

УДК 004.04  
ББК 32.372  
И75

**Йодиче Дж. М.**

И75 TinyML. Книга рецептов / пер. с англ. Ю. В. Ревича. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 298 с.: ил.

**ISBN 978-5-93700-169-6**

TinyML – технология, призванная расширить использование искусственного интеллекта за счет устройств с малым энергопотреблением, таких как микроконтроллеры. Прочитав эту книгу, вы сможете свободно использовать передовые практики и фреймворки ML в своей работе. Для начала вы ознакомитесь с основами развертывания интеллектуальных приложений на Arduino Nano 33 BLE Sense и Raspberry Pi Pico, а затем на примере работы с реальными датчиками получите необходимые навыки для внедрения комплексных интеллектуальных приложений в различных сценариях.

Издание предназначено для инженеров-разработчиков, заинтересованных в создании приложений машинного обучения на микроконтроллерах. Требуется базовое знакомство с C/C++, языком программирования Python и интерфейсом командной строки (CLI); предварительные знания о микроконтроллерах не обязательны.

УДК 004.04  
ББК 32.372

Copyright ©Packt Publishing 2022. First published in the English language under the title “TinyML Cookbook” – (9781801814973).

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-1-80181-497-3 (англ.)  
ISBN 978-5-93700-169-6 (рус.)

© 2022 Packt Publishing  
© Перевод, оформление, издание,  
ДМК Пресс, 2023

# Содержание

<b>От издательства</b> .....	13
<b>Введение</b> .....	14
<b>Составители</b> .....	16
<b>Предисловие</b> .....	18
 <b>Глава 1. Начало работы с TinyML</b> .....	25
Технические требования.....	25
Представление TinyML.....	26
Что такое TinyML?.....	26
Почему ML на микроконтроллерах? .....	26
Зачем запускать ML локально? .....	27
Возможности и проблемы TinyML .....	28
Среды развертывания для TinyML .....	28
tinyML Foundation .....	30
Краткое описание глубокого обучения (DL) .....	30
Глубокие нейронные сети.....	31
Сверточные нейронные сети .....	32
Квантизация .....	35
Разница между мощностью и энергией .....	36
Различие между напряжением и током .....	36
Мощность и энергия.....	38
Программирование микроконтроллеров.....	39
Архитектура памяти.....	42
Периферийные устройства .....	43
Вход/выход общего назначения (GPIO или IO).....	44
Аналого-цифровые преобразователи .....	45

Последовательная связь .....	45
Таймеры .....	45
Представление Arduino Nano 33 BLE Sense и Raspberry Pi Pico .....	45
Настройка Arduino Web Editor, TensorFlow и Edge Impulse .....	47
Подготовка веб-редактора Arduino Web Editor .....	47
Подготовка TensorFlow .....	47
Подготовка Edge Impulse .....	49
Как это делается .....	49
Запуск скетча на Arduino Nano 33 и Raspberry Pi Pico .....	51
Подготовка .....	51
Как это делается .....	52

## **Глава 2. Прототипирование на микроконтроллерах..... 53**

Технические требования .....	53
Отладка кода .....	54
Подготовка .....	54
Как это делается .....	55
Дополнительно .....	58
Подключение светодиодного индикатора на макетной плате .....	58
Подготовка .....	58
Размещение прототипа на макетной плате .....	60
Как это делается .....	62
Управление внешним светодиодом с помощью GPIO .....	65
Подготовка .....	65
Представляем периферийное устройство GPIO .....	69
Как это делается .....	70
Включение и выключение светодиода с помощью кнопки .....	74
Подготовка .....	74
Как это делается .....	76
Использование прерываний для считывания состояния кнопки .....	79
Подготовка .....	79
Как это делается .....	80
Питание микроконтроллеров от батарей .....	82
Подготовка .....	82
Увеличение выходного напряжения при последовательном подключении батарей .....	83
Увеличение энергетической емкости за счет параллельного подключения батарей .....	83
Подключение батарей к плате микроконтроллера .....	84
Как это делается .....	85
Дополнительно .....	86

