

Особенности микроконтроллеров STM32G0

Александр Русу

E-mail: ????????

Появление на рынке недорогих 32-разрядных микроконтроллеров STM32F0 на основе ядра Cortex M0 в свое время стало знаковым событием в мире электроники. Удачное сочетание высокой производительности, развитой периферии и низкой стоимости, в совокупности с использованием корпусов малых размеров, привело к широкой популярности этих микросхем. Недавно компания STMicroelectronics выпустила на рынок новое семейство микроконтроллеров STM32G0 на основе обновленного ядра Cortex M0+, об особенностях которых и пойдет речь в этой статье.

Микроконтроллеры STM32G0 на основе ядра Cortex M0+ являются дальнейшим развитием микросхем предыдущего поколения STM32F0, использующих ядро Cortex M0 (рис. 1). Это семейство относится к бюджетным микроконтроллерам общего назначения и предназначено для использования в широком спектре приложений, не требующих большой производительности или сверхмалого энергопотребления. Однако использование микроконтроллеров STM32G0 только в относительно

простых устройствах не является признаком их низкого качества. По сравнению с существующими 8-ми и 16-разрядными микросхемами, традиционно используемыми в подобных приложениях, микроконтроллеры STM32G0 обеспечивают более низкое удельное энергопотребление, а высокая тактовая частота, в совокупности с повышенной разрядностью, позволяют реализовать узлы управления электронной техникой намного быстрее и проще, чем при использовании микросхем других про-

изводителей. Подобное позиционирование связано с тем, что у компании STMicroelectronics кроме STM32G0 существуют и другие решения, специально ориентированные для более сложных задач, например, семейства STM32Lx с ультрамалым энергопотреблением, предназначенные для использования в устройствах с батарейным питанием, или STM32Hx, с помощью которых можно быстро обработать большой объем информации.

Ключевыми преимуществами микроконтроллеров STM32G0 являются высокая, по сравнению с конкурирующими решениями, производительность, достигнутая за счет повышенной тактовой частоты и использования 32-разрядной архитектуры, и малое удельное энергопотребление, обусловленное применением современных технологий производства с меньшим размером техпроцесса. Кроме этого, разработчику доступен богатый выбор периферийных модулей, позволяющий решить практически весь спектр типовых задач, связанных с обработкой и генераци-

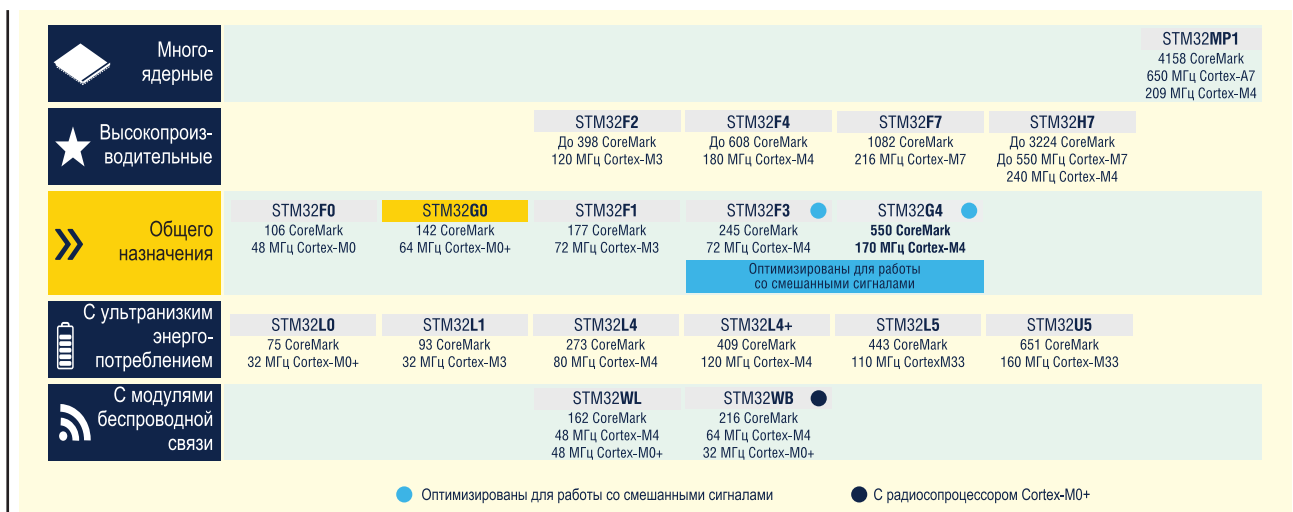


Рис. 1. Семейства микроконтроллеров STM32

ей аналоговых и цифровых сигналов. Не следует забывать также и о мощной информационной поддержке, в виде примеров использования периферийных модулей, наличии большого количества отладочных плат, высокой совместимости кода, позволяющего быстро менять модель микроконтроллера, а также о существовании бесплатной среды проектирования STM32Cube с графическим конфигуратором STM32CubeMX. Однако окончательным аргументом в пользу STM32 является низкая цена, ведь на сегодняшний день полноценная 32-разрядная система на основе STM32 может обойтись дешевле 8-ми или 16-разрядных решений с меньшим уровнем производительности и функциональности.

ОСОБЕННОСТИ ЯДРА CORTEX M0+

Ядро Cortex M0+ является результатом глубокой переработки и модернизации ядра Cortex M0, использованного в микроконтроллерах STM32F0. Несмотря на то, что компания STMicroelectronics не планирует прекращение производства семейства STM32F0, уже успешного завоевать заслуженную популярность среди производителей электроники, в ближайшем будущем модельный ряд и характеристики микросхем STM32G0 сделают микроконтроллеры STM32F0 невыгодным для дальнейшего использования. Поэтому при разработке новых приложений вместо STM32F0 уже сейчас следует ориентироваться на более совершенные микроконтроллеры STM32G0, тем более, что перенос кода с одной платформы STM на другую обычно не вызывает проблем.

