

ZAPIS DANYCH W KASECIE KATASTROFICZNEJ SYSTEMU REJESTRACJI PARAMETRÓW LOTU

W artykule zostały omówione procedury i algorytmy pozwalające uzyskać jak największą wiarygodność i bezpieczeństwo zapisywanych informacji, w systemach rejestracji parametrów lotu. Opracowanie zostało napisane w oparciu o doświadczenia powstałe w trakcie procesu projektowania rejestratorów katastroficznych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. W publikacji można znaleźć informacje na temat problematyki związanej z zastosowaniem nowoczesnych pamięci nieulotnych w układach, które muszą spełniać surowe wymagania niezawodnościowe oraz rozwiązania zaproponowane przez ITWL.

WSTĘP

Rozwój współczesnej awioniki spowodował, że ilość danych zapisywanych w nowoczesnych systemach rejestracji parametrów lotu stale wzrasta. Obecnie standardem jest możliwość zapisywania bardzo dużej ilości parametrów analogowych i cyfrowych, dodatkowo często powstaje potrzeba rejestracji dźwięku w postaci cyfrowej, a w niedalekiej przyszłości rozważa się wdrożenie zapisu obrazu z kamer wysokiej rozdzielczości do pamięci katastroficznej rejestratora parametrów lotu. Rozwój systemów rejestracji prowadzi wprost do znaczącego zwiększenia dostępnej pamięci. Wraz z realizacją tego zadania należy pamiętać o specyficznych wymaganiach, których sprostanie zapewnia wiarygodność i bezpieczeństwo zapisywanych danych. Ze względu na ilość zapisywanych informacji wymagania pojemnościowe można podzielić na:

- ~50 MB - zapisywanie dużej ilości parametrów analogowych i cyfrowych,
- ~2GB – zapisywanie parametrów i dźwięku w postaci cyfrowej,
- ~256GB – zapisywanie parametrów, dźwięku w postaci cyfrowej oraz video wysokiej rozdzielczości.

Ze względu na dużą różnicę prędkości zapisu w różnych przypadkach, każdy z nich wymaga odrębnego podejścia do sposobu organizacji pamięci. W publikacji opisane są algorytmy i procedury dla kasyety o pojemności od 256 MB do 4 GB z maksymalną prędkością zapisu 6 MB/s.

1. ZAPIS DO PAMIĘCI NIEULOTNYCH

1.1. Algorytmy kodowania i korekcy błędów

Przy zapisywaniu danych do pamięci nieulotnych powstaje zjawisko przekłamywania pojedynczych bitów. Zjawisko to występuje częściej w objętościowo dużych pamięciach, gdzie stosowane są specjalne zabiegi pozwalające na zagęszczenie danych jak np. wykorzystanie komórek pamięci MLC lub TLC. Kolejnym czynnikiem predysponującym do powstawania takiego zjawiska są trudne warunki środowiskowe, w których pracują układy cyfrowe. Największy wpływ mają wahania temperatury. Kodowanie korekcyjne jest wykorzystywane powszechnie w technice komputerowej w pamięciach nieulotnych i ulotnych w celu zapewnienia poprawności i wiarygodności przechowywanych informacji. Procedura polega na dodaniu informacji nadmiarowych pozwalających na całkowitą lub częściową korekcję i detekcję błędów. W najnowszych rozwiązaniach stosuje

się kody BCH albo Reeda-Solomona, które wypierają prostszy algorytm Hamminga.

2. ZAPIS W REJESTRATORZE PARAMETERÓW LOTU

Systemy rejestracji parametrów lotu charakteryzują się bardzo dużą niezawodnością działania i wiarygodnością przechowywanych informacji. Takie wymagania determinują konieczność wyposażenia oprogramowania sterującego układami pamięci w dodatkowe mechanizmy pozwalające sprostać oczekiwaniom i zapewnić system o pożądanych właściwościach.

