

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Е.М. Патрушев, Т.В. Патрушева, Д.Е. Голденко

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В работе были проанализированы системы математического моделирования для проведения численных исследований в нелинейной динамике. Выбор таких систем существенно ограничен, и учитывая это, был создан open-source проект, в котором реализовывалась возможность расчёта хаотических аттракторов и исследования временных рядов в одном приложении.

Разработан и создан план программного проекта, по факту итеративная модель разработки в сочетании с методологией экстремального программирования.

Сформулированные требования к создаваемому программному обеспечению дали обоснования осуществить проект с применением объектно-ориентированного подхода и паттернов проектирования.

Ключевые слова: программное обеспечение, экстремальное программирование, проект open-source, объектно-ориентированный подход проектирования, паттерн проектирования, нелинейные системы, хаотические аттракторы.

Исследование аттракторов численными методами в нелинейной динамике является одним из основных инструментов, поскольку сложность предметной области ограничивает возможности получения аналитических зависимостей. Также отметим, поскольку хаотические аттракторы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, то численное исследование для них сводится к решению задачи Коши и получению временного ряда. В большинстве исследований отмечается, что наиболее подходящим методом решения по точности - быстродействию является метод Рунге-Кутты 4 порядка. В настоящее время отсутствуют доступные программные среды общего применения для проведения численных исследований в нелинейной динамике. Отметим, что наиболее распространённым средством выполнения численных расчётов являются системы математического моделирования MathWorks MatLab и Wolfram Mathematica, в которых исследователю предстоит самостоятельно составить модель и алгоритм обработки временного ряда. Это обстоятельство создаёт повышенные требования к знаниям начинающих исследователей, в распоряжении которых нет опыта для быстрого создания своих моделей. Обзор доступных программ для быстрой разработки позволил составить весьма небольшой список сред: Nicolas Desprez Chaoscope, Minsky System Dynamics Program, Softology Visions of chaos – *ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.3 2017*

граммы, в которых имеется весьма ограниченный набор функционала.

Учитывая указанное обстоятельство, было решено создать open-source проект, в котором реализовывалась возможность расчёта хаотических аттракторов и исследования временных рядов в одном приложении. Поскольку, создаваемое ПО (программное обеспечение), очевидно, имеет средний уровень сложности, его проектирование и создание осуществлялось методами программной инженерии.

Начальный этап разработки предполагал сбор сведений о предметной области и существующих доступных аналогов. Были определены первоочередные требования к функционалу создаваемого ПО и составлен план программного проекта [1]. В основе плана программного проекта - итеративная модель разработки в сочетании с методологией экстремального программирования. Под руководством авторов настоящей работы основными участниками проекта были студенты (16 человек) обучающиеся по программе подготовки магистров в рамках учебных дисциплин «Теория и технология программирования» и «Программирование на языке высокого уровня».

План программного проекта предполагал создание различных UML-диаграмм, написание программного кода и тестирование полученного проекта.

Формулировка требований к ПО позво-

лила составить диаграмму use-case для задуманного проекта (рисунок 1). Минимальный набор требований выглядел следующим образом:

- возможность выбора хаотической системы для моделирования и задание её параметров и начальных условий. Предполагается наличие на выбор аттрактора Лоренца, аттрактора Рёсслера, цепи Чуа, неавтономной MLC-цепь, системы Спротта и т.д.;
- расчёт методом Рунге-Кутты 4 порядка временного ряда для динамических переменных x, y, z длиной и с шагом задаваемыми пользователями;
- отображение временных рядов в виде графиков и фигур Лиссажу;

- получение быстрого преобразования Фурье по любой из динамических переменных и построение графика для модуля, аргумента, действительной и мнимой частей этого преобразования;
- расчёт автокорреляционной функции для временного ряда по любой из динамических переменных и её графическое отображение;
- построение сечения Пуанкаре любой из плоскостей, проходящей через начало координат и функции последования для него;
- расчёт корреляционной размерности и старшего показателя Ляпунова по методу Беннеттина;
- наличие справочной системы.

