

Исследование формы сигналов интерфейса SPI с выводами в режиме открытого стока

М.В. Трубин, А.В. Суменков, В.Г. Трубин

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: В процессе разработки электронных систем часто возникает необходимость сопряжения устройств с разным уровнем логической единицы. В статье рассмотрен один из способов сопряжения таких устройств, а именно использование режима «Открытый сток» с внешними подтягивающими резисторами на примере отладочной платы *STM32VLDISCOVERY* и светодиодной индикации с драйвером *MAX7219*. Рассмотрены такие важные моменты как паразитная ёмкость и постоянная времени, показано влияние частоты тактирования SPI и сопротивления подтягивающего резистора на качество передачи данных. Предложена рекомендация к выбору оптимального сопротивления подтягивающего резистора. Также рассмотрены факторы, влияющие на формирование сигнала в линии SPI с использованием режима «Открытый сток», такие как паразитная ёмкость, сопротивление подтягивающего резистора, частота сигнала. Также рассмотрены сопутствующие им параметры, такие как постоянная времени, форма фронта, скорость нарастания сигнала, тактирование микроконтроллера и подсистемы SPI. Предложены рекомендации для поиска и устранения негативных последствий, которые могут возникнуть при сопряжении двух устройств в режиме «Открытый сток».

Ключевые слова: сопряжение устройств, SPI, MAX7219, STM32, STM32VLDISCOVERY, открытый сток, подтягивающий резистор, паразитная ёмкость, постоянная времени, дерево тактирования, схема тактирования

ВВЕДЕНИЕ

Сопряжение устройств между собой является одной из важных задач в проектировании электронных систем. Устройства могут работать на разных принципах передачи данных, разных частотах, разных логических уровнях – отличий может быть множество. Для взаимодействия устройств между собой были созданы разные интерфейсы, одним из которых является синхронный последовательный интерфейс передачи данных SPI [1]. Интерфейс SPI позволяет главному устройству (*Master*) взаимодействовать с множеством подчинённых устройств (*Slaves*), используя небольшое количество проводов (от четырёх и более). Но данный интерфейс может работать как на 3.3 В логике, так и на 5 В логике. Чтобы связать два разных логических уровня можно использовать режим «Открытого стока» на выводах устройства с 3.3 В логикой и подтягивающие резисторы к 5 В. Далее рассмотрим подобное решение более подробно. Данный материал является продолжением статьи «Светодиодная индикация на основе микросхемы MAX7219» [2].

1. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

Рассмотрим подключение двух устройств по интерфейсу SPI с разными уровнями логической единицы на примере микроконтроллера *STM32F100* отладочной платы «*STM32VLDISCOVERY*» с уровнем логической единицы 3.3 В и драйвера *MAX7219* для светодиодной матрицы 1088AS с уровнем

логической единицы 5 В. Фотография макета системы приведена на *Рис. 1*.

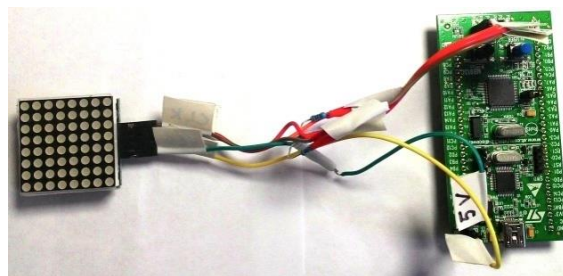


Рис. 1. Макет системы

Микроконтроллер *STM32F100* не способен выдать напряжение больше 3.3 В, а драйвер *MAX7219* не может распознать сигнал логической единицы, напряжением ниже 3.5 В, что указано в документации к драйверу [3], фрагмент которой приведён на *Рис. 2*.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V+ = 5V ±10%, RSET = 9.53kΩ ±1%, TA = TMIN to TMAX)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS
LOGIC INPUTS					
Input Current DIN, CLK, LOAD, CS	I _{IN} , I _{IL}	-1		1	µA
Logic High Input Voltage	V _{IH}	3.5			V
Logic Low Input Voltage	V _{IL}			0.8	V
Output High Voltage	V _{OH}	V+ - 1			V
Output Low Voltage	V _{OL}			0.4	V
Hysteresis Voltage	ΔV _I		1		V

Рис. 2. Электрические характеристики логических уровней *MAX7219*

Для решения этой задачи можно использовать режим «Открытый сток» на

выводах микроконтроллера, и “подтянуть” линии связи через резисторы к 5 В.

