

**Michał PORZEZIŃSKI**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

## Wykorzystanie wymiennych kart pamięci Flash w mikroprocesorowych rejestratorach danych pomiarowych

Dr inż. Michał PORZEZIŃSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 1992 r. Tam też w 2001 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Obecnie zatrudniony jest jako adiunkt w Katedrze Automatyki. Zainteresowania badawcze: technika mikroprocesorowa oraz komputerowe systemy pomiarowo - sterujące.



e-mail: mporz@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania kart pamięci Flash w mikroprocesorowych urządzeniach rejestracji danych pomiarowych. Dokonano przeglądu najpopularniejszych kart oraz omówiono ich właściwości. Na przykładzie kart MMC i SD opisano sposób odczytu i zapisu danych przy wykorzystaniu interfejsu SPI. Rozważono różne struktury zapisu danych. W oparciu o wykonany prototyp rejestratora oszacowano zapotrzebowanie na zasoby pamięci oraz możliwą do osiągnięcia szybkość operacji zapisu i odczytu danych.

**Słowa kluczowe:** rejestracja danych, karty pamięci Flash, technika mikroprocesorowa.

### Usage of removable Flash memory card in microprocessor data recorder

#### Abstract

The capability of the Flash memory cards usage in microprocessor data recorder is presented in this paper. The most popular cards and their properties are reviewed. The way of writing and reading data from MMC and SD card using SPI interface is described. Some structures of data recording are considered. Basing on created prototype of data recorder the requirement of memory resources and the speed of recording operations possible to achieve are estimated.

**Keywords:** data recording, Flash memory cards, microprocessor engineering

## 1. Wstęp

W technice pomiarowej często zachodzi potrzeba rejestracji danych, które są później przetwarzane i prezentowane przy użyciu zewnętrznego komputera. Zarejestrowane w ten sposób dane mogą być wykorzystywane do celów rozliczeniowych, do sporządzania dokumentacji przebiegu procesu produkcyjnego lub do celów diagnostycznych.

Przykładem może być rejestrator parametrów pracy maszyn budowlanych [1], którego zadaniem jest rejestrowanie takich parametrów jak aktualna głębokość wiercenia, szybkość zagłębienia się narzędzia, moment obrotowy, wielkość przepływu iniektu itp.

Tam gdzie ze względów technicznych lub ekonomicznych nie jest możliwe wykorzystanie klasycznego komputera przemysłowego konieczne może być samodzielne opracowanie systemu mikroprocesorowego rejestrującego dane.

W dotychczasowych rozwiązaniach rejestratorów, do przechowywania danych, najczęściej wykorzystywano podtrzymywaną bateryjnie pamięć RAM. Zarejestrowane informacje były później przenoszone z rejestratora do komputera, w którym poddawane były dalszej obróbce, za pomocą jednego ze standardowych interfejsów szeregowych komputera klasy PC, takich jak: łącze RS232, USB lub łącze podczerwieni IrDA.

Wadą takiego rozwiązania jest konieczność zestawienia fizycznego połączenia rejestrator-komputer oraz stosunkowo długi czas

odczytu danych w przypadku ich większej ilości. Obecnie alternatywnym rozwiązaniem może być zastosowanie do przenoszenia danych coraz bardziej popularnych wymiennych kart pamięci Flash.

## 2. Rodzaje kart pamięci Flash

Karty pamięci Flash stały się powszechnie stosowanym nośnikiem danych w urządzeniach multimedialnych takich jak aparaty cyfrowe, czy odtwarzacze muzyczne. Cechuje je możliwość wielokrotnego zapisu (do ok. 100.000 razy), duża i wciąż rosnąca pojemność (obecnie sprzedawane są karty o pojemnościach dochodzących nawet do 4 GB), niewielka waga i rozmiary, niewielki pobór prądu oraz odporność na wstrząsy (do 1.000 G). Każda z kart składa się z nieulotnej pamięci, najczęściej typu NAND Flash oraz wbudowanego kontrolera zarządzającego pamięcią i obsługującego interfejs wejścia/wyjścia karty.

Obecnie w sprzedaży znajduje się kilka rodzajów kart. Różnią się one konstrukcją mechaniczną, zestawem sygnałów interfejsu oraz protokołem wymiany danych. W chwili obecnej najczęściej spotykane rodzaje kart to: CompactFlash (CF), MultiMediaCard (MMC), Secure Digital (SD), oraz Memory Stick (MS) i xD-Picture Card (xD). Zostały one zestawione w tabelicy 1. Większość z nich jest obsługiwana przez uniwersalne czytniki kart umożliwiające dostęp do zapisanych na karcie danych z poziomu komputera klasy PC.

