств и систем формирования колебаний на основе ОММ и различного разделения мод (состояния и поведения) в ДС позволяет сформулировать следующие выводы:

– на основе задания мод состояния, связанных с типом выходного колебания показано, что в случае квазирезонансной модуляции параметров системы Лоренца возможно получение хаотических мод с интервалами корреляции, варьируемыми в пределах одного порядка; при модуляции параметров временной дискретизации на основе квазирезонансных воздействий возможна вариация интервалов корреляции в пределах 20 раз;

– на основе задания моды состояния, определяемой начальными условиями формирователей колебаний на базе ДСЛ, установлена оптимальная мода состояния $26 \leq X_n \leq 28$, $4 < Y_n < 17$, $48 \leq Z_n < 50$. При обеспечении попадания начальных условий в оптимальную моду состояния за счет предварительного однократного импульсного воздействия, и последующем действии на систему квазипериодических импульсных КР воздействий, возможно обеспечение требуемого стабильного режима поведения ДСЛ с минимальными энергетическими затратами на стабилизацию за интервалы времени, не превышающие период собственных колебаний ДС $t_0 \approx 0,3 \div 0,7$.

Таким образом, многомодовый подход с разделением различных мод состояния и поведения является эффективным средством оптимизации стабилизирующих воздействий на нелинейные формирователи колебаний в системах связи на основе нелинейных ДС с хаотической динамикой. Обеспечение требуемого режима формирователей колебаний на базе систем с динамическим хаосом при помощи предлагаемых управляющих воздействий позволяет повысить их надежность и безотказность работы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаменталь-

ных исследований (заявленный проект РФФИ №09-08-00268-а).

Литература

1. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Физические фракталы, структуры, моды // *Нелинейный мир*. №2, 2008. – С.110-113.
2. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Обобщенные многомодовые модели в анализе и диагностике фрактальных структур, живых и неживых динамических систем // «Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы». Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 456 с.
3. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Анализ и диагностика процессов формирования сложных структур на основе обобщенной многомодовой модели // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. №3, 2008. – С.69-71.
4. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е. Методы анализа, диагностики и управления поведением нелинейных устройств и систем с фрактальными процессами и хаотической динамикой. Казань: Изд. КГТУ, 2004. – 218с
5. Ораевский А.Н. Мазеры, лазеры и странные аттракторы // *Квантовая электроника*. Т.8, № 1, 1980. – С. 130-142.
6. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд. физ.-мат. лит., 2002. – 252 с.
7. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Формирование псевдослучайных сигналов с управляемыми корреляционными характеристиками на основе систем с динамическим хаосом // *ИКТ*. Т.6, № 2, 2008. – С. 19-22.
8. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е., Ценцевичский А.А. Влияние зеркальных переходов на фазовой плоскости на эффективность управления поведением динамической системы Лоренца // «Электронное приборостроение». Прилож. к журналу «Вестник КГТУ (КАИ)». Вып. 4(20), 2001. – С.16-21.
9. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Диагностика устройств систем связи и стабилизация их статистических характеристик на основе обобщенной многомодовой модели // Доклады IX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», посвящ. 100-летию со дня рождения акад. В.А. Котельникова и 120-летию телефонной связи в Татарстане. Казань, 2008. – С.53-57.
10. Польский Ю.Е., Айбатов Л.Р., Хохлов Ю.М. // *Квантовая электроника*. Т.12, №7, 1085. – С. 1459-1464.