Появление в ядре Cortex M0+ двухуровневого конвейера привело к сокращению количества обращений к Flash-памяти, что позволило одновременно и уменьшить уровень энергопотребления

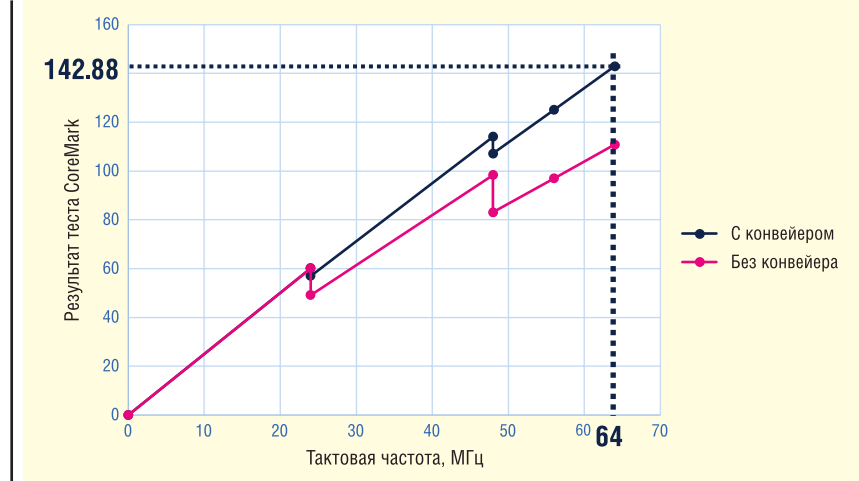


Рис. 2. Результаты теста CoreMark для микроконтроллеров STM32G0

и увеличить производительность. Например, результаты теста Dhrystone показывают, что на максимальной тактовой частоте 64 МГц микроконтроллеры STM32G0 имеют производительность 59.5 DMIPS (приблизительно 0.93 DMIPS/МГц), в то время у представителей семейства STM32F0 на частоте 48 МГц этот параметр не превышает 38 DMIPS (приблизительно 0.8 DMIPS/МГц) (рис. 2).

Изменение архитектуры коснулось также и общей организации энергопитания микросхем. В микроконтроллерах STM32F0 для подачи питания использовалось несколько пар выводов VDD + VSS, в том числе и отдельная пара VDDA + VSSA для питания аналоговых узлов. В микросхемах STM32G0, для этой цели теперь используется только одна пара выводов VDD/VDDA + VSS/VSSA, через которую поступает энергия и на аналоговые, и на цифровые узлы микросхемы (рис. 3). Это позволяет либо увеличить количество доступных портов ввода-вывода, либо использовать корпуса с меньшим количеством выводов. Но самое глав-

ное — такой формат подачи питания позволяет упростить разводку печатной платы и уменьшить общее количество блокирующих конденсаторов и помеходавляющих дросселей.

С точки зрения энергопотребления микроконтроллеры STM32G0 могут работать в восьми основных режимах (рис. 4). В активном режиме (Run Mode) напряжение питания и тактовая частота ядра максимальны, при этом микроконтроллеры развивают наибольшую производительность и потребляют, соответственно, наибольшее количество энергии (до 100 мкА/МГц). В случае, когда нужно обеспечить только полноценную работу периферии без участия ядра можно перевести микроконтроллер в традиционный спящий режим (Sleep Mode), в котором выполнение инструкций останавливается до возникновения прерывания или перезагрузки. Если же ядро микроконтроллера должно непрерывно выполнять некоторые фоновые задачи, не требующие выполнения большого количества инструкций, тогда лучше всего использовать активный режим с пониженным энергопотреб-

