**10. Схема тактирования**

Почти каждая цифровая схема должна определённым образом синхронизировать свои внутренние элементы или синхронизироваться с другими схемами. Источник тактирования - это устройство, которое генерирует периодические сигналы, и это самый распространенный вид источника *сердцебиения* в цифровой электронике.

Один и тот же тактовый сигнал, однако, не может быть использован для тактирования всех компонентов и периферии, входящих в состав современных микроконтроллеров, таких как STM32. Более того потребление энергии является критическим аспектом, напрямую связанным с частотой тактирования имеющихся периферийных устройств. Возможность выборочного отключения или уменьшения частоты для некоторых частей микроконтроллера позволяет оптимизировать энергопотребление всего устройства. Всё это требует иерархической структуры в организации тактирования, позволяющей разработчику выбирать различные частоты и источники тактирования.

Глава представляет краткое введение в составную сеть распределения тактирования микроконтроллеров STM32. Она предназначена, чтобы обеспечить читателя необходимым инструментарием для понимания и использования схемы тактирования, отображающей основные функции модуля HAL\_RCC. Тема главы будет дополнена в одной из <a>следующих глав</a>, посвящённой управлению энергообеспечением.

**10.1 Распределение тактирования**

Источник тактирования - это устройство, которое обычно генерирует прямоугольный сигнал с коэффициентом заполнения, равным 50%, как показано на **Рисунке 1**1.

**Рисунок 1: Обычный тактовый сигнал с коэффициентом заполнения 50%**

Тактовый сигнал колеблется между уровнями напряжения VL и VH, которые для микроконтроллеров STM32 зависят от напряжения питания VDD. Самым главным параметром татирования является частота, которая показывает как много раз напряжение переходит от VL к VH за секунду. Частота выражается в герцах.

Все микроконтроллеры STM32 могут быть тактированы одним из двух источников: внутренней RC-цепью2 (названной высокочастотной внутренней (HSI)) или внешним предназначенным для этого кварцевым генератором3 (названным высокочастотным внешним (HSE)). Есть несколько причин, по которым внешний кварцевый генератор предпочтительнее внутренней RC-цепи:

* Внешний кварцевый генератор позволяет достичь более высокой точности по сравнению с внутренней RC-цепью, погрешность которой оценивается в 1%4, в особенности, когда рабочая температура печатной платы далека от температуры окружающей среды в 25 C.
* -Некоторые периферийные устройства, особенно высокоскоростные, могут тактироваться только за счёт подходящего кварцевого генератора, работающего на необходимой частоте.

Вместе с высокочастотным генератором5 может быть использован другой источник тактового сигнала, подключаемый к низкочастотному генератору, который в свою очередь может получать импульсы от внешнего генератора (названного низкочастотным внешним (LSE)) или от внутренней RC-цепи (названной низкочастотной внутренней (LSI)). Низкочастотный генератор используется, чтобы приводить в действие такие периферийные устройства, как часы реального времени (RTC) и независимый сторожевой таймер (IWDT).

Частота высокочастотного генератора не передаётся напрямую ни на ядро Cortex-M, ни на периферию. Составная сеть распределения, так же называемая схемой тактирования, ответственна за распостранение тактового сигнала внутри микроконтроллеров STM32. С использованием нескольких программируемых блоков фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, PLL) и предделителей, при необходимости, возможно повышать или понижать частоту источника (см. **Рисунок 2**) в зависимости от производительности, которую требуется достичь, максимальной частоты для периферии или шины и общего энергопотребления6.

**Рисунок 2: Как повышается и понижается частота источника тактового сигнала за счёт использования блоков ФАПЧ (PLLs) и предделителей**

**10.1.1 Обзор схемы тактирования STM32**

Схема тактирования микроконтроллера STM32 может иметь достаточно сложную составную структуру. Даже в более "простом" микроконтроллере STM32F0 внутренняя сеть тактирования может иметь до четырёх уровней ФАПЧ/предделителей, и мультиплексор системного тактового сигнала (System Clock Multiplexor, так же известный как переключатель системного тактового сигнала - System Clock Switch (SW)) может получать сигнал от различных источников.

**Таблица 1: Максимальные тактовые частоты для шин AHB, APB1 и APB2 микроконтроллера, установленного на всех отладочных платах Nucleo**

Кроме того глубокое объяснение схемы тактирования для всех семейств STM32 является сложной задачей, которая так же требует, чтобы мы обратили наше внимание на конкретные числа в названии микроконтроллеров. В основном, структура схемы тактирования зависит от следующих ключевых факторов:

* Основное семейство микроконтроллера STM32. Например, все микроконтроллеры STM32F0 имеют только одну периферийную шину (APB1), которая может тактироваться от той же максимальной частоты, что и ядро Cortex-M. Другие микроконтроллеры STM32 обычно имеют две периферийных шины, и только одна из них (APB2) может достигать максимальной частоты процессора. Напротив, ни одна из периферийных шин, доступных на микроконтроллере STM32F7, не способна достичь максимальной частоты ядра7. В **Таблице 1** указаны максимальные тактовые частоты для шин AHB, APB1 и APB2 (с относительной частотой тактирования таймеров) микроконтроллеров, установленных на всех отладочных платах Nucleo. Вы можете заметить, что для некоторых микроконтроллеров STM32, максимальной частоты можно достичь только с использованием внешнего высокочастотного (HSE) генератора.
* Тип и количество периферийных устройств, предоставляемых микроконтроллером. Сложность схемы тактирования повышается с количеством доступной периферии. Более того, некоторые периферийные устройства требуют только определённых источников тактового сигнала и частот, что влияет на количество ступеней PLL.
* Вид поставки и корпус микроконтроллера, которые определяют тип и количество установленной периферии.