Далее приведён рисунок, показывающий работу вывода в режиме открытый сток. Когда транзистор закрыт, в линии связи, за счёт подтягивающего резистора [4], устанавливается логическая единица с уровнем напряжения 5 В. Когда транзистор открывается, напряжение в линии “притягивается” к нулю.

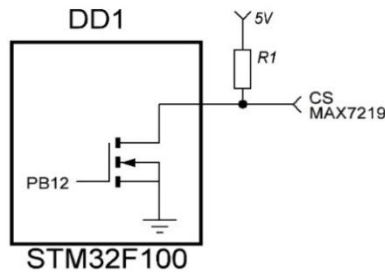


Рис. 3. Вывод в режиме “Открытый сток”

Схема с подтягивающими резисторами показана на Рис. 4.

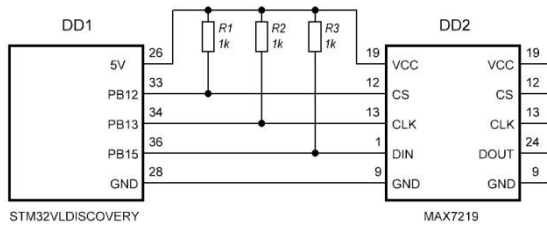


Рис. 4. Схема с подтягивающими резисторами

Стоит отметить, что данное решение можно использовать не всегда, так как выводы микроконтроллера должны выдерживать напряжение 5 В. В документации на микроконтроллер [5] есть таблица назначений и возможностей настройки выводов, фрагмент которой показан на Рис. 5.

Low & medium-density STM32F100xx pin definitions

Pins				Pin name	Type ⁽¹⁾	I / O level ⁽²⁾	Main function ⁽³⁾ (after reset)	Alternate functions
LQFP100	LQFP64	TFBGA64	LQFP48					Default
51	33	H8	25	PB12	I/O	FT	PB12	SPI2_NSS ⁽¹⁰⁾ / I2C2_SMBA ⁽⁹⁾ / TIM1_BKIN ⁽¹²⁾ /USART3_CK ⁽¹²⁾
52	34	G8	26	PB13	I/O	FT	PB13	SPI2_SCK ⁽¹⁰⁾ / TIM1_CH1N ⁽¹²⁾ / USART3_CTS ⁽¹²⁾
53	35	F8	27	PB14	I/O	FT	PB14	SPI2_MISO ⁽¹⁰⁾ / TIM1_CH2N ⁽¹²⁾ / USART3_RTS ⁽¹²⁾
54	36	F7	28	PB15	I/O	FT	PB15	SPI2_MOSI ⁽¹⁰⁾ / TIM1_CH3N / TIM15_CH1N ⁽¹²⁾

1. I = input, O = output, S = supply, HiZ = high impedance.
2. FT = 5 V tolerant.

Рис. 5. Фрагмент таблицы назначений выводов

Из Таблицы на Рис. 5 следует, что выводы, задействованные в схеме, имеют параметр FT, который допускает работу с напряжением 5 В.

2. АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Процессы в электротехнике не протекают мгновенно. Это заметно на следующих осциллограммах (Рис. 6-7), на которых приведён один сигнал в разном временном масштабе.