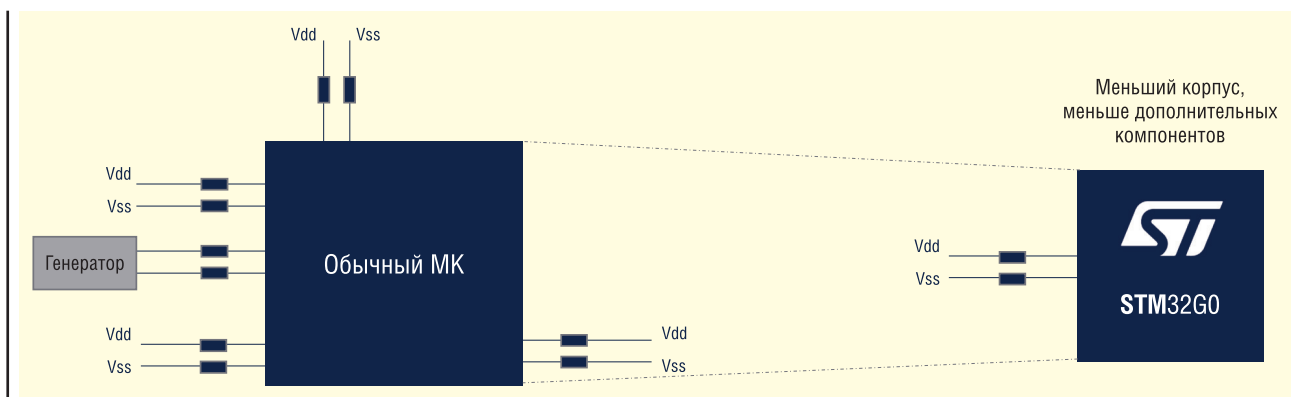


Рис. 3. Схема подачи питания на микроконтроллеры STM32G0

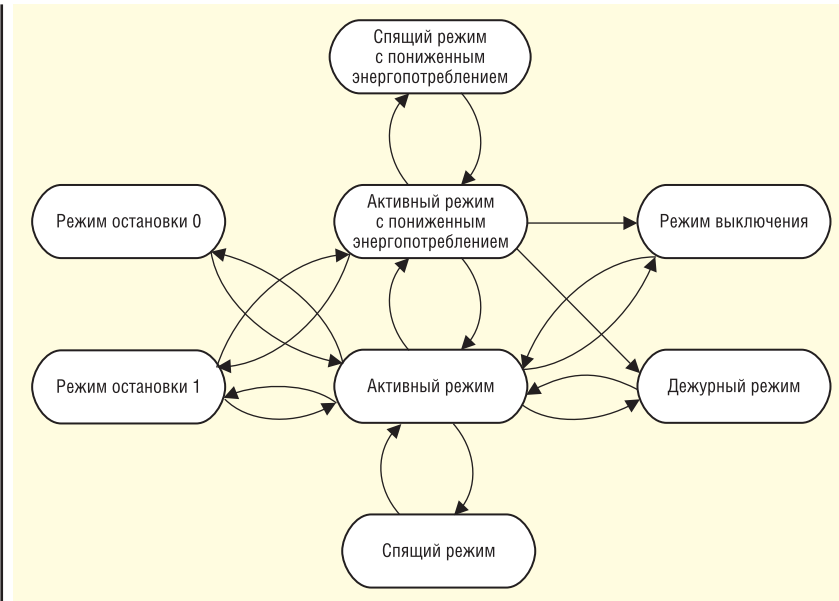


Рис. 4. Режимы энергопотребления микроконтроллеров STM32G0

лением (Low-Power Run Mode), в котором питание системы осуществляется от интегрированного малопотребляющего стабилизатора, а ее тактовая частота не превышает 2 МГц. Из этого режима можно также перейти в спящий режим с пониженным энергопотреблением (Low-Power Sleep Mode), в котором ядро не выполняет никаких операций.

Дополнительно снизить энергопотребление можно только путем отключения неиспользуемых периферийных устройств. В самом экономичном режиме (Shutdown Mode), позволяющем уменьшить величину потребляемого тока до 40 нА (рис. 5), в активном состоянии могут оставаться лишь пять портов ввода-вывода, часы реального времени (RTC) и два детектора вскрытия (TAMP). Однако выход из этого режима

является наиболее длительным и может достигать 250 мкс. На этот режим очень похож дежурный режим (Standby Mode), в котором кроме узлов, активных в режиме Shutdown, продолжают работать монитор напряжения питания и независимый сторожевой таймер (IWDT). В остальных энергосберегающих режимах (Stop Mode) достаточно большое количество периферийных модулей может находиться в активном состоянии, а уменьшение энергосбережения достигается за счет понижения тактовой частоты и уменьшения напряжения питания. Например, в режиме Stop Mode 1 основной стабилизатор (MR) отключается, а питание всех активных цифровых узлов осуществляется от интегрированного малопотребляющего стабилизатора (LPR).

Модернизация ядра Cortex-M0 коснулась также процесса изготовления микросхем. Использование последних достижений в области производства полупроводниковых компонентов, в совокупности с более жесткими технологическими нормами, позволило увеличить удельную плотность размещения элементов. Это привело к тому, что теперь на кремниевых пластинах с одинаковыми размерами при использовании ядра Cortex-M0+ можно сформировать большее количество ячеек памяти, чем в случае Cortex-M0. Например, микроконтроллеры STM32G0 с объемом Flash-памяти 64 кбайт и 128 кбайт могут иметь до 144 кбайт ОЗУ, а объем оперативной памяти более дорогих моделей, способных хранить прошивку размером до 512 кбайт, может достигать 144 кбайт. С другой стороны, уменьшение размеров элементов позволяет уменьшить и общие размеры кристалла, поэтому микросхемы семейства STM32G0, при одинаковых объемах Flash-памяти и ОЗУ, могут иметь меньшие размеры и выпускаться, например, в 8-выводных корпусах SO8N с размерами всего 4.9 мм x 6 мм.

Кроме возможности размещения на кристалле большего количества оперативной памяти, изменились также и методы ее использования. В микроконтроллерах Cortex-M0+ реализован модуль защиты памяти (Memory Protection Unit, MPU), обычно присутствующий в «старших» семействах (Cortex-M3, Cortex-M4 и выше). При использовании MPU оперативную память можно разделить на восемь сегментов, с ограничением доступа приложений к каждому из них. Подобные механизмы чаще всего