Даже если ограничиться рассмотрением шестнадцати микроконтроллеров, установленных на отладочных платах Nucleo, их изучение потребует долгой и утомительной работы, для которой необходимо глубокое понимание всей периферии, установленной на изучаемых микроконтроллерах. По этой причине, мы дадим краткое описание схемы тактирования STM32, оставляя за читателем возможность более глубокого изучения интересующего его микроконтроллера. К тому же, как мы скоро увидим, благодаря CubeMX можно абстрагироваться от особенностей конкретной реализации схемы тактирования, кроме случаев, когда необходимо иметь дело с индивидуальными конфигурациями PLL для оптимизации производительности или потребления энергии.

**Рисунок 3: Схема тактирования микроконтроллера STM32F030R8**

**Рисунок 3** показывает схему тактирования одного из простейших микроконтроллеров STM32 - STM32F030R8.

Этот рисунок взят из соответствующего <a>справочного руководства</a>8, предоставляемого ST. Для многих новичков в платформе STM32 эта иллюстрация будет совершенно не понятна и сложна для разбора, в особенности, если они так же не работали раньше с микроконтроллерами. Красным цветом обведён наиболее важный путь, который идёт от HSI генератора к ядру Cortex-M0, шине AHB и DMA. Это путь, который мы будем втихую использовать, не вникая в его возможные конфигурации. Позвольте представить наиболее значимые элементы в этом пути.

Путь начинается с внутреннего генератора на 8МГц. Как упоминалось ранее, это RC генератор, имеющий от ST заводскую калибровку на погрешность до 1% для температуры окружающей среды в 25 С. Далее источник тактов HSI может быть подключен к источнику системного тактового сигнала (SW) как есть (путь выделен синим цветом на **Рисунке 3**) или к PLL умножителю, после того как частота поделена на два с помощью промежуточного предделителя9. Таким образом главный PLL может умножать тактовый сигнал частотой 4МГц на значение вплоть до 12-ти, в результате чего получается максимальная системная тактовая частота (SYSCLK), равная 48МГц. Источник SYSCLK может быть использован, чтобы тактировать предделитель периферии I2C1 (как альтернатива для HSI) и другие промежуточные предделители, предделитель AHB, который может быть использован, чтобы понизить высокоскоростной тактовый сигнал (HCLK), в свою очередь подводимый к шине AHB, ядру и системному таймеру (*SysTimer*).

?

**Зачем так много промежуточных уровней PLL/предделителей?**

Как говорилось ранее, тактовая частота определяет общую производительность, но так же влияет на полное потребление всего микроконтроллера. Возможность выборочного включения или сокращения тактовой частоты у некоторых частей микроконтроллера позволяет сократить потребление энергии для эффективности вычислений. Как мы увидим в <a>грядущей главе</a>, L0/1/4 микроконтроллеры могут иметь даже больше ступеней PLL/предделителей, чтобы дать разработчику больше контроля над потреблением микроконтроллера. Вместе с надлежащим проектированием устройства, это позволяет создавать устройства с батарейным питанием, которые могут на протяжении лет работать на одной батарейке.

Конфигурирование схемы тактирования выполняется с помощью специальной периферии, называемой контроль сброса и тактирования (RCC), и осуществляется в три шага:

1. Выбирается источник высокочастотного генератора (HSI или HSE) и конфигурируется соответствующим образом, если используется HSE.
2. Если мы хотим подать на SYSCLK частоту более высокую, чем та, которую даёт высокочастотный генератор, тогда нам необходимо сконфигурировать главный PLL (который создайт сигнал PLLCLK). Иначе пропускаем этот шаг.
3. Переключатель системного тактового сигнала (SW) конфигурируется выбором правильного источника тактового сигнала (HSI, HSE или PLLCLK). Затем мы задаём правильные настройки для предделителей AHB, APB1 и APB2 (если доступно), чтобы достичь желаемой частоты High-speed clock (HCLK - это сигнал, которы подводится к ядру, DMAs и шине AHB), и частот шин Advanced peripheral bus 1 (APB1) и APB2 (если доступно).

Выяснение приемлемых значений для PLL и предделителей может оказаться кошмаром, в особенности для более сложных микроконтроллеров STM32. Только некоторые комбинации годятся для конкретного микроконтроллера, и неправильная конфигурация потенциально может повредить микроконтроллер или, по-крайней мере, послужить причиной отказов (неправильная конфигурация тактирования может приводить к аномальному поведению, страннным и не предсказуемым сбросам и т. п.). К нашему счастью, Инженеры STM32 подарили нам прекрасный инструмент, чтобы упростить конфигурацию тактирования: CubeMX.