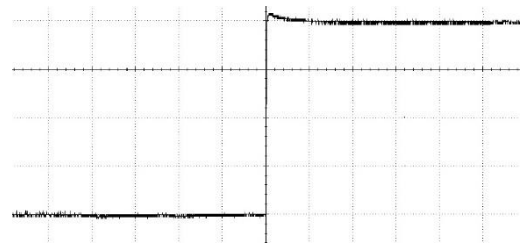


Рис. 6. Фронт тактирующего сигнала, 5 мкс/кл., 1 В/кл

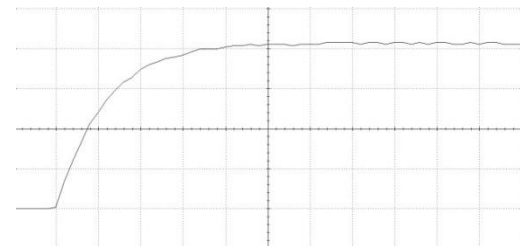


Рис. 7. Фронт тактирующего сигнала, 250 нс/кл., 1 В/кл

На осциллограммах видно, что при увеличении масштаба в 20 раз фронт прямоугольного сигнала принимает вид экспоненциальной функции. Напряжение не может измениться мгновенно. Однако, как и любая другая конечная величина, скорость изменения напряжения может увеличиваться или уменьшаться, в зависимости от ряда параметров, рассмотренных далее.

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАЗИТНОЙ ЁМКОСТИ

Любое электрическое устройство, за счет расположенных в нём электропроводников, обладает небольшой ёмкостью, которую можно обнаружить между выводами. Такую ёмкость называют паразитной, так как она оказывает негативное влияние на переходные процессы.

Паразитные ёмкости отображены на схеме в виде конденсаторов C1, C2, C3.

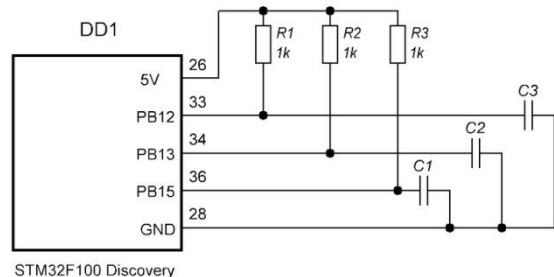


Рис. 8. Схема с паразитными ёмкостями

На полученной схеме видно, что подтягивающие резисторы R1, R2, R3 и паразитные ёмкости C1, C2, C3 образуют

низкочастотные RC-фильтры, которые сглаживают прямоугольный сигнал, превращая его в экспоненциально нарастающий.

Рассчитаем паразитную ёмкость в линии связи с подтягивающим резистором 10 кОм. Сначала определим уровень установившегося напряжения, которое принимается за 100%, на осциллограмме, показанной на Рис. 9. Этому уровню соответствует напряжение 4.4 В. Далее требуется найти значение 63% от установившегося напряжения, 63% от 4.4 В соответствует уровень 2.77 В.

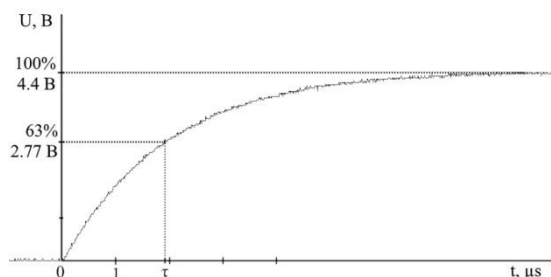


Рис.9. Фронт сигнала

Определим количество времени, за которое сигнал достигает уровня 63%. Согласно осциллограмме это примерно 1.95 мкс.

По формуле $\tau = RC$, в которой τ – постоянная времени, C – паразитная ёмкость, R – сопротивление подтягивающего резистора, высчитаем значение паразитной ёмкости: $C = \tau / R$. Результатом является 195 пФ.

2.2. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ

Применительно к нашему случаю, постоянная времени – это характеристика зарядки паразитной ёмкости, определяющая время, через которое напряжение на этой ёмкости достигнет значения 63,2 % от установившегося значения.