## **Глава 3. Создание метеостанции с помощью библиотеки TensorFlow Lite for microcontrollers..... 88**

Импорт данных о погоде из WorldWeatherOnline .....	89
--	----

Подготовка.....	89
Как это делается.....	90
Подготовка набора данных.....	92
Подготовка.....	92
Подготовка сбалансированного набора данных .....	92
Масштабирование параметров с помощью Z-score .....	93
Как это делается.....	94
Обучение модели с помощью TF .....	98
Подготовка.....	98
Как это делается.....	99
Оценка эффективности модели.....	104
Подготовка.....	104
Наглядное представление эффективности с помощью матрицы ошибок .....	104
Оценка полноты (recall), точности (precision) и критерия F-score.....	106
Как это делается.....	106
Квантизация модели с помощью конвертера TFLite.....	108
Подготовка.....	109
Квантизация входной модели .....	109
Как это делается.....	112
Использование встроенного датчика температуры и влажности на Arduino Nano .....	114
Подготовка.....	114
Как это делается.....	115
Использование датчика DHT22 с Raspberry Pi Pico.....	116
Подготовка.....	116
Как это делается.....	117
Подготовка входных характеристик для просчета модели .....	119
Подготовка.....	119
Как это делается.....	120
Запуск на устройстве с помощью TFLu.....	122
Подготовка.....	122
Как это делается.....	123

## Глава 4. Голосовое управление светодиодами с помощью

<b>Edge Impulse .....</b>	<b>127</b>
Технические требования.....	128
Сбор аудиоданных с помощью смартфона .....	128
Подготовка.....	129
Сбор звуковых семплов для KWS .....	129
Как это делается.....	129
Извлечение параметров MFCC из аудиосемплов.....	134
Подготовка.....	134
Анализ звука в частотной области.....	134
Генерация Mel-спектрограммы.....	136

Извлечение MFCC .....	137
Как это делается.....	138
Дополнительно.....	140
Пример проектирования и обучения нейронной сети (NN) .....	142
Подготовка .....	142
Как это делается.....	142
Настройка эффективности модели с помощью EON Tuner.....	144
Подготовка .....	144
Как это делается.....	145
Классификация в реальном времени с помощью смартфона .....	147
Подготовка .....	147
Как это делается.....	147
Классификация в реальном времени с помощью Arduino Nano .....	149
Подготовка .....	149
Как это делается.....	149
Непрерывное распознавание на Arduino Nano .....	151
Подготовка .....	151
Изучение примера приложения KWS в реальном времени.....	151
Как это делается.....	153
Схема для голосового управления светодиодами на Raspberry Pi Pico .....	157
Подготовка .....	157
Представляем модуль электретного микрофона с усилителем MAX9814.....	158
Подключение микрофона к АЦП Raspberry Pi Pico .....	159
Как это делается.....	159
Выборка звука на Raspberry Pi Pico с помощью АЦП и прерываний по таймеру.....	164
Подготовка .....	164
Выборка звука на Raspberry PI Pico с помощью АЦП и прерываний по таймеру .....	164
Как это делается.....	165
Дополнительно.....	169

## **Глава 5. Распознавание интерьеров помещений с помощью TensorFlow Lite for Microcontrollers и Arduino Nano .....**

Технические требования.....	172
Съемка с помощью модуля камеры OV7670 .....	172
Подготовка .....	173
Как это делается.....	173
Захват кадров камеры через последовательный порт с помощью Python.....	176
Подготовка .....	177
Передача изображений RGB888 через последовательный порт .....	177
Изучаем, как преобразовать RGB565 в RGB888.....	179
Как это делается.....	179

