
Spis treści

Oznaczenia	15
Wstęp	17
Zalety regulacji cyfrowej	17
Podstawowy układ regulacji	18
Płyty rozwojowe używane w książce	21
Nazewnictwo (terminologia)	23
Przedrostki dwójkowe i przedrostki SI	23
1. Historia architektury ARM	25
1.1. Acorn – początki	25
1.2. Narodziny procesorów ARM	25
1.3. Advanced RISC Machines Ltd.	26
1.4. ARM i sprzedawcy mikrokontrolerów	27
1.5. Zalety procesorów Cortex-M	27
1.5.1. Niski pobór energii	27
1.5.2. Moc obliczeniowa	27
1.5.3. Efektywność energetyczna	28
1.5.4. Gęstość upakowania kodu	29
1.5.5. Przerwania	29
1.5.6. Łatwe w użyciu, zorientowane na język C	29
1.5.7. Skalowalność	29
1.5.8. Uruchamianie programów	29
1.6. CMSIS Cortex Microcontroller Software Interface Standard	29
1.6.1. Struktura CMSIS	30
1.6.2. CMSIS-Core	31

1.6.3.	CMSIS-RTOS	31
1.6.4.	CMSIS-DSP	31
1.6.5.	CMSIS-Driver	31
1.6.6.	CMSIS-SVD	31
1.6.7.	CMSIS-DAP	32
1.6.8.	CMSIS-Pack	32
2.	Reprezentacja liczb całkowitych	33
2.1.	Półprzewodniki	33
2.2.	Bit, czyli najmniejsza jednostka informacji	39
2.2.1.	Działania logiczne	39
2.3.	Reprezentacja Danych	40
2.4.	Liczby binarne, oktalne, dziesiętne i hexadecymalne	41
2.5.	Liczby całkowite bez znaku	43
2.6.	Liczby całkowite ze znakiem	44
2.6.1.	Kod uzupełnień do jedności U1	44
2.6.2.	Kod uzupełnień do dwóch U2	45
2.7.	Dodawanie i odejmowanie liczb bez znaku, flaga <i>Carry</i>	46
2.8.	Dodawanie i odejmowanie liczb ze znakiem, flaga <i>Overflow</i>	47
2.9.	Jak kompilator tłumaczy instrukcję <code>if (a < b)</code>	49
2.10.	Stringi (ciągi znaków) w pamięci	50
2.10.1.	<i>Unicode Transformation Format</i> UTF-8	50
2.10.2.	Stringi	51
3.	Jak działa procesor	53
3.1.	Tłumaczenie kodu źródłowego C na kod maszynowy	54
3.2.	Ładowanie programu maszynowego do pamięci	56
3.2.1.	Architektura Harvard versus Von Neumann	56
3.2.2.	Rozmieszczenie obszarów pamięci	59
3.3.	Rejestry wewnętrzne procesora	63
3.4.	Wykonywanie programu maszynowego	67
4.	Zestaw uruchomieniowy z procesorem STM32F103VB	71
4.1.	Wprowadzenie	71

4.2.	Rodzina mikrokontrolerów STM32	71
4.3.	Zestaw uruchomieniowy	73
4.4.	Dokumentacja Cortex-M3 i STM32F103	74
4.5.	Programator	75
4.6.	Środowisko IDE Keil μ Vision	76
4.6.1.	Zintegrowane środowisko programistyczne	76
4.6.2.	Instalacja środowiska μ Vision	77
4.7.	Cortex Microcontroller Software Interface CMSIS	77
4.8.	Nasz pierwszy projekt: Projekt00	79
4.8.1.	Opcje projektu	82
4.8.2.	Symulacja komputerowa	90
4.9.	Reset and Clock Control (RCC)	96
4.9.1.	Reset	96
4.9.2.	Taktowanie mikrokontrolera – sygnały zegarowe	96
4.10.	Porty GPIO	98
4.10.1.	Wejście: oporniki <i>Pull Up</i> i <i>Pull Down</i>	99
4.10.2.	Wejście, przerzutnik Schmitta	100
4.10.3.	Wyjście GPIO: komplementarne lub otwarty dren	101
4.10.4.	Szybkość wyjścia GPIO	103
4.10.5.	Jak dołączyć diodę LED do mikrokontrolera?	104
4.11.	Projekt01_LED, migająca dioda	106
4.11.1.	Tworzymy nowy projekt	106
4.11.2.	Plik <i>stm32f10x_conf.h</i>	106
4.11.3.	Inicjalizacja RCC i GPIO	107
4.11.4.	Z jakim parametrem należy wywołać <i>Delay()</i> , aby uzyskać 1 s?	109
4.11.5.	Dołączamy zewnętrzną diodę LED	110
4.11.6.	Oscyloskop: szybkość wyjścia GPIO	111
5.	Zestaw instrukcji ARM ISA	113
5.1.	Zestawy instrukcji ARM	113
5.2.	Budowa procesora Cortex-M	115
5.3.	Format instrukcji asemblerowej	116
5.4.	Struktura programu asemblerowego	117