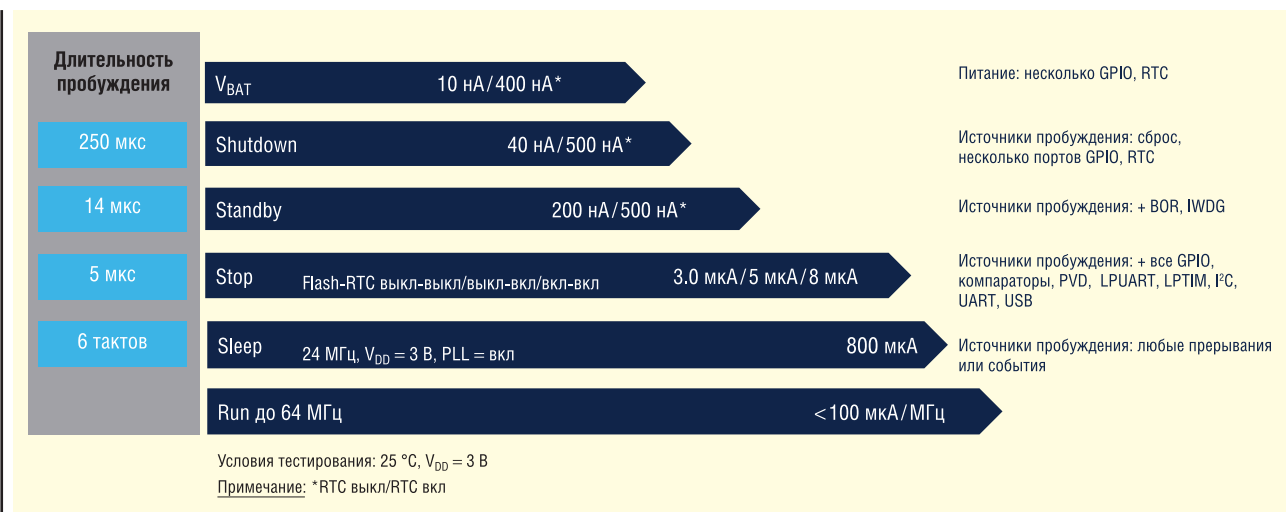


Рис. 5. Энергопотребление микроконтроллеров STM32G0 в различных режимах

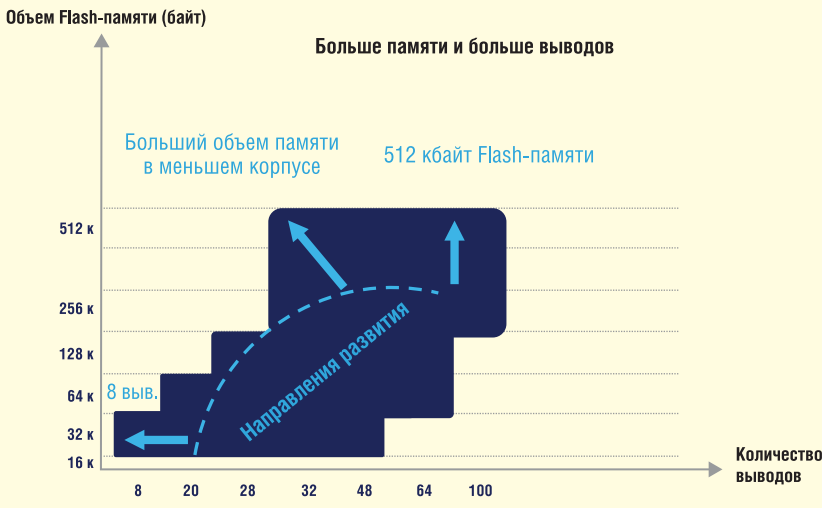


Рис. 6. Направления развития семейства STM32G0

специализированных ассемблерных инструкций. Это привело к ускорению обмена данными и упростило создание приложений, формирующих сигналы программным способом.

АССОРТИМЕНТ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ STM32G0

STM32G0 является динамически развивающимся семейством (рис. 6), поэтому количество микросхем в нем будет увеличиваться. Основные направления его развития ориентированы как на создание масштабных систем, содержащих до 512 кбайт Flash-памяти и выпускающихся в корпусах, содержащих до 100 выводов, так и на изготовление крошечных 8-выводных микроконтроллеров с объемом Flash-памяти, начинающимся от 16 кбайт. На момент написания статьи многие из микроконтроллеров этого семейства уже доступны для приобретения, а остальные модели появятся на рынке в самое ближайшее время (рис. 7).

Компания STMicroelectronics разделяет семейство STM32G0 на две ос-

используются в устройствах, работающих под управлением операционных систем реального времени (RTOS). В этом случае каждому активному приложению выделяется отдельный блок памяти и закрывается доступ к другим, в первую очередь — к сегменту памяти операционной системы. В случае попытки доступа к запрещенной области возникает прерывание, в обработке которого

принимается решение о дальнейшем поведении системы.

Усовершенствования архитектуры затронули и «стандартные» элементы ядра Cortex-M0+. Например, интерфейс ввода-вывода теперь имеет собственное адресное пространство в оперативной памяти, что позволяет обеспечить к нему доступ с помощью обычных указателей C/C++ без использования спе-