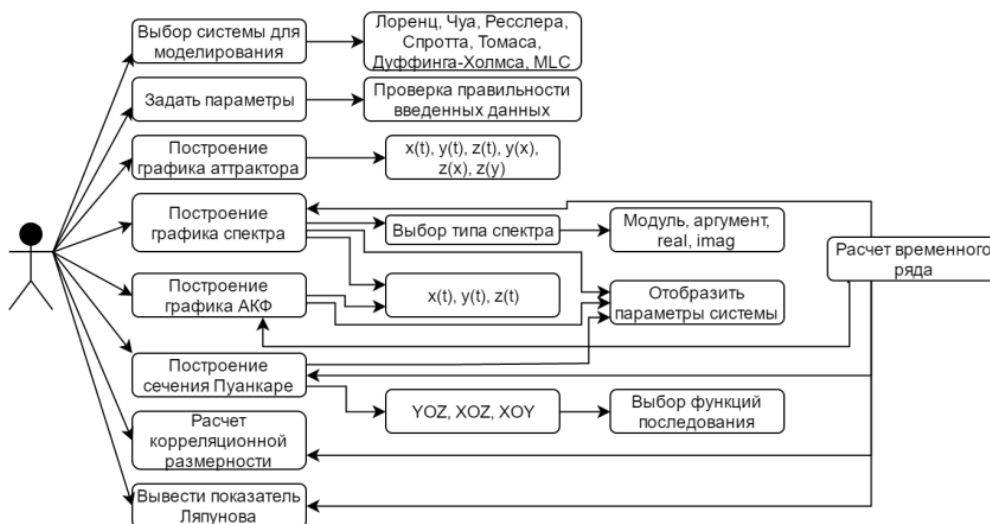


Рисунок 1 – Диаграмма use-case

Обзор сформулированных требований позволил принять решение о том, что создание ПО с таким набором функционала следует осуществлять с применением объектно-ориентированного подхода и паттернов проектирования [2], поскольку возможны изменения требований в процессе создания. В качестве среды для разработки была выбрана Microsoft Visual Studio C# в сочетании с системой хостинга IT-проектов GitHub.

На рисунке 2 представлена UML - диаграмма компонентов разработанного приложения. Основу его составляет исполняемый модуль *Main*, представляющий собой главную форму MDI-приложения. Все остальные модули системы – это библиотеки классов на C#. Для хранения основных параметров расчёта и получаемых временных рядов в диаграмме представлен модуль *Datalib*, реализо-

ванный с помощью паттерна Singleton. Форма выбора системы для моделирования и установки её начальных параметров *Input* связана простой зависимостью с главной формой *Main*. После задания новых параметров расчёта активируется модуль расчёта аттрактора и получения временного ряда *calculate_attractor*, который связан с главным модулем с помощью паттерна Facade, на диаграмме обозначенном как *calculate_attractor_facade*. Формы, для отображения различных исследований временных рядов, являются дочерними MDI - формами, и связаны с главной простыми зависимостями. Алгоритмы обработки полученных временных рядов вызываются этими формами через соответствующие интерфейсы, реализованные различными паттернами.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

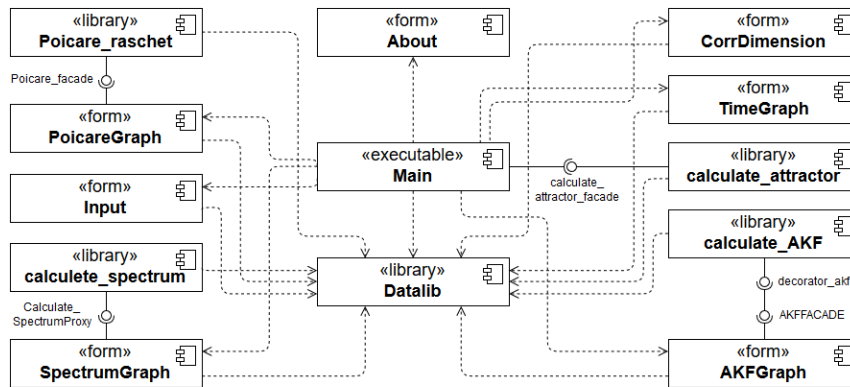


Рисунок 2 – UML-диаграмма компонентов

Для связи модуля расчёта быстрого преобразования Фурье *calculate_spectrum* и формы для его отображения *SpectrumGraph* использовался паттерн Proxy, обозначенный на диаграмме как *Calculate_SpectrumProxy*. Для связи модуля расчёта автокорреляционной функции *calculate_AKF* с формой для её отображения *AKFGraph* применён паттерн Decorator, обозначенный как *decorator_akf*.

На рисунке 3 представлен внешний вид формы для выбора системы для моделирования и ввода начальных параметров. Предусмотрена проверка корректности вводимых данных и отображение их в дальнейшей на нижней и боковой панелях приложения.