Tab. 1. Podstawowe rodzaje kart pamięci Flash

Tab. 1. Basic types of Flash memory cards

Rodzaj karty	Rozmiary [mm]	Rodzaj złącza
CompactFlash	42,8 / 36,4 / 3,3	igłowe 50 stykowe
MultiMediaCard	32 / 24 / 1,4	plaskie 7 stykowe
Secure Digital	32 / 24 / 2,1	plaskie 9 stykowe
Memory Stick	50 / 21,4 / 2,8	plaskie 10 stykowe
xD-Picture Card	25 / 20 / 1,7	plaskie 18 stykowe

Karty CompactFlash są konstrukcją najstarszą, lecz mimo to cały czas są bardzo popularne. Cechuje je korzystny stosunek pojemności do ceny, dostępność dokumentacji, możliwość pracy w trybie standardowego interfejsu IDE [2]. Pewną wadą jest duża liczba wyprowadzeń, co utrudnia konstrukcję sterownika oraz złącze szpilkowe, które jest wrażliwe na zabrudzenia np. ziarnami piasku. Wymiana takiej karty w warunkach polowych może być trudna i prowadzić do uszkodzenia złącza.

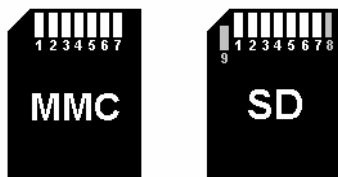
Nie mniej popularnymi, posiadającymi dostępną dokumentację, są karty MMC i SD [3, 4]. W odróżnieniu od karty CF zawierają one znacznie mniej wyprowadzeń, a plaskie styki mają właściwość samooczyszczenia się. Karty te mogą komunikować się z mikrokontrolerem poprzez szeregowy interfejs SPI. Zostały one uznane za najbardziej odpowiednie do zastosowania przy budowie niedrogich mikroprocesorowych rejestratorów danych.

Pozostałe rodzaje kart są specyficznymi rozwiązaniami promowanymi przez producentów sprzętu multimedialnego, a ich dokumentacja jest niedostępna dla podmiotów trzecich lub dostępna dopiero po wykupieniu odpowiedniej licencji.

Należy również wspomnieć o przenośnych pamięciach Flash z interfejsem USB. Są one bardzo popularne, jednak ze względu na nie zestandaryzowane rozmiary zewnętrzne i konieczność stosowania dodatkowego sterownika pełniącego rolę tzw. Hosta USB, do rozważanych zastosowań są one mniej przydatne.

### 3. Właściwości kart MMC i SD

O wyborze kart MMC i SD do budowy mikroprocesorowego rejestratora danych zdecydowały między innymi: popularność tych kart i dostępność dokumentacji technicznej, najmniejsza spośród wszystkich kart liczba styków, płaskie i odporne na ewentualne zanieczyszczenia złącze, możliwość pracy w trybie SPI (Serial Peripheral Interface). Rozkład wyprowadzeń kart MMC i SD pokazano na rys. 1. W porównaniu z kartą MMC w karcie SD występują dodatkowe wyprowadzenia (styki nr 8 i nr 9).



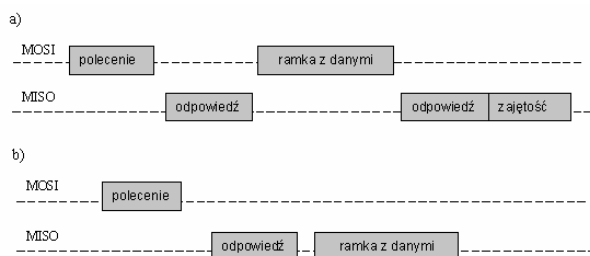
Rys. 1. Wyprowadzenia kart MMC i SD  
Fig. 1. Pin configuration of MMC and SD cards

Przy założeniu, że nie jest wymagana duża szybkość zapisu/odczytu danych najwygodniejszym sposobem komunikacji z kartą jest wykorzystanie trybu SPI. Tryb ten jest dostępny w większości produkowanych kart MMC i w każdej karcie typu SD. Zestawienie linii wykorzystywanych w trybie SPI przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Linie wykorzystywane w trybie SPI  
Tab. 2. The lines used in SPI mode