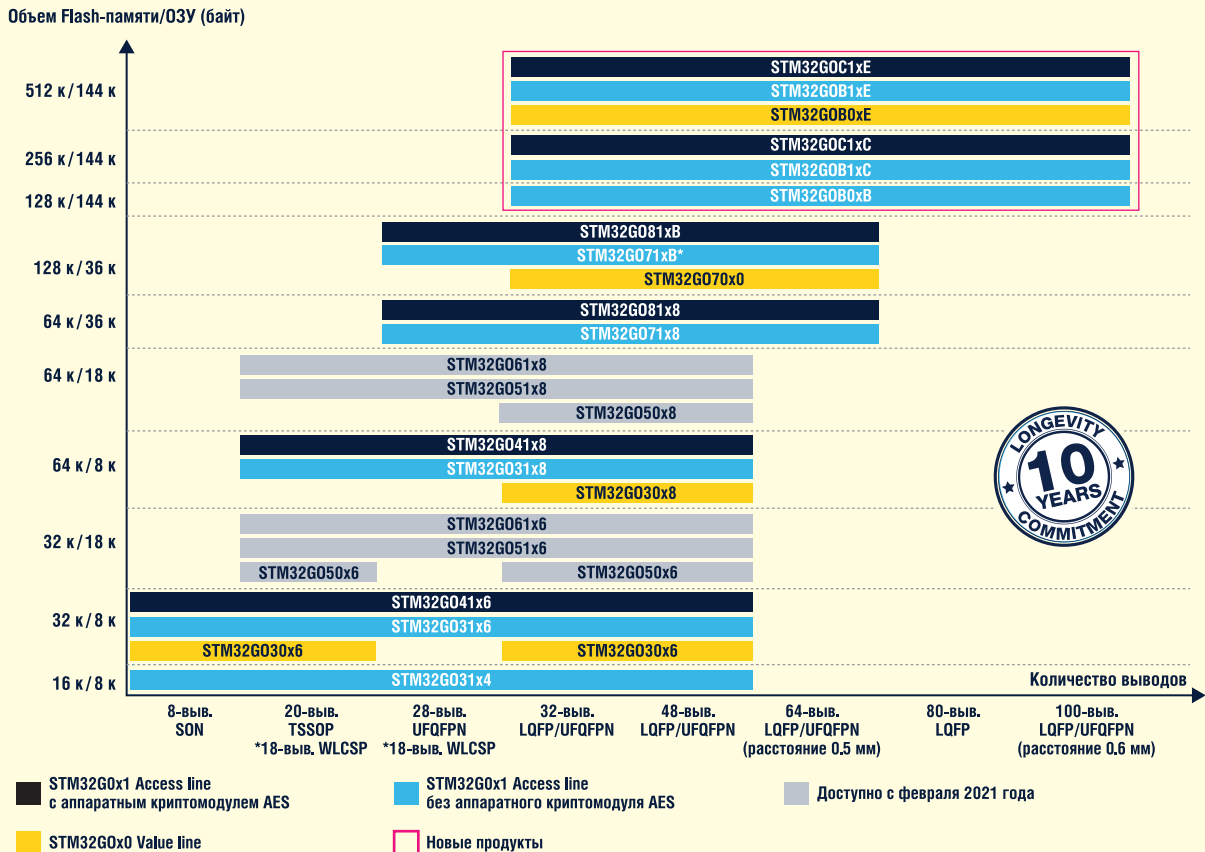


Рис. 7. Состав семейства STM32G0

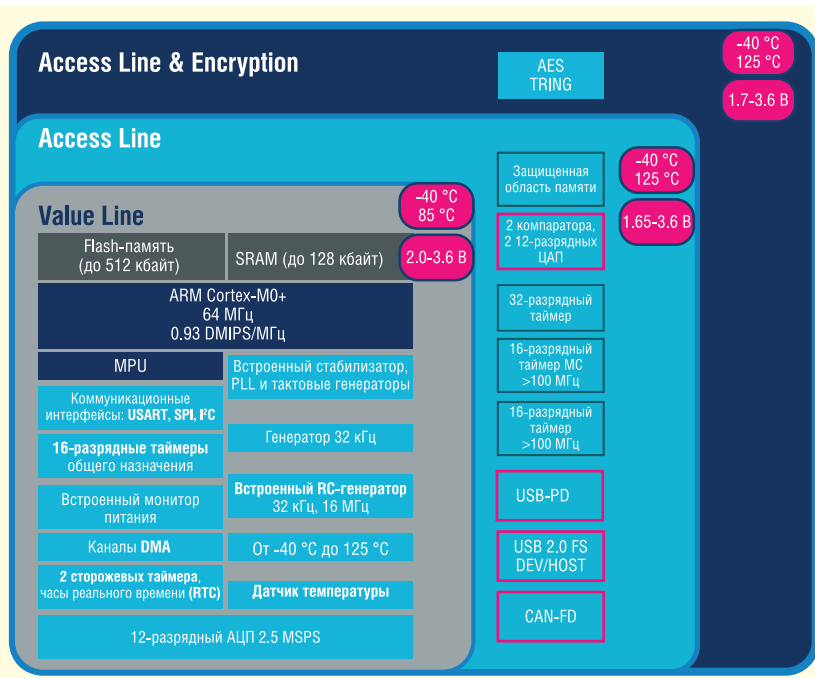


Рис. 8. Линейки семейства STM32G0

имеют отдельную линию для управления аппаратной частью драйверов витых пар, используемых в интерфейсах RS-422/485. Кроме этого некоторые модули USART можно настроить для работы с другими протоколами, в числе которых Modbus, LIN, IrDA SIR ENDEC, Smartcard и SPI (только режим ведомого). В число коммуникационных модулей входят полноценные приемопередатчики SPI (до 32 МГц) и I²C (до 1 МГц), каждый из которых может работать как в режиме ведомого, так и ведущего.

Таким образом, микросхемы «Value Line» можно использовать и в больших, и в малых проектах, не требующих обработки каких-либо специфических сигналов или эксплуатации в жестких условиях. При этом, благодаря наличию высокопроизводительного ядра, они позволяют реализовать достаточно сложные алгоритмы управления, в том числе и создавать приложения на основе операционных систем, работающих в реальном времени. Не следует забывать также и о более низкой цене микроконтроллеров этой линейки, что дает дополнительную выгоду производителю, ведь при выборе микроконтроллеров «Value Line» ему придется меньше переплачивать за неиспользуемые функции.

Линейка «Access Line» имеет расширенный набор функций ядра и большее количество периферийных модулей (табл. 1). Например, микросхемы этого семейства имеют большее количество

новные линейки (рис. 8). Линейка «Value Line» является базовой и содержит ядро Cortex M0+ со стандартным набором периферийных модулей. Микросхемы, относящиеся к этой линейке, могут иметь до 512 кбайт Flash-памяти, до 144 кбайт и ОЗУ и выпускаться в корпусах, содержащих до 100 выводов. Микроконтроллеры «Value Line» могут работать в диапазоне рабочих температур окружающей среды -40...+85 °C, при напряжении питания 2...3.6 В.

Все микросхемы «Value Line» имеют в своем составе 12-разрядный АЦП последовательного приближения, с производительностью, достигающей 2.5 Мвыб/с. С его помощью можно оцифровывать до 19 аналоговых сигналов, три из которых формируются внутренними узлами микроконтроллера (датчик температуры, напряжение батареи и опорное напряжение). Кроме высокой производительности, АЦП имеют возможность гибкой настройки, позволяющей конфигурировать разрядность результатов измерений и уровень энергопотребления. АЦП поддерживают множество режимов работы, в том числе режим цифрового компаратора, формирующего прерывания при достижении измеряемой величины некоторого порогового значения, а также интегратора, накапливающего результаты измерений в ОЗУ, используя для этого каналы DMA.

