



О. В. ЗУБКОВ, І. В. СВИД, О. В. ВОРГУЛЬ, В. В. СЕМЕНЕЦЬ

**ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ
STM32 В СЕРЕДОВИЩІ STM32CUBEIDE
В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець

**ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ STM32
В СЕРЕДОВИЩІ STM32CubeIDE
в прикладах і задачах**

Навчальний посібник
для здобувачів вищої освіти закладів вищої освіти,
які навчаються за галузями знань
12 «Інформаційні технології»,
15 «Автоматизація та приладобудування»,
16 «Хімічна та біоінженерія»,
17 «Електроніка та телекомунікації»

**Дніпро
ЛІРА ЛТД
2022**

УДК 004.31:004.35

3-91

Рекомендовано Вченою радою ХНУРЕ як навчальний посібник для здобувачів вищої освіти закладів вищої освіти, які навчаються за галузями знань 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування», 16 «Хімічна та біоінженерія», 17 «Електроніка та телекомунікації», протокол № 3 від 29.07.2022 року.

Авторський колектив:

О.В. Зубков, к.т.н., доц.; І.В. Свид, к.т.н., доц.; О.В. Воргуль, к.т.н. доц.;
В.В. Семенець, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д.т.н, проф.

Рецензенти:

В. А. Тихонов, доктор фізико-математичних наук, проф., професор кафедри інформаційно-мережної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки;

І. М. Бондаренко, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки

Зубков О. В.

3-91 Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах: Навч. посіб. / О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 144 с.

ISBN 978-966-981-675-7

У навчальному посібнику стисло викладено основні технічні характеристики мікроконтролерів STM32 та основи мови C/C++ для їх програмування. Далі розглянуті основні внутрішні модулі мікроконтролера STM32F407VG, їх конфігурування та програмування в середовищі STM32CubeIDE. Детально розглянуті синтаксис та функції бібліотеки HAL для програмування внутрішніх вузлів. В кожному розділі наведені приклади програм керування та виконання базових функцій обробки сигналів, які супроводжуються коментарями. З метою закріплення знань, набутих на практичних заняттях, подаються умови задач для самостійної роботи. Значна увага приділяється вивченню алгоритмів обробки цифрових сигналів, роботі з таймерами та інтерфейсами передавання даних, а також використанню каналів DMA для реалізації незалежного паралельного передавання даних одночасно з виконанням основної задачі ядром мікроконтролера.

Навчальний посібник призначений для здобувачів вищої освіти усіх форм навчання, які навчаються за галузями знань 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування», 16 «Хімічна та біоінженерія», 17 «Електроніка та телекомунікації».

Іл. 99, табл. 5, бібл. 11 найм.

УДК 004.31:004.35

© О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В.
Воргуль, В. В. Семенець, 2022
© ПП «ЛІРА ЛТД», 2022

ISBN 978-966-981-675-7

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	6
ПЕРЕДМОВА	7
1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРОЦЕСОРІВ STM32	10
Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	15
2. ОСНОВИ МОВИ C/C++ ТА СТВОРЕННЯ ПРОЕКТУ	16
2.1. Основи мови C/C++ для програмування мікроконтролерів	16
2.1.1. Типи даних	16
2.1.2. Оголошення імен констант, змінних	16
2.1.3. Оголошення констант	17
2.1.4. Оголошення змінних	17
2.1.5. Оголошення масивів	17
2.1.6. Оголошення структур	17
2.1.7. Оператори мови C++	18
2.1.8. Умовний оператор if-else	22
2.1.9. Оператор множинного вибору switch	24
2.1.10. Організація циклів	24
2.1.11. Функції	27
2.1.12. Показчики на пам'ять	28
2.2. Бібліотеки	30
2.3. Структура основної програми	30
2.4. Принцип роботи операційної системи FreeRTOS	33
2.4.1. Задачі	33
2.4.2. Черги	34
2.4.3. Семафори	37
2.4.4. Mutex	37
2.5. Створення нового проекту у середовищі STM32CubeIDE	38
2.6. Створення операційної системи FreeRTOS в середовищі STM32CubeIDE	42
2.7. Підключення додаткових бібліотек до проекту у STM32CubeIDE ..	45
2.8. Завантаження проекту у мікроконтролер та відлагодження програми	47
Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	53
3. СИСТЕМА ТАКТУВАННЯ	55
3.1. Тактування ядра та внутрішніх вузлів мікроконтролера	55

