

ТЕСТ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Трапашко И.И., Деменковец Д.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Леванцевич В.А. – ст. преподаватель

В работе приводятся краткие сведения об энергонезависимой памяти микроконтроллеров STM32F103C8T6 и ATmega328P, приведены результаты тестов износоустойчивости, включая коэффициент запаса и описание возникших ошибок. Описан алгоритм уменьшения износа памяти.

Для анализа и тестирования в качестве тестовых экземпляров были выбраны flash-память микроконтроллера STM32F103C8T6 и EEPROM микроконтроллера ATmega328P.

STM32F103C8T6 является 32-разрядным микроконтроллером на основе процессора Arm Cortex M3. Процессор основан на гарвардской архитектуре, что позволяет одновременно выбирать инструкции и выполнять чтение/запись в память. Память программ, данные, регистры и порты ввода-вывода располагаются в одном адресном пространстве размером 4 гигабайта. Области адресного пространства, которым не соответствует физическая память или регистры, помечены как «Зарезервированные» [1]. В качестве энергонезависимой памяти выступает flash-память, в которой хранится код программы. К ней через интерфейс flash-памяти подключена шина инструкций. Микроконтроллер относится к устройствам со средней плотностью памяти, её размер составляет 128 килобайт. Память разделена на 128 страниц размером по 1 кб. После сброса микроконтроллера память доступна только для чтения и заблокирована для записи. Чтобы разблокировать память, необходимо записать определённое значение в регистр управления. Ячейка, в которую производится запись, должна быть предварительно очищена (значение всех бит должно равняться 1). При попытке записать значение в не очищенную ячейку, запись произведена не будет и будет возвращена ошибка «programming error». Очистка памяти производится постранично. Доступ к данным производится блоками по 16 бит. Время записи блока данных размером 16 бит в память составляет от 40 до 70 микросекунд, время очистки страницы – от 20 до 40 миллисекунд. В микроконтроллере отсутствует EEPROM, поэтому для хранения пользовательских данных используется область flash-памяти, не занятую кодом [2]. Тестирование памяти проводилось по алгоритму, изображённому на рисунке 1.

```
РазблокироватьПамять()  
Пока НетОшибкиЗаписи  
  ОчиститьСтраницу()  
  ЗаписатьНовоеЗначение()  
  Если ЗаписаноУспешно  
    ПрочитанноеЗначение = ПрочитатьЗаписанноеЗначение()  
    Если ЗаписанноеЗначение != ПрочитанноеЗначение  
      Ошибка = "Записанное значение не равно прочитанному значению"  
    Иначе  
      Ошибка = "Ошибка программирования памяти"  
    Итерация++  
  ЗabloкироватьПамять()
```

Рисунок 1 – Алгоритм тестирования flash-памяти микроконтроллера STM32F103C8T6

По данным производителя, flash-память STM32F103C8T6 рассчитана на минимум 10 тысяч циклов перезаписи без ошибок [3].

ATmega328P – микроконтроллер на основе 8-разрядного процессора AVR с гарвардской архитектурой. Память микроконтроллера представлена тремя линейными адресными пространствами: память данных, память программ (flash-память) и EEPROM. Размер EEPROM составляет 1 килобайт. Доступ к этой памяти осуществляется с помощью регистров, которые находятся в пространстве данных. Данные передаются по 8-ми разрядной шине данных. EEPROM, в отличие от flash-памяти, не требует очистки перед записью. Память выдерживает 100 тысяч циклов чтения-записи без ошибок. Среднее время записи одного байта в память составляет 3,3 миллисекунды [4]. Тестирование проводилось алгоритму, аналогичному, как и для контроллера STM32F103C8T6, изображённому на рисунке 1.

Были проведены тесты для трёх смежных ячеек памяти контроллеров. Результаты тестов представлены в таблице 2.

В микроконтроллере STM32F103C8T6 ошибка проявилась следующим образом: ячейка памяти не была корректно очищена, из-за чего последующая запись не была выполнена.

Таблица 1 – Результаты тестов энергонезависимой памяти микроконтроллеров.

Микроконтроллер	Тип памяти	Заявленный ресурс, кол-во циклов	Среднее количество циклов до первой ошибки	Коэффициент запаса износоустойчивости
STM32F103C8T6	Flash	10 000	1 411 234	141,1
ATmega328P	EEPROM	100 000	6 531 131	65,3

Ожидаемое значение после очистки: 0xFFFF, фактическое: 0xDFFF. Для микроконтроллера ATmega328P прочитанное значение (0xB3) оказалось не равно записанному значению (0xB2). Для обоих микроконтроллеров последующие ошибки были аналогичны первым.