Для связи микроконтроллеров «Value Line» с другими узлами системы можно

использовать коммуникационные модули, поддерживающие наиболее популярные интерфейсы передачи данных. Например, модули USART, количество которых в некоторых моделях микроконтроллеров может достигать четырех, поддерживают практически все форматы асинхронной и синхронной передачи данных, используемые в интерфейсах RS-232/422/485. Они также

Таблица 1. Основные отличия линеек «Access Line» и «Value Line»		
	«Value Line»	«Access Line»
Диапазон рабочих напряжений	2.0...3.6 В	1.7...3.6 В
Диапазон рабочих температур	-40...+85 °C	-40...+125 °C
Источники сброса системы	POR, PDR	POR, PDR, PVD, BOR
Внутренний высокоскоростной RC-генератор	Некалиброванный, 1%	Калиброванный, 1%
Возможность питания от резервной батареи	Есть	Есть
Возможность подключения внешнего источника опорного напряжения (VREF)	Есть	Есть
12-разрядный ЦАП	Нет	Есть
Аналоговые компараторы	Нет	Есть
Модуль USB-PD	Нет	Есть
Модули для криптозащиты (AES + TRNG)	Нет	Только в линейке «Access Line & Encryption»
Режимы энергопотребления	Run, Sleep, Stop, Stand-by	Run, Sleep, Stop, Stand-by, Shutdown, Vbat
Малопотребляющий приемопередатчик UART (LP UART)	Нет	Есть
Малопотребляющий таймер (LP Timer)	Нет	Есть
32-разрядный таймер	Нет	Есть
Максимальная частота таймеров TIM и TIM15	Частота тактового генератора	Удвоенная частота тактового генератора
Наличие защищенной области Flash-памяти	Нет	Есть
Корпус	SO8, TSSOP20, LQFP32, LQFP48, LQFP64, LQFP100	SO8, TSSOP20, QFN28, LQFP32, QFN32, LQFP48, QFN48, LQFP64, LQFP100, BGA, WLCS

Тип	Название	Разрядность, бит	Максимальная тактовая частота, МГц	Количество каналов
С расширенными функциями (Advanced-Control Timer)	TIM1	16	128	6
	TIM2	32	64	4
Общего назначения (General Purpose Timer)	TIM3	16	64	4
	TIM3	16	64	4
С базовыми функциями (Basic Timers)	TIM6	16	64	0
	TIM7	16	64	0
Общего назначения (General Purpose Timer)	TIM14	16	64	1
	TIM15	16	128	2
	TIM16	16	64	1
	TIM17	16	64	1
Малопотребляющие (Low-Power Timer)	LPTIM1, LPTIM2	16	64	1

таймеров (табл. 2), в числе которых следует особо отметить наличие двух высокоскоростных модулей (TIM1 и TIM15), имеющих в своем составе модуль умножения частоты с фазовой автоподстройкой, позволяющий им работать на частотах, достигающих 128 МГц. Кроме этого, в число периферийных модулей микроконтроллеров «Access Line» входят также два малопотребляющих таймера (LPTIM1 и LPTIM2), которые могут сохранять активность даже в режимах глубокого сна.

Микроконтроллеры «Access Line» могут содержать два 12-разрядных ЦАП, которые можно синхронизировать друг с другом и запускать не только программно, но и аппаратно с помощью других периферийных модулей. ЦАП поддерживают различные форматы входных данных и способны генерировать треугольные и шумоподобные сигналы без участия ядра. Кроме этого, ЦАП могут работать в особом режиме пониженного энергопотребления (Sample and Hold), в котором выходное напряжение на внешнем или внутреннем конденсаторе вначале генерируется (фаза Sample), а затем лишь поддерживается на заданном уровне (фаза Hold) путем периодической регенерации.

Кроме трех цифровых компараторов, входящих в состав АЦП, микросхемы «Access Line» могут содержать два быстродействующих аналоговых компаратора, которые можно объединить в один блок, тем самым обеспечить «оконное» слежение за уровнем входного сигнала. Источником сигналов для компараторов могут быть как внешние, так и внутренние узлы микроконтроллера. Компараторы имеют возможность настройки величины гистерезиса, а также поддерживают режим работы со «слепой зоной» (Blink Mode), в котором

их работа может быть временно заблокирована с помощью внешних или внутренних сигналов.

Число интерфейсных модулей микроконтроллеров «Access Line» также расширено. Особо следует отметить наличие модуля CAN, соответствующего ISO 11898-1: 2015 (версия 2.0 A, B) и первой версии протокола FD CAN, а также модуля USB-PD, со встроенным контроллером питания (UCPD), соответствующим спецификациям USB

Type-C Rev. 1.2 и USB Power Delivery Rev. 3. Кроме этого все микросхемы «Access Line» имеют отдельный модуль USB-2.0, способный работать как в режиме ведущего (до 8 устройств), так и ведомого с поддержкой функций зарядки аккумуляторов.

Микросхемы «Access Line» могут работать в диапазоне температур $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжений питания $1.65...3.6\text{ В}$ и выпускаются в корпусах с количеством выводов от 8 до 100. Доступ к части Flash-памяти микроконтроллеров линейки «Access Line» (Securable Memory Area) может блокироваться после выполнения кода, содержащегося в ней, до следующей перезагрузки микросхемы. Это позволяет разместить в ней, например, загрузчик операционной системы, прочитав или изменив который с помощью кода приложений будет невозможно.

Часть микроконтроллеров линейки «Access Line» может иметь дополнительные узлы для шифрования данных: криптографический модуль стандарта Advanced Encryption Standard (AES) и аппаратный генератор случайных чисел (True Random Number Generator, TRNG). Компания STMicroelectronics