**10.1.1.1 Многочастотный внутренний RC генератор в семействе STM32L**

Источник тактов и его сеть оказывают ощутимое влияние на общее потребление энергии микроконтроллера. Если для SYSCLK требуется частота больше или меньше, чем у внутреннего источника HSI (у которого она равна 8МГц для большинства микроконтроллеров STM32 и 16МГц для некоторых других), то нам надо увеличить/уменьшить её, используя мультиплексор ФАПЧ (PLL Source Mux) и промежуточные предделители. К сожалению, эти компоненты потребляют энергию, и это может оказать не желательное влияние для устройств, работающих на батарейке.

**Таблица 2:** Сравнение источников тактирования в микроконтроллере STM32L476

Микроконтроллеры STM32L0/1/4 специально спроектированны для применения с низким энергопотрблением, что достигается за счёт специального внутреннего источника тактов, названного Многочастотным внутренним (Multispeed Internal, MSI) RC генератором. MSI - это энергоэффективный RC генератор с установленной на заводе погрешностью ±1% при 25 C, которая может увеличиваться до ±3% в диапозоне темератур 0 - 85 C. Главная характеристика MSI заключается в том, что он поддерживает до двенадцати раных частот без необходимости добавлять внешние компоненты. Например, MSI в STM32F476 обеспечивает внутренний источник тактов со значением в диапозоне от 100КГц до 48МГц. MSI используется как SYSCLK при перезагрузке от Reset, пробуждении из режимов ожидания (Standby) и неисправности (Shutdown). После перезагрузки от Reset, частота MSI установленна по-умолчанию (например, для МК STM32F476 частота по-умолчанию равна 4МГц). В Таблице 2 описаны наиболее важные характеристики всех возможных источников тактирования у МК STM32F476. Как можно видеть, лучше потребление энергии достигается, когда микроконтроллер получает тактовый сигнал от MSI (без использования умножителя PLL). Кроме того, этот источник тактов гарантирует более короткое время запуска, в сравнении с HSI. Интересным наблюдением является, что требуется до двух секунд, чтобы стабилизировать источник LSE. Если время запуска является важным для вашей задачи, то стоит рассмотреть вариант использования отдельного потока для запуска LSE.

Помимо преимуществ, свзязанных с потреблением энергии, когда MSI используется как источник для мультиплексора ФАПЧ (PLL Source Mux) вместе с LSE, в результате получается очень точный источник тактов. Он может быть использован устройством USB OTG FS без использования специального внешнего кварца. При этом сигнал от источника, попадая на главный главный блок PLL, позволяет системе работать на максимальной частоте в 80МГц.

---

1 Важно отметить, что прямоугольный сигнал, представленный на рисунке 1 "идеален". Настоящий прямоугольный сигнал источника тактирования имеет трапециевидную форму.

2http://bit.ly/1TkDnUd

3http://bit.ly/20ymjJx

4Погрешность в 1% может показаться хорошим компромисом, особенно учитывая, что вы можете сэкономить место на печатной плате и цену за счёт кварцевого генератора, который стоит пренебрежимо мало. Однако в критичных по временной точности задачах, 1% может являться огромным сдвигом. Например, день состоит из 86 400 секунд. Ошибка в 1% означает, что в худшем случае мы можем потерять (или получить лишние) до 864-х секунд, равных 14,4-м минутам! Ситуация может ухудшится, если повысится температура. Это причина, по которой обязательно использовать внешний низкочастотный генератор, если вы собираетесь использовать Часы реального времени (RTC). Однако, способ повысить точность существует. Подробней об этом <a>в дальнейшем</a>.

5В этой книге мы будем определять высокочастотный генератор, как "абстрактный" источник тактового сигнала, который содержит один из двух взаимоисключающих "реальных" источников: высокочастотный внешний (HSE) или высокочастотный внутренний (HSI) генератор. То же самое относится к низкочастотному генератору.

6Помните, что потребление энергии микроконтроллера, почти линейно к его тактовой частоте. Чем выше частота, тем больше энергии он потребляет.

7За исключением таймеров на шине APB2 (по-крайней мере во время написания этой главы - Февраль 2016).

8http://bit.ly/1GfS3iC

9Предделитель - это "электронный счётчик", используемый, чтобы уменьшить высокие частоты. В данном случе "/2" предделитель сокращает главную частоту 8МГц до 4МГц

10Иногда ST определяет RCC в своих документах, как "периферийное устройство". Иногда нет. Я не знаю правильно ли считать его периферией, поэтому дам определение так же, как это делает ST. Иногда да, иногда нет.

11В микроконтроллерах STM32L0/1/4 к SYSCLK так же может брать тактовый сигнал от другого специального источника с низким энергопотреблением, называемого MSI. Мы поговорим об этом источнике тактового сигнала позже.RB-8V7