Эта характеристика обозначается буквой τ и рассчитывается по формуле $\tau = RC$. Так же вместо обозначений 1τ , 3τ , 5τ можно встретить $1RC$, $3RC$ и $5RC$ – эти обозначения равнозначны.

Временные промежутки, равные 1τ , 3τ и 5τ показывают время, за которое ёмкость зарядится на 63%, 95% и 99% соответственно.

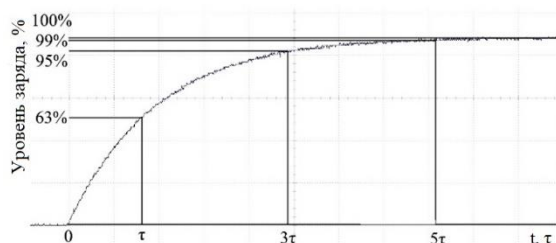


Рис. 10. Зависимость уровня заряда от τ

Стоит отметить, что переходный процесс практически заканчивается за время 5τ .

Повлиять на паразитную ёмкость в устройстве практически невозможно. Однако,

возможно ускорить заряд «конденсатора» паразитной ёмкости более высоким током. Это можно сделать, уменьшив сопротивление подтягивающих резисторов.

2.3. ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДТЯГИВАЮЩЕГО РЕЗИСТОРА

С помощью подтягивающих резисторов можно изменить скорость зарядки паразитной ёмкости. По закону Ома для участка цепи: $I = U / R$ – чем меньше сопротивление, тем больше ток заряда, и меньше длительность переходного процесса.

Однако увеличить ток можно только до определённой величины, описанной в документации на контроллер в пункте «*Electrical characteristics*», в подпункте «*Absolute maximum ratings*», фрагмент которого приведён на Рис. 11.

Electrical characteristics STM32F100x

Table 6. Current characteristics

Symbol	Ratings	Max.	Unit
I_{VDD}	Total current into V_{DD}/V_{DDA} power lines (source) ⁽¹⁾	150	mA
I_{VSS}	Total current out of V_{SS} ground lines (sink) ⁽¹⁾	150	
I_{IO}	Output current sunk by any I/O and control pin	25	
	Output current source by any I/Os and control pin	-25	
$I_{IN(PIN)}^{(2)}$	Injected current on five volt tolerant pins ⁽³⁾	-5 / +0	
	Injected current on any other pin ⁽⁴⁾	± 5	
$\Sigma I_{IN(PIN)}$	Total injected current (sum of all I/O and control pins) ⁽⁵⁾	± 25	

Рис. 11. Таблица с максимальными значениями тока

Исходя из данной таблицы максимальное значение тока для вывода $I_{io} = 25$ mA. Но это не значит, что через каждый вывод можно пустить ток 25 mA, так как существует значение I_{vss} , которое устанавливает суммарное ограничение по току в 150 mA на все выводы. Это значит, что одновременно можно использовать только, например, 6 выводов с током 25 mA или 15 выводов с током 10 mA.

Согласно этим параметрам минимально возможное сопротивление для подтягивающих резисторов 200 Ом. При таком сопротивлении ток не превысит 25 mA.

Рекомендуется рассчитывать режим работы устройства с запасом в 20%-30% от максимально допустимых параметров. То есть, если в документации установлено ограничение на 25 mA, рекомендуется рассчитывать подтягивающие резисторы так, чтобы ток не превышал 20 mA.

Такой резистор должен обладать сопротивлением не меньше 250 Ом. При этом суммарная нагрузка на корпус при использовании 3-х проводной линии составит 60 mA, что является довольно высоким значением, так как составляет почти половину от общего ограничения I_{vss} , оставляя малый запас для других компонентов, подключенных к микроконтроллеру. При использовании подтяги-

вающих резисторов номиналом 1 кОм, токовая нагрузка на вывод составит 5 мА, а на корпус – 15 мА.