3.2.	Тактування годинника реального часу	57
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	58
4.	ПОРТИ ВВОДУ-ВИВОДУ	59
4.1.	Організація та налаштування портів воду-виводу	59
4.2.	Програмування портів вводу-виводу	65
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	69
5.	ТАЙМЕРИ-ЛІЧИЛЬНИКИ	71
5.1.	Системний таймер	71
5.2.	WatchDog таймер	71
5.3.	Базові таймери	72
5.4.	Таймери загального призначення	74
5.5.	Таймери з розширеними можливостями	81
5.6.	Програмування таймерів	81
5.6.1.	Запуск таймера без переривань	81
5.6.2.	Запуск таймера з перериваннями	81
5.6.3.	Запуск таймера у режимі формування ШІМ	82
5.6.4.	Запуск таймера у режимі захвату	82
5.6.5.	Приклад програмного блимання світлодіодом з використанням переривань від таймеру	83
5.6.6.	Приклад апаратного блимання світлодіодом з використанням ШІМ	84
5.6.7.	Приклад апаратного вимірювання періоду зовнішніх вхідних імпульсів	85
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	86
6.	ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ	87
6.1.	Характеристики цифро-аналогового перетворювача	87
6.2.	Режими роботи цифро-аналогового перетворювача та їх конфігурування	87
6.3.	Програмування ЦАП	92
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	94
7.	АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ	95
7.1.	Режими роботи АЦП	97
7.2.	Налаштування АЦП у STM32CubeIDE	98
7.3.	Програмування АЦП	100
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	103
8.	ІНТЕРФЕЙС ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ USART	104
8.1.	Принципи роботи інтерфейсу USART у асинхронному режимі	105

8.2.	Налаштування інтерфейсу USART в середовищі STM32CubeIDE ...	106
8.3.	Функції бібліотеки HAL для роботи з інтерфейсом USART	108
8.4.	Приклади передавання та приймання кадрів даних через інтерфейс USART	110
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	111
9.	КОНТРОЛЕР FSMC	112
9.1.	Характеристики та принцип роботи контролера FSMC	112
9.2.	Налаштування інтерфейсу FSMC в середовищі STM32CubeIDE	114
9.3.	Програмування FSMC	115
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	120
10.	ІНТЕРФЕЙС SPI	121
10.1.	Опис SPI.....	121
10.2.	Налаштування SPI у STM32CubeIDE	125
10.3.	Програмування інтерфейсу SPI	127
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	132
11.	ОБЧИСЛЕННЯ КОНТРОЛЬНИХ СУМ У МІКРОКОНТРОЛЕРАХ STM32	133
11.1.	Налаштування модуля CRC в мікроконтролері STM32F407VG	133
11.2.	Програмування модуля CRC.....	134
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	135
12.	ОБМІН ДАНИМИ МІЖ ЗАДАЧАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧЕРГ В ОПЕРАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ FREERTOS.....	136
12.1.	Програмні функції для роботи із чергами	136
12.2.	Приклад роботи із чергами	137
	Контрольні запитання та завдання для самоконтролю	140
ПІСЛЯМОВА		141
ЛІТЕРАТУРА		143

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ADC (АЦП) – аналого-цифровий перетворювач
ARM – архітектура ядра мікроконтролера
DAC (ЦАП) – цифро-аналоговий перетворювач
DMA – контролер прямого доступу до пам'яті
FIFO – принцип роботи черги «першим увійшов - першим вийшов»
FreeRTOS – безкоштовна операційна система реального часу
GPIO – інтерфейс вводу/виводу загального призначення
RTC – часи реального часу
SWD – синхронний інтерфейс програмування мікроконтролерів STM32
SWV – універсальний програмний модуль перегляду значінь внутрішніх змінних у графічному вигляді
TIM – таймер
UART – універсальний асинхронний інтерфейс передавання даних
PEOM – персональна електронно-обчислювальна машина
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція

ПЕРЕДМОВА

Світові агенції з аналізу розвитку електроніки у світі кожного року публікують результати досліджень у Європі та інших країнах. Ці результати свідчать, що ера 8-ми та 16-ти розрядних мікроконтролерів закінчується. Вони використовуються лише у 8-10% розробок електроніки. Найбільшу популярність у світі мають 32-х розрядні мікроконтролери. Також спостерігається значний ріст кількості розробок з використанням 64-х розрядних процесорів, наприклад, процесорів мобільних телефонів. Також слід звернути увагу, що на першому місці серед сучасних мікроконтролерів знаходиться ядро з ARM архітектурою. Серед сучасних 32-х розрядних мікроконтролерів перше місце по кількості продаж та розробок займають мікроконтролери STM32 компанії ST Microelectronics. Таку шалену популярність вони здобули завдяки прекрасному відношенню можливості/ціна.

При створенні нового електронного пристрою з використанням мікроконтролерів в умовах реалій сучасного ринку інженери розробники повинні працювати в дуже обмеженому інтервалі часу, бо нові зразки електроніки конкуренти випускають з інтервалом часу від пів року до року. Тому на створення та налагодження програмного забезпечення відводиться від декількох місяців до року. Досягти цих строків вдається завдяки використанню мов програмування C/C++, а також операційних систем реального часу. Мови C/C++ використовуються у 92% нових пристроїв, а операційні системи у 60%. Також практично всі сучасні електронні пристрої, навіть самі прості, мають комунікаційні інтерфейси завдяки яким вдається дистанційно відстежувати їх роботу та керувати ними, налагоджувати їх, сполучати ці пристрої з системи розумного будинку та їм подібними.

Структурно навчальний посібник поділений на розділи, які забезпечують можливість найкращого сприйняття та вивчення матеріалів, з великою кількістю ілюстрацій та практичними прикладами.