2.1. Odłączenie zasilania podczas zapisu

W kasecie systemu rejestracji parametrów lotu, istną kwestią okazuje się zapewnienie odporności na nagłe odcięcie napięcia zasilającego. Nie trudno sobie wyobrazić, że najbardziej zależy nam na danych zapisanych w kasecie katastroficznej właśnie w momencie, w którym taka sytuacja mogła nastąpić. Zwróćmy uwagę, że w klasycznych urządzeniach pamięci masowej, z zastosowaniem powszechnie używanych systemów plików, w przypadku odłączenia zasilania w trakcie operacji zapisu istnieje możliwość utraty zapisanych danych a nawet uszkodzenia całego nośnika. Kasyety katastroficzne i eksploatacyjne systemu rejestracji parametrów lotu są urządzeniami spełniającymi rolę pamięci masowych. Aby uzyskać odporność na takie działanie można zastosować odpowiedni układ zasilania, który w trakcie odłączenia urządzenia pozwoli na dokończenie wszelkich niezbędnych operacji. Inne dużo trudniejsze rozwiązanie polega na opracowaniu algorytmów pozwalających na odłączenie kasyety w każdym momencie i zapewnienie poprawnej pracy urządzenia po kolejnym uruchomieniu. Opracowany w ITWL system zapisów pozwala na takie działanie. Zastosowano zarówno rozwiązania programowe jak i sprzętowe. Oprogramowanie jest odporne na odłączenie zasilania, wszystkie procedury związane z zakończeniem rejestracji, i określeniem nowego adresu zapisu są realizowane podczas inicjalizacji. Program główny jest zaprojektowany w taki sposób, aby w każdym momencie mógł zostać przerwany oraz na skutek tego przerwania był w stanie poprawnie zainicjalizować swoją pracę. Mimo opracowania takich rozwiązań, kasyety wyposaża się w układ zasilania pozwalający na dokończenie zapisu, co daje pewność, że informacje napływające tuż przed wyłączeniem systemu będą poprawnie zapisane.

2.2. Organizacja zapisów w przestrzeni pamięci

Nośnik danych w systemach rejestracji można porównać do zapętlonej taśmy magnetycznej. Funkcjonalność nowoczesnych kaset musi być tożsama. Najstarsze zapisy są kasowane w momencie zapisywania nowych oraz istnieje możliwość rozróżnienia poszczególnych zapisów. W rodzinie rejestratorów opracowanych w ITWL system zapisów jest podzielony na przestrzeń, w której przechowywane są zapisy oraz tablicę zapisów, przechowującą adresy oraz indeksy dokonanych rejestracji. W porównaniu do komputerowego systemu plików jest to rozwiązanie stosunkowo proste, jednak pozwala ono na przejrzystą postać zapisywanych informacji, zapewnia szybki dostęp do poszczególnych nagrań oraz umożliwia prostą analizę danych częściowych. W starszych rozwiązaniach poszczególne zapisy były rozdzielane odpowiednią sekwencją znaków albo określoną ilością bajtów zerowych. Nowoczesne pamięci cyfrowe charakteryzują się przestrzenią dodatkową, w której przechowywane są informacje nadmiarowe na potrzeby kodowania korekcyjnego oraz oznaczania sektorów przez systemy plików. W najnowszych kasetach katastroficznych i eksploatacyjnych opracowywanych w ITWL Poszczególne zapisy są rozróżniane między sobą właśnie na podstawie znaczników znajdujących się w przestrzeni dodatkowej. System zapisów rozróżnia cztery możliwe oznaczenia danego sektora:

- aktualny,
- nieaktualny,
- koniec zapisu,
- pusty.

Na podstawie takich oznaczeń są realizowane wszystkie algorytmy związane z obsługą zapisów. System z założenia jest stosunkowo nieskomplikowany, jednak dzięki dużej liczbie zaimplementowanych zabezpieczeń, zapewnione jest poprawne działanie w każdej sytuacji oraz jednocześnie zoptymalizowanie pod kątem szybkości zapisu.

3. ALGORYTMY SYSTEMU ZAPISÓW

Ogólna postać systemu zapisów opracowanego w ITWL została przedstawiona w punkcie 2.2. Dokładniej obrazując działanie algorytmów należy rozróżnić procedury inicjalizacyjne oraz procedury zapisu. Zarówno w jednym jak i w drugim przypadku system zapisów jest silnie powiązany z algorytmami obsługi pamięci, wykrywania uszkodzonych sektorów oraz monitorowana poprawności pracy układów pamięci.