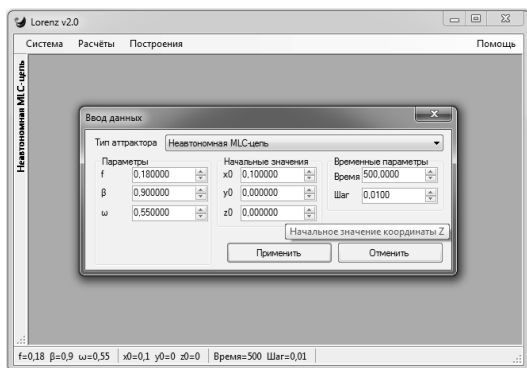


Рисунок 3 – Внешний вид формы для выбора системы и ввода начальных параметров

Форма для построения графиков во временной области позволяет строить временную зависимость, а также фигуры Лиссажу для всех динамических переменных (рисунок 4). Предусмотрено автоматическое и ручное масштабирование осей, отображение подписей на них и сохранение полученного изображения в виде графического файла.

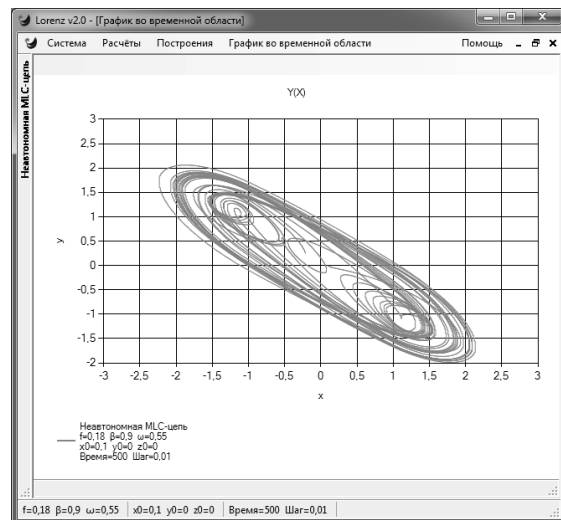


Рисунок 4 – Хаотический аттрактор для MLC-цепи, построенный как фигура Лиссажу $y(x)$

Получение оценок спектра сигнала, производимого генератором хаоса, является одним из важнейших этапов при исследовании практических моделей [3]. На рисунке 5 показан пример спектра амплитуд, полученного для хаотического аттрактора «двойной завиток» получаемого в цепи Чуа.

Автокорреляционная функция для временного ряда (рисунок 6), получаемого от хаотического осциллятора, становится важной оценкой в тех случаях, когда хаотический осциллятор предполагается использовать в качестве источника случайных сигналов, например, в радарной системе с хаотическими сигналами. Поскольку сложность вычисления АКФ для временного ряда составляет $O(N^2)$, то для больших массивов данных это может занимать значительное время. Для устранения «зависания» программы на время расчё-

та, сам программный алгоритм организован в отдельном потоке и предусмотрена индикация времени ожидания расчёта. За время расчёта сохраняется возможность построения других зависимостей для выбранной системы.

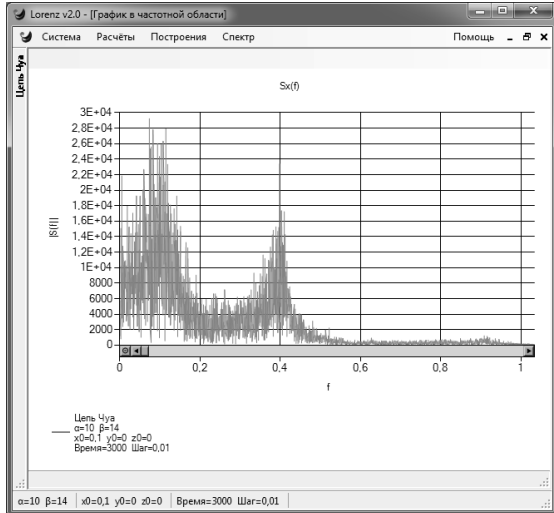


Рисунок 5 – Спектр амплитуд сигнала, получаемого от хаотического осциллятора цепь Чуа в режиме аттрактора «двойной завиток»

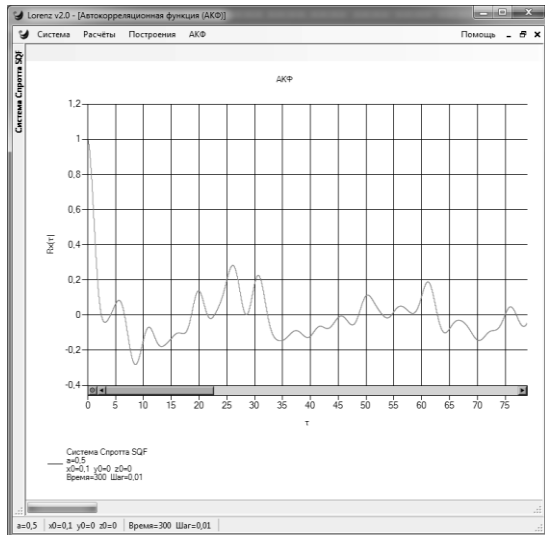


Рисунок 6 – Автокорреляционная функция, построенная для системы Спротта

Качественное исследование динамики хаотических систем нередко включает в себя рассмотрение сечения Пуанкаре [3], которое позволяет различать периодические, квазипериодические и хаотические режимы. Фрактальный вид сечения, как на рисунке 7, является одним из признаков хаотического движения. Кроме этого, функции последования,

получаемые из сечения Пуанкаре, позволяют установить тип бифуркации в критической точке.