У першому розділі розглянуті: призначення, переваги та недоліки існуючих серій мікроконтролерів та особлива увага приділена мікроконтролеру STM32F407, що в подальшому використовується у всіх прикладах цього навчального посібника.

У другому розділі викладається стисла інформація про класичну мову програмування C++ і її особливості при програмуванні мікроконтролерів.

Також читачі знайомляться із поширеними для мікроконтролерів бібліотеками і структурою програми для мікрконтролера. Розглядається послідовність дій при створенні нового проекту у середовищі STM32CubeIDE і принципи функціонування операційної системи FreeRTOS.

У третьому розділі розглядаються принципи та переваги тактування мікроконтролеру від зовнішнього стабільного джерела та внутрішнього генератора.

У четвертому розділі розглянуті: архітектура, призначення, налаштування та програмування портів вводу-виводу загального призначення. Наведено багато прикладів з формування логічних сигналів та обробки вхідних сигналів. У прикладах цієї та інших глав використовується високорівнева бібліотека HAL, що дає можливість створювати універсальний програмний код, що можна використовуватися на будь-якому мікроконтролері STM32.

У п'ятому розділі наведена інформація з існуючих типів таймерів мікроконтролерів STM32 та розглянуті: архітектура, режими роботи, їх принципи функціонування і конфігурування в STM32CubeIDE. Розглянуті принципи і приклади формування імпульсних сигналів на апаратному рівні з використанням таймерів та вимірювання параметрів зовнішніх сигналів. У цій та інших главах вивчається застосування каналів DMA для передавання даних із оперативної пам'яті у периферію та навпаки паралельно із роботою ядра, що значно підвищує ефективність роботи.

У шостому розділі вивчається вбудований цифро-аналоговий перетворювач у режимах формування стандартних та користувацьких сигналів. Демонструється сумісна робота із каналом DMA.

У сьомому розділі наведені: функціональна схема, характеристики, принципи роботи та програмування вбудованого аналого-цифрового перетворювача. Практичні приклади дозволяють вивчити принципи вимірювання напруги, дійсних сигналів, показань різноманітних датчиків.

У восьмому розділі розглянуто поширений у системах автоматизації та інших приладах інтерфейс USART з прикладами реалізації обміну кадрами даних між мікроконтролером та ПЕОМ.

У дев'ятому розділі розглядається спеціалізований інтерфейс FSMC підключення до мікроконтролера графічних дисплеїв, оперативної чи флеш пам'яті, його налаштування та програмування.

У десятому розділі розглянуто дуже поширений для підключення різних типів пам'яті та датчиків високошвидкісний синхронний інтерфейс передавання даних SPI. Наведено приклади налаштування і програмного обміну даними за допомогою цього інтерфейсу з популярною мікросхемою

пам'яті.

В одинадцятому розділі міститься інформація з налаштування модуля обчислення контрольних сум із прикладами.

У дванадцятому розділі описано роботу інших механізмів функціонування операційної системи.

У всіх розділах навчального посібника використовується операційна система FreeRTOS і обробка інформації здійснюється в задачах цієї операційної системи.

Зміст навчального посібника «Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах» відповідає робочій програмі навчальної дисципліни «Проектування пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС. Мікроконтролери».

Матеріали навчального посібника призначено для здобувачів вищої освіти усіх форм навчання, які навчаються за галузями знань 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування», 16 «Хімічна та біоінженерія», 17 «Електроніка та телекомунікації».

ЛІТЕРАТУРА

1. Стефан Р. Девіс. С++ Для чайников М.: Вильямс, 2003. 336 с.
2. Noviello Carmine. Mastering STM32 Leanpub, 2018. 852 p.
3. Geoffrey Brown. Discovering the STM32 Microcontroller. USA, 2016. 244 p.
4. Шпак З.Я. Програмування мовою С. Львів: Львівська політехніка, 2011. 436 с.
5. Васильєв О. Програмування на С++ в прикладах і задачах : Навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2017. 382 с.
6. Integrated Development Environment for STM32. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
7. Мартин М. Инсайдерское руководство по STM32. <https://istarik.ru/file/STM32.pdf>
8. Зубков О.В. Тенденции обучения проектированию электронных устройств на микроконтроллерах // «KharkivProm Days. Виробництво і ефективність». Збірник матеріалів форуму секції «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології». – Харків, ХНУРЕ, Виставкова компанія ADT, 2019. – 40-42 с.
9. O. Zubkov, I. Svyd, O. Maltsev. Features of the use of PID controllers when controlling evaporators. // II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA), Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 6-7. doi: 10.35598/mcfpga.2020.001.
10. O. Zubkov, I. Svyd, O. Vorgul. Features of the Digital Filters Implementation on STM32 Microcontrollers. // III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 6-8, doi: 10.35598/mcfpga.2021.001.
11. O. Zubkov, I. Svyd, O. Vorgul. Features of the Implementation of an Over/Under Voltage Relay on STM 32 Microcontrollers. // IV International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2022), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 6-8, doi: 10.35598/mcfpga.2022.001.