Количество итераций между последующими ошибками приведено на рисунке 2. По оси x указан порядковый номер ошибки, по оси y – количество успешных циклов чтения-записи после предыдущей ошибки. Для микроконтроллера STM32F103C8T6 среднее количество циклов между ошибками после первой ошибки составило 13, медианное – 4. Для ATmega328P – 825 и 32 соответственно.

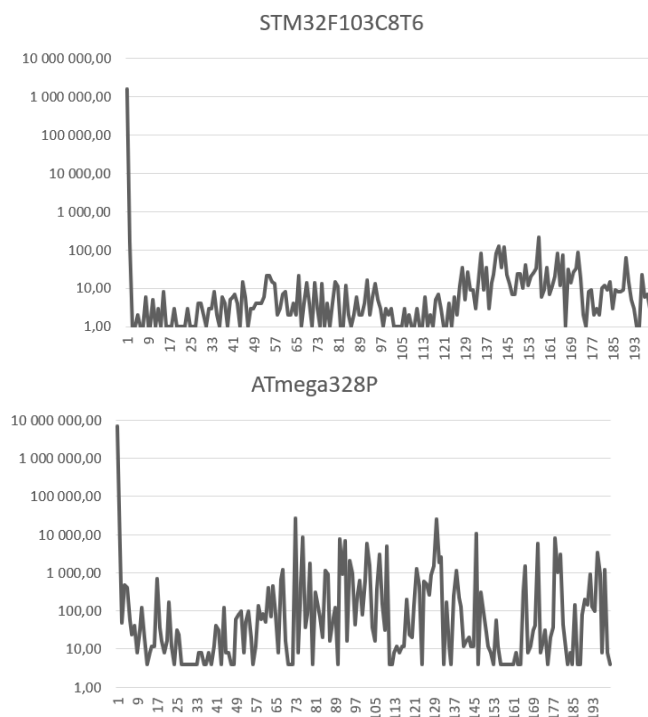


Рисунок 1 – Количество успешных циклов чтения-записи между ошибками

Количество циклов чтения-записи до первой ошибки при тестировании смежных ячеек в обоих микроконтроллерах отличалось не более чем на 5%. Таким образом можно сделать вывод, что износ ячейки памяти не оказывает влияния на смежные ячейки.

Поскольку flash-память не позволяет изменять значение отдельных элементов без предварительной очистки страницы, её нельзя напрямую использовать как EEPROM. Существует алгоритм, позволяющий эмулировать работу EEPROM. Алгоритм основан на использовании как минимум двух физических страниц. Рядом с каждым 16-битным словом хранится его виртуальный адрес. Когда приходит запрос на изменение записанного значения, новое значение записывается в следующую свободную ячейку, сохраняя свой виртуальный адрес, но изменяя физический. Таким образом, происходит накопление истории изменений значения, и чтобы узнать значение переменной по определённому виртуальному адресу, необходимо найти последнюю запись с заданным адресом. Когда страница заполняется, производится копирование данных во вторую страницу с сохранением только актуальных значений переменных. После этого первая страница очищается. При заполнении второй страницы данные копируются в первую, вторая страница очищается и цикл продолжается [5].

Одно из преимуществ данного алгоритма состоит в том, что он позволяет регулировать нагрузку на ячейки памяти, тем самым продлевая срок их службы. Чем больше физических

страниц используется для эмуляции виртуальных, тем реже каждая из них подвергается записи и очистке. Размер страницы flash-памяти составляет 1 килобайт, количество циклов перезаписи равно 10 тысячам циклов. Следовательно, ресурс страницы составляет 10 000 килобайт. При использовании двух страниц для эмуляции EEPROM ресурс возрастает до 20 000 килобайт. Использование большего количества страниц увеличивает ресурс памяти.

Список использованных источников:

1. RM0008 Reference manual (STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf. – Дата доступа: 05.04.2022.
2. PM0075 Programming manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0075-stm32f10xxx-flash-memory-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf. – Дата доступа: 05.04.2022.
3. STM32F103x8 STM32F103xB Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. – Дата доступа: 05.04.2022.
4. ATmega328P. 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. – Дата доступа: 05.04.2022.
5. EEPROM emulation in STM32F10x microcontrollers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00165693-eprom-emulation-in-stm32f10x-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf. – Дата доступа: 05.04.2022.