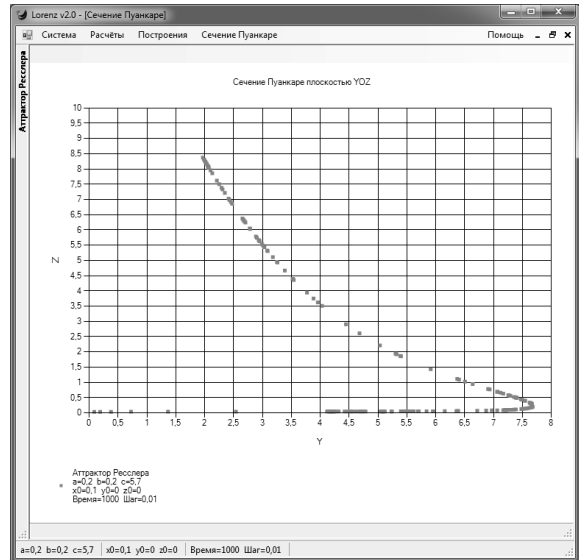


Рисунок 7 – Сечение Пуанкаре для аттрактора Рёсслера

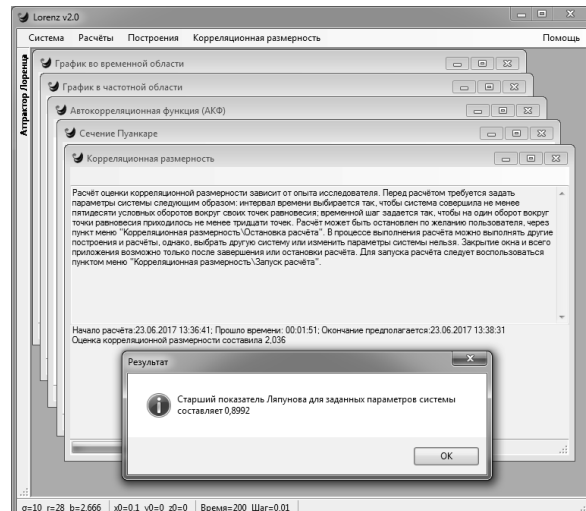


Рисунок 8 – Расчёт корреляционной размерности и старшего показателя Ляпунова

Старший показатель Ляпунова является одним из точнейших критериев наличия хаоса. Если в системе наблюдается высокая чувствительность к начальным условиям, траектории в аттракторе расходятся и наблюдается перемешивание, то старший показатель Ляпунова будет положительным, в критических точках его значение приближается к нулю, а в периодическом режиме он отрицательный. Расчёт старшего показателя Ляпунова осуществляется по алгоритму Бе-

неттина [3]. Также, в программе реализован расчёт оценки корреляционной размерности. Сложность этого алгоритма составляет $O(N^3)$, поэтому он выполняется в отдельном потоке с отображением оставшегося времени ожидания (рисунок 8).

В результате проделанной работы была создана доступная для начинающего исследователя программа, позволяющая моделировать некоторые хаотические системы третьего порядка. Результат моделирования в виде временного ряда может быть обработан наиболее известными в нелинейной динамике методами и представлен графически. Проектирование созданной программы осуществлялось таким образом, чтобы сохранялась возможность существенно расширить функционал программы без переработки существующего кода. Предполагается развитие проекта путём добавления в него возможности построения однопараметрических бифуркационных диаграмм и двухпараметрических карт режимов. Код программы задокументирован и размещён под лицензией GNU GPL

v3 по адресу
<https://github.com/edvardlorenz/Lorenz-Attractor>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов, С.А. Технологии разработки программного обеспечения / С.А. Орлов, Б.Я. Цилькер // 4-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 608 с.
2. Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влассидес. – СПб.: Питер. ДМК Пресс. 2010. – 366 с.
3. Шахтарин, Б.И. Генераторы хаотических колебаний. Учебное пособие / Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 248 с.

Патрушев Егор Михайлович – к.т.н, доцент, тел. (3852)- 290913, e-mail: attractor13@gmail.com
Патрушева Татьяна Васильевна - старший преподаватель, тел.(3852)-290913, e-mail: patrucheva_t@mail.ru
Годеко Дмитрий Евгеньевич – магистрант АлтГТУ, e-mail: foulegdd@gmail.com.