Преобразование изображений QQVGA из YCbCr422 в RGB888 .....	183
Подготовка .....	183
Преобразование YCbCr422 в RGB888 .....	184
Как это делается .....	184
Создание набора данных для распознавания интерьеров помещений .....	186
Подготовка .....	186
Как это делается .....	187
Трансфертное обучение с помощью Keras API .....	189
Подготовка .....	189
Изучение вариантов дизайна сети MobileNet .....	190
Как это делается .....	191
Подготовка и тестирование квантизированной модели TFLite .....	194
Подготовка .....	195
Как это делается .....	195
Сокращение объема RAM за счет объединения функций обрезки, изменения размера, масштабирования и квантизации .....	197
Подготовка .....	198
Изменение размера с помощью билинейной интерполяции .....	199
Как это делается .....	200

## Глава 6. Создание интерфейса на основе жестов

### для управления воспроизведением на YouTube..... 206

Технические требования.....	207
Подключение к MPU-6050 IMU через интерфейс I2C .....	207
Подготовка .....	208
Представляем MPU-6050 IMU .....	208
Связь с помощью I2C .....	209
Как это делается .....	211
Получение данных акселерометра .....	214
Подготовка .....	214
Как это делается .....	217
Построение набора данных с помощью инструмента пересылки данных Edge Impulse data forwarder .....	220
Подготовка .....	221
Как это делается .....	222
Разработка и обучение модели ML.....	225
Подготовка .....	225
Использование спектрального анализа для распознавания жестов .....	226
Как это делается .....	228
Классификации в реальном времени с помощью инструмента пересылки данных Edge Impulse data forwarder .....	231
Подготовка .....	231
Как это делается .....	231
Распознавание жестов на Raspberry Pi Pico в ОС Arm Mbed .....	232
Подготовка .....	232

Создание рабочих потоков с помощью RTOS API в Arm Mbed OS .....	233
Фильтрация избыточных и ложных прогнозов .....	234
Как это делается.....	235
Создание бесконтактного интерфейса с помощью PyAutoGUI .....	241
Подготовка.....	241
Как это делается.....	242

## **Глава 7. Запуск модели TinyML CIFAR-10 на виртуальной платформе ОС Zephyr .....**

Технические требования.....	245
Начало работы с ОС Zephyr .....	245
Подготовка.....	245
Как это делается.....	246
Разработка и обучение малой модели CIFAR-10 .....	248
Подготовка.....	249
Замена свертки 2D на DWSC .....	249
Контроль поддержки требований модели к памяти .....	251
Как это делается.....	252
Оценка достоверности модели TFLite .....	255
Подготовка.....	256
Как это делается.....	256
Преобразование цифрового изображения в C-байтовый массив .....	258
Подготовка.....	258
Как это делается.....	259
Подготовка основы проекта TFLu.....	261
Подготовка.....	261
Как это делается.....	262
Создание и запуск приложения TFLu на QEMU.....	263
Подготовка.....	264
Как это делается.....	264

## **Глава 8. К следующему поколению TinyML с microNPU .....**

Технические требования.....	270
Настройка Arm Corstone-300 FVP .....	270
Подготовка.....	270
Как это делается.....	272
Установка TVM с поддержкой Arm Ethos-U.....	274
Подготовка.....	275
Мотивация, лежащая в основе TVM.....	275
Как TVM оптимизирует работу модели .....	275
Как это делается.....	277
Установка набора инструментов Arm и стека драйверов Ethos-U.....	279
Подготовка.....	280
Как это делается.....	280

## 12 ❖ Содержание

---

Генерация С-кода с помощью TVM .....	282
Подготовка .....	283
Запуск TVM на микроконтроллерах с помощью microTVM .....	284
Как это делается.....	284
Генерация С-байтовых массивов для входа, выхода и меток .....	286
Подготовка .....	286
Как это делается.....	288
Создание и запуск модели на Arm Ethos-U55 .....	291
Подготовка .....	291
Как это делается.....	291
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>295</b>