Ниже представлены осциллограммы сигналов при различном значении сопротивления подтягивающих резисторов, при частоте тактирования SPI 62,5 кГц.

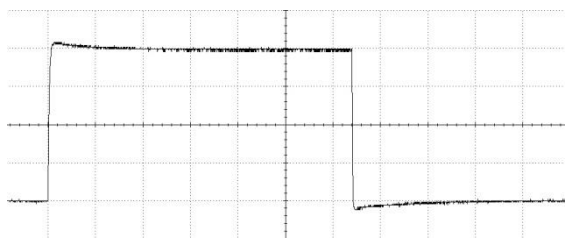


Рис. 12. Резистор 200 Ом, 2,5 мкс/кл., 1 В/кл

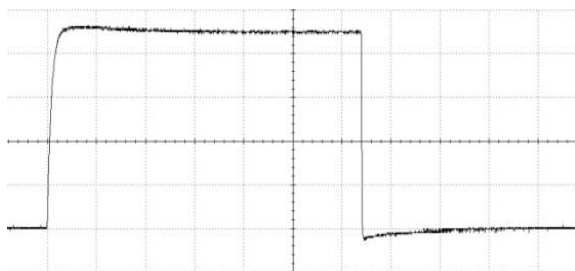


Рис. 13. Резистор 1 кОм, 2,5 мкс/кл., 1 В/кл

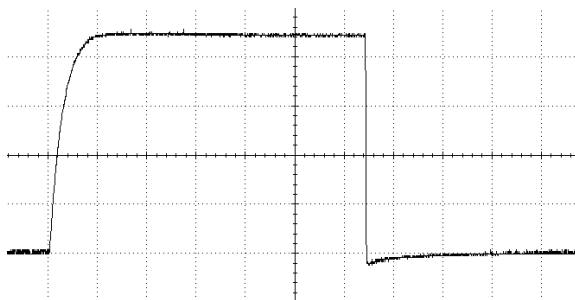


Рис. 14. Резистор 3,3 кОм, 2,5 мкс/кл., 1 В/кл

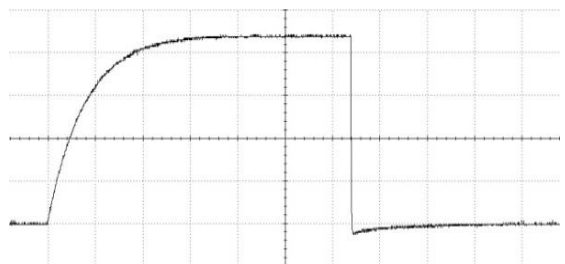


Рис. 15. Резистор 10 кОм, 2,5 мкс/кл., 1 В/кл

Фронт сигнала, представленный на Рис. 12 близок к идеальной форме, однако не стоит забывать, что устройство работает в этом случае в максимально допустимом режиме. Нарастание сигнала в линии с подтягивающим резистором номиналом 1 кОм, представленного на Рис.13 имеет небольшое отклонение от прямоугольной формы, но в отличие от случая с резистором номиналом 200 Ом, потребление тока снижено в 5 раз. В четвертом случае, представленном на Рис. 15, с подтягивающим резистором номиналом 10 кОм, потребление тока уменьша-

ется ещё в 10 раз, но сигнал теряет прямоугольную форму.

2.4. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА

Чем выше частота работы интерфейса – тем выше скорость передачи данных, но из-за влияния паразитной ёмкости сигнал не успевает сформироваться правильно, и передача данных становится невозможной. Если нет возможности изменить постоянную времени, можно уменьшить частоту передачи данных.

В документации на микроконтроллер можно найти “дерево тактирования” (clock tree) [6], согласно которому можно настроить частоту тактирования шины, к которой подключён SPI.

Для нашего случая схема тактирования показана на Рис. 16.