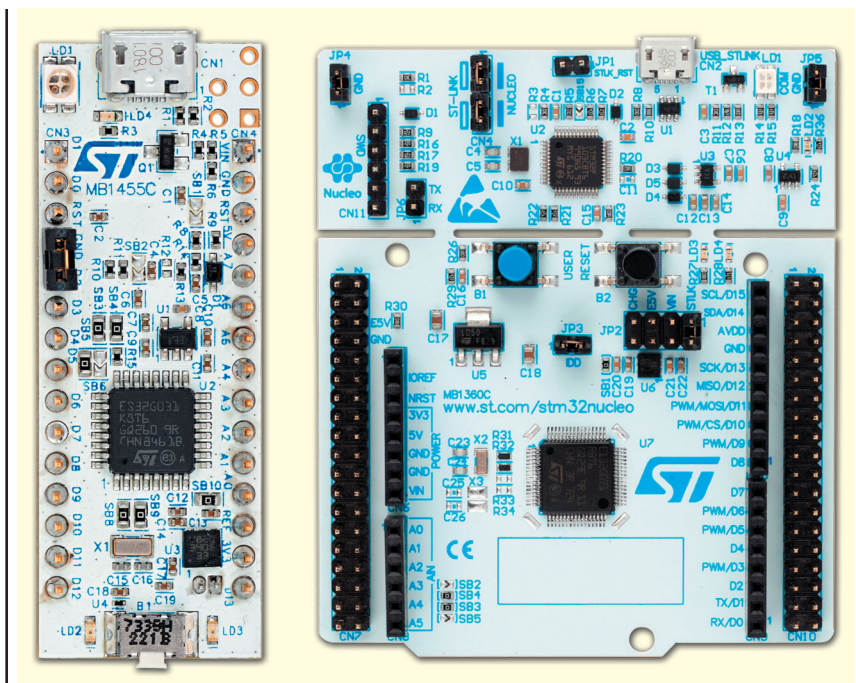


Рис. 9. Отладочные платы NUCLEO

Плата	Микроконтроллер	Количество выводов	Программатор-отладчик
NUCLEO-G031K8	STM32G031K8	32	ST-LINK/V2-1
NUCLEO-G070RB	STM32G070RBT6	64	ST-LINK/V2-1
NUCLEO-G071RB	STM32G071RBT6	64	ST-LINK/V2-1
NUCLEO-G0B1RE	STM32G0B1RET6	64	ST-LINK/V2-1

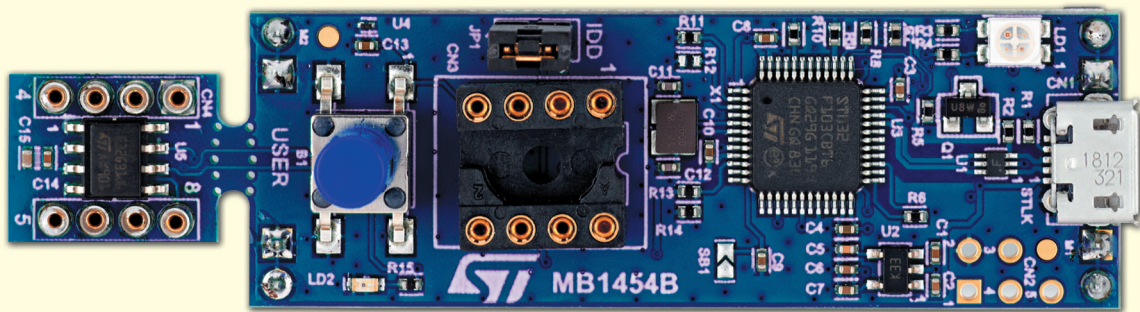


Рис. 10. Отладочный комплект STM32G0316-DISCO

обозначает эту группу как «Access Line & Encryption», не выделяя ее в отдельную линейку. Микроконтроллеры «Access Line & Encryption» предназначены, в первую очередь, для приложений, использующих для передачи данных открытые каналы связи, например, для устройств интернета вещей, связывающихся с центральным сервером с помощью беспроводных интерфейсов Bluetooth или Wi-Fi.

ОТЛАДНЫЕ СРЕДСТВА

Несмотря на то, что микроконтроллеры STM32G0 имеют высокий уровень интеграции и требуют для своей работы минимального количества внешних компонентов, реализация при-

ложений «с нуля» на их основе может занять достаточно длительное время, особенно при использовании корпусов, «неудобных» для ручного макетирования, например, BGA. Поэтому для оперативной оценки возможностей этих микроконтроллеров рекомендуется использовать специализированные отладочные платы.

Для быстрого создания прототипов наилучшим образом подходят платы NUCLEO (рис. 9), содержащие, кроме микроконтроллера со всеми необходимыми сопутствующими компонентами, еще и программатор-отладчик ST-LINK. Имея минимальный набор радиоэлементов и разъем, обеспечивающий доступ практически ко всем выводам микроконтроллера, платы NUCLEO могут

быть быстро интегрированы в разрабатываемое оборудование, что позволяет быстро сконцентрировать внимание на реализации прикладных функций, не отвлекаясь на стандартные задачи. Кроме того, платы NUCLEO поддерживают популярную платформу Arduino, что позволяет дополнительно расширить сферу их практического использования.

Компания STMicroelectronics предлагает достаточно большое количество плат NUCLEO на основе микроконтроллеров с количеством выводов от 32 до 144, однако только четыре из них содержат микроконтроллеры серии STM32G0 (табл. 3). Следует отметить, что все платы NUCLEO поддерживаются большинством интегрированных сред для разработки программного обеспечения, а на сайте STMicroelectronics можно найти достаточно большое количество примеров готового исходного кода для этих плат.

Отладочные платы NUCLEO являются универсальными и больше подходят для прикладных задач. Фактически применение плат NUCLEO только освобождает разработчика от решения стандартных вопросов, связанных с разводкой печатной платы и обеспечением необходимых электрических режимов микроконтроллера. В то же время существует ряд задач, направленных на изучение какой-либо одной функции. В этом случае следует обратить внимание на специализированные отладочные наборы (Discovery Kits), содержащие все необходимые компоненты для изучения этого вопроса.

Компания STMicroelectronics в рамках поддержки микроконтроллеров STM32G0 предлагает два отладочных набора: STM32G0316-DISCO и STM32G071B-DISCO. Оценочная плата STM32G0316-DISCO на основе 8-выводного микроконтроллера STM32G031J6 (рис. 10) предназначена для изучения его возможностей. Особенностью этого продукта является монтаж микроконтроллера на отдельной плате, установ-