5.5.	Dyrektywy asemblera	119
6.	Instrukcje arytmetyczno-logiczne	123
6.1.	Rejestr Flag	123
6.2.	Modyfikowanie flag	125
6.3.	Instrukcje przesunięcia i obrotu	126
6.4.	Instrukcje arytmetyczne	128
6.4.1.	Instrukcje dodawania i odejmowania	128
6.4.2.	Instrukcje krótkiego dzielenia i mnożenia	129
6.4.3.	Instrukcje długiego mnożenia	129
6.5.	Instrukcje nasycenia	129
6.6.	Dwuargumentowe działania logiczne	130
6.6.1.	Maski bitowe	131
6.6.2.	Definiowanie masek za pomocą dyrektywy EQU	131
6.6.3.	Operatory logiczne w C	132
6.7.	Kolejność bitów i bajtów	132
6.8.	Zmiana typu liczby całkowitej	133
6.9.	Instrukcje porównań	134
6.10.	Przesyłanie danych pomiędzy rejestrami	135
6.11.	Przepisz określony fragment rejestru	136
7.	Instrukcje przesyłania danych	137
7.1.	Wpisanie danej do rejestru	137
7.1.1.	Instrukcje przesyłania danych MOV i MVN	138
7.1.2.	Pseudoinstrukcje LDR i ADR	138
7.2.	Big Endian oraz Little Endian	140
7.3.	Dostęp do danych w pamięci	141
7.4.	Adresowanie pamięci	141
7.4.1.	<i>Pre-index, Post-index</i> oraz <i>Pre-index with Update</i>	141
7.4.2.	Instrukcje Load i Store	142
7.5.	Load i Store z listą rejestrów	143
8.	Instrukcje rozgałęzień <i>Branch</i>	145
8.1.	Testowanie warunków	145

8.2.	Instrukcje rozgałęzień	147
8.3.	Warunkowe wykonanie instrukcji	148
8.4.	Instrukcja kompilatora If-then	150
8.4.1.	Złożone wyrażenie logiczne z OR	150
8.4.2.	Złożone wyrażenie logiczne z AND	151
8.5.	Instrukcja kompilatora If-then-else	151
8.6.	Instrukcje pętli	152
8.6.1.	Pętla For	152
8.6.2.	Pętla While	153
8.6.3.	Pętla Do while	154
8.7.	Instrukcja kompilatora Switch	154
9.	Wyświetlacz LCD 1602	157
9.1.	Wymiana danych z wyświetlaczem (4 bity danych)	159
9.2.	Instrukcje	160
9.3.	Projekt02_LCD	163
10.	Programowanie strukturalne	175
10.1.	Podprogramy	176
10.2.	Stos	177
10.3.	Ochrona rejestrów w podprogramie	178
10.4.	Przekazywanie parametrów przez rejestry	179
10.5.	Projekt03_asm	180
10.5.1.	Bit parzystości – przekazywanie wartości	180
10.5.2.	Wyszukanie największej liczby – przekazywanie wskaźnika	181
11.	Kontroler przerw NVIC, SysTick i RTC	183
11.1.	Przerwania	183
11.2.	Tryby i stany pracy procesora	184
11.3.	Program obsługi przerwania ISR	185
11.4.	Układ zarządzania przerwaniem NVIC	187
11.4.1.	Priorytety przerw	189
11.4.2.	Funkcje CMSIS do obsługi NVIC	190