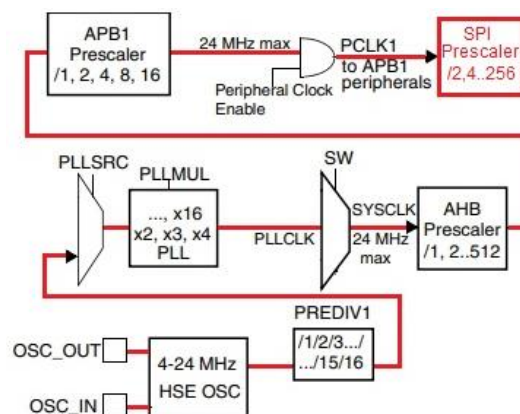


Рис. 16. Схема тактирования подсистемы SPI

Согласно этой схеме проинициализируем микроконтроллер с внешним кварцевым резонатором 8 МГц.

```
void SetSysClockToHSE(void) {
    RCC_DeInit();
    // Сбрасываем регистры RCC (в качестве
    // тактового сигнала устанавливается
    // внутренняя RC-цепочка.
    RCC_HSEConfig(RCC_HSE_ON);
    //Запускаем внешний кварцевый резонатор 8 МГц.
    HSEStartUpStatus = RCC_WaitForHSEStartUp();
    // Ожидаем запуск генератора.
    if (HSEStartUpStatus == SUCCESS) {
        FLASH_PrefetchBufferCmd(FLASH_PrefetchBuffer_Enable);
        // Запускаем буфер для flash-памяти.
        FLASH_SetLatency(FLASH_Latency_0);
        // Устанавливаем задержку для flash в 0 тактов.
        RCC_PLLConfig(RCC_PLLSource_PREDIV1,
        RCC_PLLMul_3);
        RCC_PLLCmd(ENABLE);
        // Включаем множитель частоты PLL, тем самым
        // увеличиваем частоту до 24 МГц.
        while(RCC_GetFlagStatus(RCC_FLAG_PLLRDY) == RESET)
        {}
        // Ожидаем запуск PLL
        // Устанавливаем делители для всех шин
        // равными "1".
        RCC_HCLKConfig(RCC_SYSCLK_Div1);
        // HCLK = SYSCLK.
        RCC_PCLK1Config(RCC_HCLK_Div1);
        // PCLK1 = HCLK
        RCC_PCLK2Config(RCC_HCLK_Div1);
        // PCLK2 = HCLK
    }
}
```

```
RCC_SYSClkConfig(RCC_SYSClkSource_PLLCLK);
while(RCC_GetSYSCLKSource() != 0x08) {};}
// Включаем тактирование системной шины от PLL.
// SYSClk = PLLCLK
else { while (1) { } }
// В случае ошибки перейти в бесконечный цикл.
```

```
*****
// Далее настраиваем делитель в инициализации
SPI
// на 16, тем самым получая 1.5 МГц.
SPI_InitStructure.SPI_BaudRatePrescaler =
SPI_BaudRatePrescaler_16;
```

Изменяя частоту от 1.5 МГц до 162.5 кГц получим сигналы, показанные на Рис. 17 – Рис. 20. Сопротивление подтягивающего резистора 5.1 кОм.