Numer styku	Nazwa sygnału	Rodzaj	Opis
1	CS	wejście	Uaktywnienie karty
2	MOSI	wejście	Dane wysyłane do karty
3	VSS1	zasilanie	Masa zasilania
4	VDD	zasilanie	Zasilanie karty
5	CLK	wejście	Sygnal zegarowy
6	VSS2	zasilanie	Masa zasilania
7	MISO	wyjście	Dane odczytywane z karty

Protokół wymiany danych w trybie SPI polega na wysyłaniu do karty, poprzez linię MOSI, poleceń wymuszających wykonanie odpowiedniej akcji [5]. Lista poleceń dostępnych w trybie SPI jest dostępna w dokumentacji kart. Polecenie składa się zawsze z 6-ciu bajtów zawierających między innymi: kod polecenia, argumenty, sumę kontrolną CRC7 oraz bity uzupełniające. Polecenie jest potwierdzane przez kartę poprzez wysłanie odpowiedzi informującej o poprawnym jego wykonaniu lub błędzie. Przebiegi zapisu i odczytu zostały przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Przebiegi cyklu a) zapisu i b) odczytu danych w trybie SPI  
Fig. 2. The cycles of a) writing b) reading data in SPI mode

W przypadku polecenia zapisu, po uzyskaniu potwierdzenia, wysyłana jest ramka danych. Ramka składa się z bloku danych

(typowo 512 bajtów) poprzedzonych odpowiednim znacznikiem oraz dwubajtowej sumy kontrolnej CRC16. Po przesłaniu ramki z danymi, karta potwierdza odebranie danych i ewentualnie generuje sygnał zajętości do czasu zakończenia zapisu danych w pamięci.

Proces odczytu przebiega podobnie. Po potwierdzeniu polecenia odczytu danych karta przesyła ramkę z żądanymi danymi, która podobnie jak w przypadku zapisu poprzedzona jest odpowiednim znacznikiem i zakończona sumą kontrolną CRC16. W przypadku błędu odczytu wysyłany jest tylko znacznik błędu.

Maksymalna częstotliwość sygnału zegarowego interfejsu SPI dla kart MMC wynosi 20MHz, a dla SD 25MHz, co pozwala na transmisję danych z prędkością 2,5MB/s. Realna szybkość odczytu/zapisu karty jest dużo mniejsza, gdyż transakcja wymiany danych odbywa się zgodnie z protokołem wymagającym przesłania dodatkowych informacji takich jak kod polecenia, status karty, sumy kontrolne czy potwierdzenia, a ponadto uwzględnić należy również czas potrzebny wewnętrznemu kontrolerowi na zrealizowanie żądanej operacji.

### 4. Wybór struktury zapisu danych

Podczas projektowania układu rejestratora bardzo ważnym zadaniem jest wybór odpowiedniej struktury zapisu danych.

Typowe rozwiązanie stosowane w rejestratorach z pamięcią RAM polega na wykorzystaniu tablicy rekordów oraz inkrementowanego po każdym zapisie licznika rekordów. Nie może ono jednak być bezpośrednio użyte w przypadku kart pamięci Flash.

Jedną z zasadniczych różnic funkcjonalnych w porównaniu z pamięcią RAM jest to, że odczyt/zapis danych możliwy jest tylko w postaci wielobajtowych bloków, których rozmiar standardowo wynosi 512 bajtów. Ponadto liczba cykli kasowania i zapisu do pamięci jest ograniczona, zwykle na poziomie ok. 100 tys. Limit ten może być bardzo szybko osiągnięty. Przykładowo, uaktualnianie licznika rekordów umieszczonego w pamięci Flash co 1s, spowodowałoby osiągnięcie limitu zapisów już po niecałych 28 godzinach rejestracji!

Innym problemem pojawiającym się w przypadku przyjęcia niestandardowego formatu zapisu danych jest to, że bez dostarczenia odpowiednich sterowników, tak zapisane dane nie byłyby widoczne dla systemu operacyjnego komputera PC. Uniemożliwiłoby to wykorzystanie standardowych poleceń systemu operacyjnego do takich operacji jak: kopiowanie i usuwanie danych, czy formatowanie nośnika.

W budowanym prototypie wykorzystano więc standardowy system FAT16. Jest on stosunkowo prostym systemem, którego dokumentacja jest powszechnie dostępna [6] i wystarczającym do obsługi nośników o pojemnościach do 2 GB. Jest ponadto rozpoznawalny przez większość popularnych systemów operacyjnych takich jak Windows i Linux.