11.5. Zegar systemowy SysTick	191
11.6. Projekt04_SysTick	192
11.7. Przerwania zewnętrzne	194
11.8. Klawiatura matrycowa 4×4	196
11.9. Projekt05_keypad	199
11.10. Projekt06_scanf	202
11.11. Zegar czasu rzeczywistego RTC	204
11.11.1. Czas UNIXowy	204
11.11.2. Konfiguracja zegara RTC	205
11.12. Projekt07_RTC	206
12. Liczniki i sterowanie PWM	207
12.1. Budowa licznika i tryby zliczania	207
12.2. Odmierzanie odcinków czasu	209
12.3. Projekt08_toggleLED	211
12.4. Pomiar długości impulsu	214
12.5. Projekt09_TIM2switch, eliminacja drgań styków	216
12.6. Projekt10_RadioControl	220
12.7. Projekt11_6WheelDrive	226
12.8. Projekt12_DistanceSensor, dalmierz ultradźwiękowy	231
13. Płyta STM3210E-EVAL, silniki krokowe	235
13.1. Katalog ARM2CortexM3-STM3210E-EVAL	236
13.2. Projekt01_LED	237
13.3. Projekt14_TFTLCD	238
13.3.1. Kolory	239
13.3.2. Tekst	240
13.3.3. Grafika	241
13.3.4. Zdjęcia i obrazki	241
13.4. 4-Pin Trace ETM	241
13.4.1. Opóźnienie programowe	243
13.5. Silnik krokowy	245
13.5.1. Silnik o zmiennej reluktancji VR – <i>variable reluctance</i>	245

13.5.2.	Silnik z magnesem trwałym PM – <i>permanent magnet</i>	246
13.5.3.	Silnik hybrydowy HB – <i>hybrid motor</i>	246
13.5.4.	Silniki krokowe unipolarne i bipolarne	248
13.5.5.	Sterowanie falowe (jednofazowe)	249
13.5.6.	Sterowanie pełnokrokowe (dwufazowe)	249
13.5.7.	Sterowanie półkrokowe	249
13.6.	Projekt15_StepperMotor	250
13.6.1.	Płyta ZL27ARM	252
13.6.2.	Płyta STM32F10E-EVAL	253
13.7.	Indukcyjność	254
13.7.1.	Stała czasowa obwodu RL	254
13.7.2.	Sterowanie L/nR	257
13.7.3.	Sterowanie z kluczowaniem prądu	258
13.7.4.	Sterowanie bipolarne silników krokowych	260
13.7.5.	Wolne i szybkie rozładowanie energii uzwojenia	260
13.8.	Projekt16_StepperMotor	261
14.	Liczby wymierne stałopozycyjne	265
14.1.	Binarna arytmetyka stałopozycyjna	266
14.1.1.	Liczby stałopozycyjne bez znaku	266
14.1.2.	Liczby stałopozycyjne ze znakiem	267
14.1.3.	Konwersja liczby wymiernej do postaci stałopozycyjnej	267
14.1.4.	Kompromis pomiędzy rozdzielczością a zakresem	268
14.1.5.	Arytmetyka stałopozycyjna z nasyceniem	268
14.2.	Działania niezależne od formatu	269
14.2.1.	Negacja i moduł liczby	269
14.2.2.	Dodawanie i odejmowanie	270
14.3.	Działania zależne od formatu (Q15.16)	271
14.3.1.	Mnożenie stałopozycyjne	272
14.3.2.	Dzielenie stałopozycyjne Q15.16	274
14.3.3.	Dzielenie liczb 64-bitowych ze znakiem	276
14.3.4.	Operacje pomocnicze na liczbach 64-bitowych	278
14.3.5.	Dzielenie liczb całkowitych dodatnich <i>long division</i>	279
14.4.	Projekt17_FixedPoint_sin	282

14.5. Projekt18_cube3D	284
14.5.1. Obroty na płaszczyźnie	284
14.5.2. Macierze obrotu	285
14.5.3. Złożenie obrotów na płaszczyźnie	286
14.5.4. Obroty w przestrzeni \mathcal{R}^3	287
14.5.5. Złożenie obrotów w przestrzeni \mathcal{R}^3	288
14.5.6. Projekt18_cube3D	289
14.6. Projekt19_cube3D_FixedPoint	290
15. Bezpośredni dostęp do pamięci DMA	291
15.1. DMA Bus Matrix	292
15.2. Kanały DMA	293
15.3. Programowanie DMA	296
15.4. Projekt20_DMA_M2M	297
16. Przetwornik analogowo-cyfrowy ADC	299
16.1. Przetwornik ADC z sukcesywną aproksymacją	299
16.1.1. Próbkowanie	300
16.1.2. Kwantyzacja	302
16.1.3. Kodowanie	304
16.2. Kanały wejściowe ADC	304
16.3. Wyzwalanie ADC i okres próbkowania	305
16.4. Autokalibracja	305
16.5. Przetwarzanie ADC z wykorzystaniem przerwań SysTick	306
16.5.1. Projekt21_ADC1	306
16.6. Pętla prądowa 4–20 mA	308
16.6.1. Źródło napięciowe DC: stałe napięcie na zaciskach	308
16.6.2. Źródło prądowe DC: stały prąd w obwodzie	309
16.6.3. Parametryzowane źródło prądowe	309
16.6.4. Układ pomiarowy pętli prądowej	310
16.7. Projekt22_4–20mA przemysłowy pomiar temperatury	312
17. Przetwornik cyfrowo-analogowy DAC	315
17.1. Budowa przetwornika DAC	315