Рис. 11. Отладочный комплект STM32G071B-DISCO

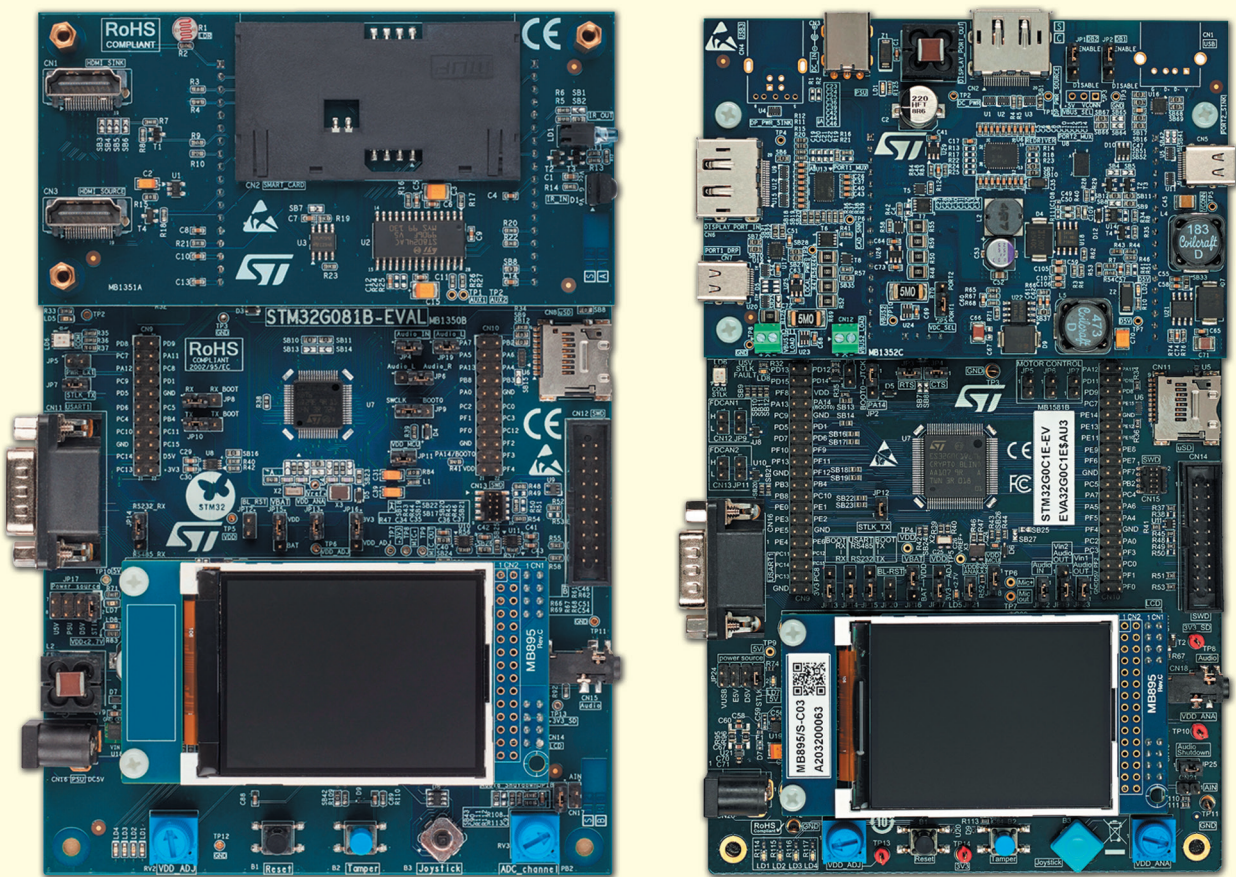


Рис. 12. Оценочные платы STM32G081B-EVAL (слева) и STM32G0C1E-EV (справа)

ливаемой в стандартный разъем DIP8. Это позволяет потом перенести запрограммированный контроллер в конечное устройство и проверить работу разработанного программного обеспечения в реальных условиях. Кроме элементов, необходимых для работы микроконтроллера, на плате также установлен программатор-отладчик ST-LINK/V2-1, подключаемый к компьютеру с помощью разъема Micro-USB.

Плата STM32G071B-DISCO на основе микроконтроллера STM32G071RB (рис. 11) предназначена для создания приложений, использующих порт USB Type-C. С помощью данной платы можно разрабатывать устройства, поддерживающие разные роли в разрезе как передаваемых данных, так и питания, а с помощью встроенных инструментов можно контролировать напряжение питающей шины и ток, потребляемый от порта. Все необходимая информация о состоянии системы может быть отображена с помощью специализированного программного обеспечения STM32CubeMonUCPD. Кроме этого, на сайте STMicroelectronics присутствуют примеры готового кода, позволяю-

щего реализовать основные функции этого порта.

Быстрее всего оценить возможности микроконтроллеров STM32G0 можно только с помощью полнофункциональных оценочных плат STM32G081B-EVAL и STM32G0C1E-EV (рис. 12) на основе микроконтроллеров, соответственно, STM32G081RBT6 и STM32G0C1VET6. Кроме центрального процессора, программатора-отладчика ST-LINK и компонентов, необходимых для общей работы системы, на платах установлены элементы, позволяющие практически сразу оценить все функции, доступные при использовании микроконтроллеров этой модели, в том числе жидкокристаллические дисплеи, джойстики, разъемы для подключения коммуникационных интерфейсов с соответствующими преобразователями уровней, батареи резервного питания, стабилизаторы напряжений и многие другие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бюджетные 32-разрядные микроконтроллеры семейства STM32F0 с

момента своего появления оказались серьезными конкурентами для традиционных 8-ми и 16-разрядных решений, а после появления их модернизированных версий эта борьба еще больше обострится. Немаловажное значение имеет тот факт, что микросхемы STM32G0 уже сейчас являются дешевле, компактней и быстрее многих своих аналогов. И если последующая замена STM32F0 на более производительные версии для компании STMicroelectronics является естественным эволюционным процессом, то для конкурирующих решений это может оказаться весомым аргументом для пересмотра ассортимента выпускаемой продукции.

Более детальную информацию о продукции компании STMicroelectronics можно получить, обратившись к официальному дистрибьютору в Украине — компании Мастек Электроникс ЛТД:

г. Киев, пер. Радищева, 3,
оф. 307,
тел. +38 (044) 451-60-80,
моб. +38 (067) 919-51-15,
info@mastek.com.ua,
www.mastek.com.ua