W systemie FAT16 zapis nowych danych do pliku wymaga zmodyfikowania kilku różnych obszarów: obszaru danych, wpisu w katalogu głównym (rozmiar pliku, data modyfikacji) oraz w przypadku konieczności alokacji nowego klastra również zawartości tablicy FAT i jej kopii. Przerwanie procesu zapisu np. na skutek zaniku napięcia zasilania może spowodować pojawienie się niespójności w strukturze systemu plików. Aby temu zapobiec konieczne jest informowanie mikrokontrolera o zbliżającym się zaniku zasilania za pomocą przerwania w celu zakończenia bieżącej transakcji zapisu i zablokowania następnych.

Innym problemem do rozwiązania jest ograniczona liczba cykli zapisów danych do karty gwarantowana przez producenta. Najbardziej newralgicznym punktem jest katalog do którego należy otwarty plik i w którym znajdują się często modyfikowane informacje, takie jak: rozmiar pliku oraz data i czas ostatniej zmiany dokonanej w pliku.

Rozwiązaniem tego problemu może być przechowywanie najczęściej modyfikowanych danych w pamięci podręcznej i „zrzucanie” ich do karty dopiero po zakończeniu rejestracji. Należy przy tym pamiętać o konieczności zapisu tych danych w chwili

wykrycia zaniku napięcia zasilania i dobraniu odpowiednio długiego czasu podtrzymania zasilania.

## 5. Wyniki badań prototypu

W celu weryfikacji poprawności przyjętych rozwiązań oraz oszacowania zapotrzebowania na zasoby systemu mikroprocesorowego zostały zbudowane dwa prototypy rejestratora danych. W jednym wykorzystano popularny mikrokontroler z rodziny 8051 z zegarem 11,0592 MHz i 32 kB zewnętrznej pamięć RAM. W drugim zastosowano szybki 8-mio bitowy mikrokontroler ATmega128 z rodziny AVR z zegarem 14,7456 MHz zawierający 4kB pamięci RAM i sprzętową obsługę interfejsu SPI.

Oprogramowanie umożliwiające komunikację z kartą MMC zostało napisane w języku C. Dla mikrokontrolera z rodziny 8051 wykorzystano kompilator Keil uVision2, a dla mikrokontrolera AtMega128 darmowy kompilator AVR-GCC. Pierwszy z nich operuje danymi wielobajtowymi zapisanymi w konwencji big-endian, drugi little-endian, co trzeba było uwzględnić w oprogramowaniu.

Przy opracowywaniu oprogramowania kierowano się głównie potrzebą jak najoszczędniejszego gospodarowania zasobami pamięci operacyjnej mikrokontrolera. W skład oprogramowania weszły: procedury obsługi interfejsu SPI, procedury realizujące protokół wymiany danych z kartą MMC/SD oraz procedury uproszczonej obsługi systemu plików FAT16. Aby ograniczyć użycie pamięci mikrokontrolera i uprościć oprogramowanie, przyjęto, że w danym momencie może być otwarty tylko jeden plik. Zrezygnowano również z procedur kasowania plików i formatowania karty.

Opracowane oprogramowanie pozwoliło na oszacowanie zapotrzebowania na zasoby pamięci RAM. Stwierdzono, że oprogramowanie obsługi kart wykorzystuje ok 620 bajtów (25 bajtów - informacja o strukturze partycji, pamięć podręczna aktualnego sektora danych - 517 bajtów, deskryptor otwartego pliku - 36 bajtów, zmienne pomocnicze - ok. 32 bajty). Biorąc pod uwagę, że oprócz procedur zapisu danych będą wykorzystywane również procedury związane z realizacją algorytmów samego pomiaru, można przyjąć, że w praktyce minimalna wielkość potrzebnej pamięci RAM to ok. 1 kB.

Podczas badań prototypu dokonano również pomiaru czasu potrzebnego do zapisu i odczytu sektora. Badaniom poddano trzy różne karty: MMC 128MB firmy TwinMos, SD 256 MB firmy Kingston oraz MMC 16MB firmy Cannon. Eksperymenty polegały na pomiarze czasu potrzebnego na wykonanie 100 zapisów i odczytów kolejnych sektorów danych. Pomiar przeprowadzono dla kilku częstotliwości zegara sprzętowego interfejsu SPI oraz dla przypadku programowej realizacji interfejsu w obu mikrokontrolerach. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 3.

