

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра программного обеспечения информационных технологий

**П. Ю. Бранцевич, Д. В. Деменковец, В. А. Леванцевич**

## **ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ДЛЯ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальности 6-05-0612-01 «Программная инженерия»*

Минск БГУИР 2025

## Содержание

Перечень сокращений и обозначений .....	6
Введение .....	8
1 Введение в цифровую обработку сигналов .....	11
1.1 Понятие сигнала.....	11
1.2 Типовые дискретные сигналы .....	14
1.3 Нормирование частоты .....	16
1.4 Структурная организация системы цифровой обработки сигналов .....	17
1.5 Первичные преобразователи информации.....	18
1.6 Устройства ввода данных .....	20
1.7 Ввод данных в вычислитель (процессор).....	23
2 Спектральный анализ цифровых сигналов .....	24
2.1 Применение преобразования Фурье при обработке сигналов.....	24
2.2 Спектр вещественных сигналов и переход к комплексному представлению .....	28
2.3 Алгоритм быстрого преобразования Фурье, программная реализация и оценка трудоемкости.....	33
2.4 Особенности спектрального анализа вибрационных сигналов, отражающих вибрационное состояние механизмов роторного типа.....	45
2.5 Алгоритм построения полосового спектра .....	52
2.6 Разделение вибрационного сигнала на компоненты.....	54
2.7 Обработка вибрационных сигналов с изменяющейся основной частотой....	57
2.8 Вычисление огибающей сигнала .....	61
3 Цифровая фильтрация .....	63
3.1 Введение в цифровую фильтрацию, понятие цифрового фильтра .....	63
3.2 Разностное уравнение цифрового фильтра .....	63
3.3 Дискретная свертка.....	66
3.4 Комплексный коэффициент передачи цифрового фильтра .....	67
3.5 Способы описания цифровых фильтров .....	67
3.6 Цифровые фильтры первого и второго порядков .....	69
3.7 Типы фильтров.....	76
3.8 Цифровые фильтры с бесконечной импульсной характеристикой.....	77
3.9 Алгоритм цифровой фильтрации на основе дискретного преобразования Фурье.....	90
4 Практическое применение методов цифровой обработки сигналов.....	93
4.1 Выделение квазипериодической составляющей с помощью нерекурсивных полосовых фильтров .....	93
4.2 Кепстральный анализ цифровых сигналов .....	97
4.3 Удаление низкочастотного дрейфа из цифрового сигнала .....	99
4.4 Применение вейвлетов для исследования цифровых сигналов.....	105
4.5 Преобразование Гильберта – Хуанга при исследовании сигналов .....	116
5 Микроконтроллерные встраиваемые системы .....	125
5.1 Atmel .....	126

5.2 ARDUINO .....	132
5.3 Microchip .....	134
5.4 ESP32 .....	141
5.5 Raspberry Pi .....	143
6 Архитектура процессора ARM Cortex-M3 .....	146
6.1 Обзор архитектуры ARM .....	146
6.2 Процессор ARM Cortex-M3 .....	148
6.3 Интерфейсные шины Cortex-M3 .....	151
6.4 Ядро процессора Cortex-M3 .....	153
6.4.1 Микроархитектура ядра .....	153
6.4.2 Регистры ядра .....	156
6.4.3 Системный таймер .....	159
6.5 Система памяти .....	159
6.5.1 Карта памяти .....	159
6.5.2 Атрибуты памяти .....	161
6.5.3 Побитовый доступ к памяти .....	163
6.6 Прерывания в Cortex-M3 .....	165
6.6.1 Контроллер вложенных векторных прерываний КВВП .....	165
6.6.2 Последовательность обработки прерываний и исключений .....	168
6.6.3 Режимы обработки прерываний .....	170
6.7 Режимы энергопотребления .....	172
6.8 Отладочная система CoreSight .....	174
7 Архитектура микроконтроллера STM32 .....	177
7.1 Организация внутренних шин .....	177
7.2 Распределение памяти .....	178
7.3 Устройства синхронизации .....	180
7.3.1 Тактовые генераторы .....	180
7.3.2 Фазовая автоподстройка частоты .....	182
7.4 Прямой доступ к памяти .....	184
8 Устройства ввода-вывода STM32 .....	186
8.1 Устройства ввода-вывода общего назначения .....	186
8.1.1 Порты ввода-вывода .....	186
8.1.2 Контроллер внешних прерываний .....	189
8.1.3 Аналого-цифровой преобразователь .....	191
8.1.4 Таймеры общего назначения .....	196
8.1.5 Часы реального времени и регистры с резервированием питания .....	199
8.2 Коммуникационные устройства ввода-вывода .....	201
8.2.1 Интерфейс SPI .....	201
8.2.2 Интерфейс I2C .....	203
8.2.3 Модуль USART .....	204
8.2.4 Модули CAN и USB .....	206
8.3 Режимы работы STM32 .....	208
8.4 сторожевые таймеры и контроль напряжения питания .....	209
8.5 Отладочная плата STM32 Nucleo .....	211

9 Среда разработки программного обеспечения	215
9.1 Среда разработки Keil uVision	215
9.1.1 Программа считывания сигнала с датчика температуры	217
9.2 Среда разработки STM32CubeIDE	221
9.2.1 Программа управления светодиодом	222
9.2.2 Программа обмена по интерфейсу UART	228
9.2.3 Программа работы с джойстиком	233
9.2.4 Программа измерения температуры	237
Приложение А. Текст функции БПФ на алгоритмических языках C и Assembler процессора Intel	241
Приложение Б. Программа для иллюстрации применения быстрого преобразования Фурье	262
Приложение В. Текст функции определения огибающей сигнала с использованием БПФ	272
Приложение Г. Тексты функций, реализующих рекурсивную цифровую фильтрацию	274
Приложение Д. Текст функции, реализующей цифровую фильтрацию с использованием БПФ	276
Приложение Е. Текст функции, реализующей вейвлет-преобразование	277
Список использованных источников	280