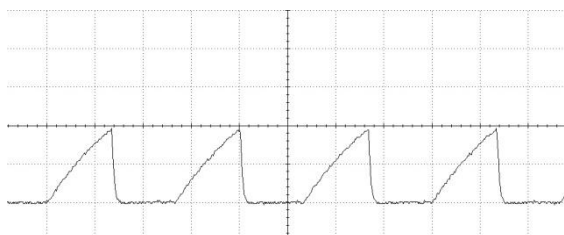


Рис. 17. Частота 1.5 МГц, 500 нс/кл., 1 В/кл

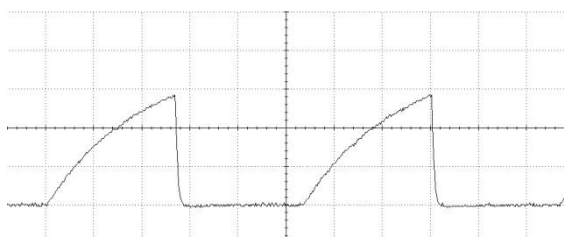


Рис. 18. Частота 750 кГц, 500 нс/кл., 1 В/кл

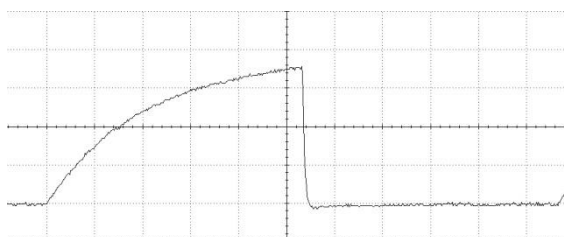


Рис. 19. Частота 325 кГц, 500 нс/кл., 1 В/кл

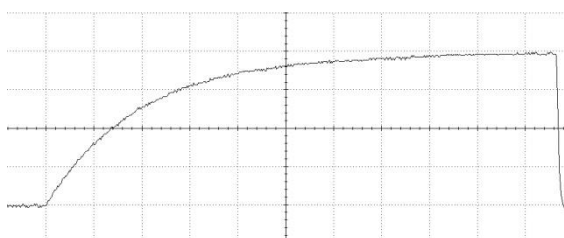


Рис. 20. Частота 162.5 кГц, 500 нс/кл., 1 В/кл

Исходя из полученных осциллограмм, можно сделать вывод, что, при подтягивающем резисторе 5.1 кОм, система будет работать корректно на частотах ниже 162.5 кГц, так как сигнал превышает пороговое напряжение 3.5 В, необходимых для гарантированной работы с драйвером MAX7219.

3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДТЯГИВАЮЩЕГО РЕЗИСТОРА

Если требуется выбрать номинал подтягивающего резистора под определённую частоту тактирования шины SPI, то, уточнив паразитную ёмкость, можно рассчитать оптимальное сопротивление по формуле $1/f = 5RC$, где f – частота тактирования интерфейса SPI, R – сопротивление подтягивающего резистора, C – паразитная ёмкость. Из которой следует $R = 1/(5fC)$.

Например, для частоты тактирования SPI 1 МГц с ёмкостью линии 100 пФ оптимальное сопротивление подтягивающего резистора будет равно 2 кОм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены факторы, влияющие на формирование сигнала в линии SPI с использованием режима «Открытый сток», такие как паразитная ёмкость, сопротивление подтягивающего резистора, частота сигнала. Также рассмотрены сопутствующие им параметры, такие как постоянная времени, форма фронта, скорость нарастания сигнала, тактирование микроконтроллера и подсистемы SPI. Предложены рекомендации для поиска и устранения негативных последствий, которые могут возникнуть при сопряжении двух устройств в режиме «Открытый сток».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Последовательный интерфейс SPI. <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/interface/spi/index.htm>
- [2] Жмудь В.А., Трубин В.Г., Трубин М.В., Суменков А.В. Светодиодная индикация на основе микросхемы MAX7219. Автоматика и программная инженерия 2016 №2(16). С. 86–96. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/АИПИ-2-2016-11.pdf>
- [3] MAX7219 datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7219-MAX7221.pdf>
- [4] Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. С. 23-25. 816 с. ISBN 9785977501620.
- [5] Документация на микроконтроллер STM32F100 STM32F100xC STM32F100xD STM32F100xE. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100vc.pdf>
- [6] Документация на микроконтроллер STM32F100 RM0041 Reference manual. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00246267-stm32f100xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [7] А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. STM32VLDISCOVERY – средство для быстрой разработки опытных образцов цифровых систем управления. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (5). С. 32–39. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).

- [8] STM32VLDISCOVERY – платформа для построения простой системы сбора данных. Лабораторная работа: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь, В. Г. Трубин, А. В. Ескин, А. Л. Печников. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2014. 174 с. ISBN 978-5-7782-2599-2.