17.2. DAC w procesorach STM32F103	320
17.3. Wzmacniacz wyjściowy	321
17.4. Projekt23_DAC_sin	322
18. Transmisja szeregową	325
18.1. USART Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter	326
18.1.1. Ramka	327
18.1.2. Prędkość bodowa	328
18.1.3. Warstwa fizyczna	328
18.2. Warstwa łącza danych	329
18.2.1. INTEL HEX Format	329
18.2.2. Modbus	330
18.2.3. Master (klient) – slave (serwer danych)	331
18.2.4. CRC w Modbus RTU	331
18.3. Projekt24_1_Modbus_Master	333
18.4. Projekt25_Modbus_slave	336
18.5. Projekt24_2_Modbus_Master	340
18.6. I ² C Inter-Integrated Circuit	342
18.6.1. Czujnik temperatury STLM75	344
18.6.2. Projekt26_I2C	346
18.7. SPI Serial Peripheral Interface	347
18.7.1. Projekt27_SPI	348
19. Obiekt regulacji	351
19.1. Obiekt oscylacyjny	351
19.2. Obiekt wieloinercyjny z opóźnieniem	352
19.3. Projekt28_obiekt	353
20. Cyfrowy regulator PID	357
20.1. Podstawowy schemat układu regulacji	357
20.1.1. Transmitancja operatorowa regulatora PID	358
20.2. Cyfrowa realizacja algorytmu PI	358
20.2.1. Składowa proporcjonalna algorytmu	359
20.2.2. Składowa całkowa algorytmu	359

20.2.3.	Czas zdwojenia T_I	361
20.2.4.	Projekt29_PI	361
20.3.	Cyfrowa realizacja algorytmu PID	362
20.3.1.	Czas wyprzedzenia T_D	363
20.3.2.	Składowa różniczkowa algorytmu	363
20.3.3.	Projekt30_PID	367
20.4.	Dobór nastaw regulatora PID	368
21.	Lokowanie biegunów	371
21.1.	Transmitancja dyskretna i transformata Z (Laurenta)	371
21.1.1.	Operator różnicy wstecznej Δ	374
21.1.2.	Bieguny transmitancji (<i>poles</i>)	375
21.1.3.	Bieguny zespolone sprzężone	376
21.1.4.	Twierdzenie o wartości końcowej	378
21.2.	Prosty projekt regulatora	379
21.2.1.	Wzory Viéte'a	381
21.2.2.	Projekt31_1_pole_placement	384
21.3.	Zwiększenie odporności na zakłócenia	386
21.3.1.	Zakłócenie stałe odniesione do wejścia obiektu	386
21.3.2.	Szum pomiarowy	388
21.3.3.	Projekt31_2_pole_placement	393
21.3.4.	Projekt31_3_pole_placement, obiekt oscylacyjny	393
22.	RTOS Real Time Operating System	397
22.1.	Podwójny wskaźnik stosu: MSP i PSP	398
22.2.	Projekt32_Multitasking	400
22.2.1.	Inicjalizacja systemu RTOS	404
22.2.2.	Obsługa przerwania systemowego SysTick	408
22.2.3.	Uruchomienie systemu RTOS	410
A.	Schemat zestawu uruchomieniowego ZL27ARM	413
B.	Znaki ASCII7 i operatory języka C	417
C.	Karty katalogowe silników krokowych	421

D. Schemat płyty SMSboard	425
E. Schemat płyty KP_board	427
F. Schemat płyty RS232/485	429
Bibliografia	431
Skorowidz	435