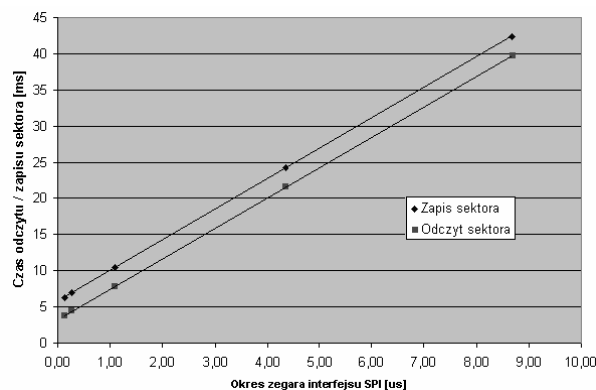
Tab. 3. Zmierzone czasy zapisu i odczytu sektora danych  
Tab. 3. Measured times of sector writing and reading

Częstotliwość zegara SPI	MMC 128 MB TwinMos		SD 256 MB Kingston		MMC 16 MB Cannon	
	zapis	odczyt	zapis	odczyt	zapis	odczyt
[MHZ]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
7,3728	4,2	4,1	6,3	3,7	6,3	4
3,6864	4,8	4,7	7	4,5	6,9	4,7
0,9216	8,3	8,1	10,4	7,8	10,4	8,1
0,2304	22	21,8	24,2	21,6	24,2	21,8
0,1152	40,2	39,8	42,4	39,7	42,4	39,9
AVR prog.	18,3	18,2	20,4	18	20,5	18,6
8051 prog.	112	117	114	117	114	117

Można zauważyć, że programowa realizacja interfejsu SPI jest dużo mniej efektywna, zwłaszcza w przypadku mikrokontrolera

z rodziny 8051, dla którego czas odczytu/zapisu sektora wynosił ok. 115 ms. W przypadku obsługi sytemu FAT podczas analizy ilości wolnego miejsca na karcie lub podczas zapisu wymagającego wyszukania kolejnego wolnego klastra może zająć konieczność przeszukania całej tablicy alokacji, która w skrajnym przypadku może składać się z 256 sektorów. Wówczas czas takiej operacji dla mikrokontrolera 8051 może wynosić nawet 30s! W przypadku sprzętowej obsługi interfejsu SPI taktowanego zegarem o częstotliwości 8 MHz czas ten skraca się do ok. 1,3 s.

Zauważono również, że dalsze zwiększanie częstotliwości taktowania sprzętowego interfejsu SPI nie skróci w istotny sposób czasu odczytu i zapisu. Wynika to istnienia stałych opóźnień związanych z obsługą pamięci i samą realizacją programu obsługi karty. Wyraźnie widać to na rys. 3. przedstawiającym zależność tego czasu od okresu zegara taktującego interfejs SPI.



Rys. 3. Zależność czasu zapisu i odczytu sektora od okresu sygnału zegara SPI  
Fig. 3. Relationship between sector writing and reading time and the period of SPI clock signal

## 6. Wnioski

Poprzez budowę i uruchomienie prototypu udowodniono, że istnieje możliwość konstruowania stosunkowo tanich systemów rejestrujących dane na wymiennych kartach Flash w oparciu o proste mikrokontrolery z rodziny 8051 i AVR.

Za najbardziej przydatne do tego celu uznano karty pamięci MMC i SD pracujące w trybie SPI.

Oszacowano, że w zastosowaniach praktycznych, przy wykorzystaniu systemu FAT16 wielkość pamięci RAM nie powinna być mniejsza niż 1kB.

Stwierdzono, że uzasadnione jest stosowanie mikrokontrolerów ze sprzętową obsługą interfejsu SPI, który pozwala na osiągnięcie znacznie krótszych czasów odczytu i zapisu danych niż w przypadku programowej realizacji tego interfejsu. Jest to szczególnie istotne w przypadku stosowania standardowego systemu plików FAT16.

## 7. Literatura

- [1] D. Świsulski, M. Wołoszyk, M. Galewski, M. Porzeziński: Rejestracja parametrów pracy wiertnicy wytwarzającej pale betonowe, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2004 nr 7-8
- [2] P. Marks: Pamięci masowe w systemach mikroprocesorowych. Po-radnik konstruktora, BTC, 2006
- [3] SAMSUNG MultiMediaCard Product Datasheet, Version 0.3, September 2005
- [4] SanDisk Secure Digital Card Product Manual, Version 1.9, December 2003
- [5] R. Biały: Obsługa kart pamięci Flash za pomocą mikrokontrolerów, *Elektronika praktyczna* 2,3, 5,9 / 2004
- [6] FAT - General Overview of On-Disk Format, Version 1.02, May 5, 1999, Microsoft Corporation