# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3

1. ОСНОВЫ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 4

2. ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА
ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ 31

3. ТЕОРИЯ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 43

3.1. Математические основы энтропийного анализа 43

3.1.1. Математическая энтропия 43

3.1.2. Энтропия распределения вероятностей 47

3.1.3. Энтропия динамической системы 51

3.1.4. Основные свойства математической энтропии 54

3.1.5. Энтропия непрерывного ансамбля и ее свойства 59

3.2. Физические основы энтропийного анализа 62

3.2.1. Определение информационной энтропии
физической системы 62

3.2.2. Соотношение информационной энтропии
физической системы и ее термодинамической энтропии 68

3.2.3. Информационная энтропия физической системы
как индикатор ее термодинамического состояния 76

3.3. Энтропийные характеристики экспериментальных данных 78

3.3.1. Основные величины, характеризующие энтропию
экспериментальных данных 78

3.3.2. Энтропийные характеристики данных в физическом
и биологическом эксперименте 79

4. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 83

4.1. Общий подход к оцениванию энтропии по эмпирическим данным 83

4.2. Метрические оценки энтропии 86

4.3. Комбинаторные оценки энтропии 90

4.4. Кодирование данных для оценивания энтропии 94

4.4.1. Принципы кодирования данных для энтропийного анализа 94

4.4.2. Ранговое кодирование 98

4.4.3. Перестановочное кодирование 100

4.4.4. Локально-ранговое кодирование с использованием
рангового ядра 101

4.5. Некоторые проблемные вопросы энтропийного анализа данных 105

4.5.1. Преодоление проблем большой размерности 105

4.5.2. Эффективное вычисление энтропии 107

4.5.3. Выбор параметров аппроксимирующих оценок энтропии 108

4.6. Обзор практических алгоритмов энтропийного анализа данных 112

4.6.1. Алгоритмы оценивания энтропии динамических систем
и временных рядов данных 112

*4.6.1.1.* Алгоритм Крутчфилда и Паккарда
(Crutchfield–Packard Entropy) 112

*4.6.1.2.* Алгоритмы Грассбергера–Прокаччиа и Такенса
(Grassberger–Procaccia Entropy) 113

*4.6.1.3.* Алгоритм Экманна–Рулла
(Eckmann–Ruelle Entropy) 114

*4.6.1.4.* Аппроксимированная энтропия (Approximate Entropy) 114

*4.6.1.5.* Выборочная энтропия (Sample Entropy) 115

4.6.2. Алгоритм оценивания дифференциальной энтропии
на основе свертки гистограммы с ядром 115

4.6.3. Алгоритмы инвариантного кодирования данных 118

*4.6.3.1.* Алгоритмы перестановочного кодирования
для вычисления энтропии (Permutation Entropy) 118

*4.6.3.2.* Алгоритм локально-рангового кодирования
с использованием рангового ядра
(Rank Kernel Entropy) 120

4.6.4. Прочие алгоритмы энтропийного анализа данных 122

*4.6.4.1.* Энтропия двойного дифференциального
преобразования изображений 122

*4.6.4.2.* Мультимасштабная энтропия (Multiscale Entropy) 123

*4.6.4.3.* Спектральная энтропия 124

*4.6.4.4.* Оценивание энтропии на основе процедур
предсказания, обучения и сжатия 125

5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛГОРИТМОВ ЭНТРОПИЙНОГО
АНАЛИЗА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ОБРАБОТКИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ 126

5.1. Методика тестирования алгоритмов оценивания энтропии 126

5.1.1. Исходные данные 126

5.1.2. Калибровка алгоритмов 128

5.2. Референтное тестирование алгоритмов оценивания энтропии 131

5.2.1. Дрейф нуля и ограничение частотной полосы 132

5.2.2. Влияние длины выборки 136

5.2.3 Тест интерполяции отсчетов 138

5.2.4. Сумма сигналов двух систем 141

5.3. Нереферентное тестирование алгоритмов оценивания энтропии 142

5.3.1. Влияние шума и погрешности измерений 142

5.3.2. Энтропия случайного процесса с переменой
шириной спектра 148

5.3.3. Энтропия случайного преобразования 149

5.4. Комплексное тестирование алгоритмов оценивания энтропии 150

5.5. Выводы и рекомендации 152

6. ПРИЛОЖЕНИЯ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 157

6.1. Идентификация состояний и параметров сложных систем 157

6.2. Исследование связности сложных систем 160

6.3. Решение обратных задач обработки сигналов 168

6.4. Оценивание потерь информации при кодировании
аналоговых источников 175

7. БИБЛИОГРАФИЯ ПО ЭНТРОПИЙНОМУ АНАЛИЗУ ДАННЫХ 181

Заключение 188

Список литературы 190