Максим Витальевич Трубин – студент 2 курса магистратуры кафедры Автоматики НГТУ.
E-mail: morkai@bk.ru



Алексей Валентинович Суменков – студент 4 курса бакалавриата кафедры Автоматики НГТУ.
E-mail: 79231901577@yandex.ru



Виталий Геннадьевич Трубин – старший преподаватель кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».
E-mail: cpm@ait.cs.nstu.ru

Статья поступила 10.03.2020.

Study of the SPI Waveforms with Open Drain Outputs

M.V. Trubin, A.V. Sumenkov, V.G. Trubin

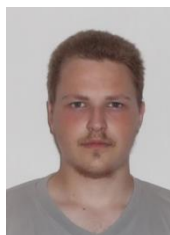
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: In the process of developing electronic systems, it is often necessary to pair devices with different levels of logical units. The article discusses one of the methods for pairing such devices, namely the use of the “Open drain” mode with external pull-up resistors using the STM32VLDISCOVERY debug board and LED indication with the MAX7219 driver as an example. Important points such as stray capacitance and time constant are considered, the influence of the SPI clock frequency and the pull-up resistor resistance on the quality of data transmission is shown. A recommendation is proposed for choosing the optimal resistance of a pull-up resistor. Also considered factors affecting the signal formation in the SPI line using the “Open drain” mode, such as stray capacitance, pull-up resistor resistance, signal frequency. Also, the accompanying parameters, such as the time constant, the shape of the front, the slew rate, clocking of the microcontroller and the SPI subsystem, are examined. Recommendations are proposed for finding and eliminating the negative consequences that may arise when pairing two devices in the “Open drain” mode.

Keywords: device pairing, SPI, MAX7219, STM32, STM32VLDISCOVERY, open drain, pull-up resistor, stray capacitance, time constant, clock tree, clock circuit

REFERENCES

- [1] Posledovatel'nyy interfeys SPI. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/spi/index.htm>
- [2] Zhmud V.A., Trubin V.G., Trubin M.V., Sumenkov A.V. Svetodiodnaya indikatsiya na osnove mikroskhemy MAX7219. Avtomatika i programmaya inzheneriya 2016 №2(16). S. 86–96. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-2-2016-11.pdf>
- [3] MAX7219 datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7219-MAX7221.pdf>
- [4] Ugryumov Ye. P. Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobiye dlya vuzov. SPb.: BKHV-Peterburg, 2010. S. 23-25. 816 s. ISBN 9785977501620.
- [5] Dokumentatsiya na mikrokontroller STM32F100 STM32F100xC STM32F100xD STM32F100xE. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100vc.pdf>
- [6] Dokumentatsiya na mikrokontroller STM32F100 RM0041 Reference manual. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00246267-stm32f100xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [7] A.V. Yeskin, V.A. Zhmud', V.G. Trubin. STM32VLDISCOVERY – sredstvo dlya bystroy razrabotki opytnykh obraztsov tsifrovyykh sistem upravleniya. Avtomatika i programmaya inzheneriya. 2013. № 3 (5). S. 32–39. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossiya).
- [8] STM32VLDISCOVERY – platforma dlya postroyeniya prostoy sistemy sbora dannykh. Laboratornaya rabota: ucheb.-metod. posobiye / V. A. Zhmud', V. G. Trubin, A. V. Yeskin, A. L. Pechnikov. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2014. 174 s. ISBN 978-5-7782-2599-2.



Maxim Vitalievich Trubin - 2nd year student of the Department of Automation, NSTU.
E-mail: morkai@bk.ru



Alexey Valentinovich Sumenkov - 4th year student of the undergraduate department of Automation NSTU.
E-mail: 79231901577@yandex.ru



Vitaliy Gennadievich Trubin -
Senior Lecturer, Department of
Automation, NSTU, Director of KB
Avtomatika LLC.
E-mail: cpm@ait.cs.nstu.ru

The paper has been received on 10/03/2020.