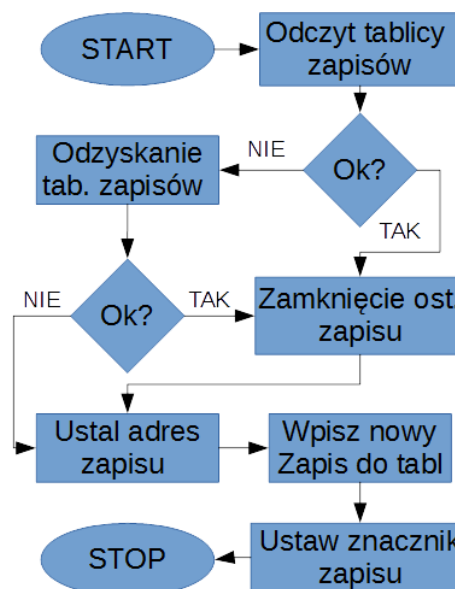
3.1. Tablica zapisów

Tablica zapisów jest wyróżniona z pozostałej przestrzeni pamięci. Dla kasyety o pojemności 256MB zajmuje jeden blok pamięci, czyli 128 KB. Blok jest podzielony na 64 strony natomiast najmniejsza możliwa przestrzeń zapisu z zastosowaniem wbudowanych algorytmów kodowania korekcyjnego to ¼ strony. Aby zapobiegać nadmiernej ilości operacji kasowania, cała tablica zapisów zawarta jest w ¼ strony, co pozwala na jej nadpisanie 256 razy zanim nastąpi konieczność skasowania bloku tablicy zapisów. Podczas uaktualniania tablicy zapisów, ćwiartka strony zawierająca bieżące dane jest oznaczana, jako nieaktualna, natomiast do kolejnej ćwiartki oznaczonej, jako pustej wpisuje się nowe dane tablicy zapisów i oznacza się ją, jako aktualną.

3.2. Inicjalizacja systemu zapisów

Uproszczony Algorytm inicjalizujący system zapisów został przedstawiony na rysunku 1. Inicjalizacja rozpoczyna się od odczytu tablicy zapisów, z której najbardziej istotny jest adres początku ostatniego zapisu. Pozyskany adres jest wymagany w procesie

zamknięcia poprzedniej rejestracji. Jeżeli procedura zostanie wykonana poprawnie następuje ustalenie adresu gdzie rozpocznie się zapisywanie, następnie adres ten jest wpisany do tablicy zapisów. W tym momencie znacznik pozwalający wpisywanie do pamięci nieulotnej zostaje ustawiony. W przypadku, w którym blok tablicy zapisów zostałby uszkodzony jest możliwość jej odzyskania. Procedura realizująca to zadanie odczytuje wszystkie oznaczenia sektorów pamięci, ustala nowe położenie bloku tablicy zapisów oraz zapisuje odzyskaną informację w tym bloku. Następnie procedura inicjalizująca system zapisów przebiega w ten sam sposób.



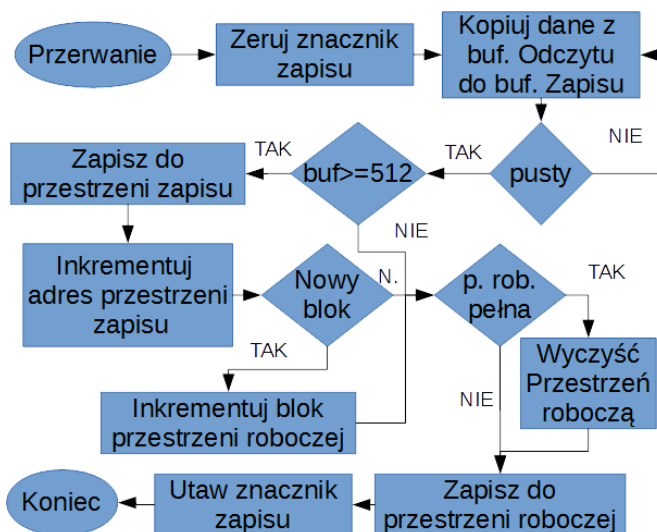
Rys. 1. Algorytm inicjalizujący system zapisów

4. PROCES ZAPISU DO PAMIĘCI

W systemach rejestracji dąży się do tego aby czas od momentu pozyskania informacji do momentu jej bezpiecznego zapisu był możliwie krótki. Wpływ na ten czas mają opóźnienia wynikające z przetwarzania analogowo-cyfrowego, odpowiednie oznaczenie poszczególnych parametrów, opóźnienia transmisji oraz czas, w którym otrzymany bajt informacji będzie na stałe zapisany w pamięci nieulotnej. Nie jest możliwe zapisywanie do pamięci każdego odebranego bajtu osobno. W takim wypadku istniałoby bardzo duże prawdopodobieństwo przekłamania zapisywanych informacji. Wiarygodność parametrów pozyskanych z systemu rejestracji jest bardzo ważna dlatego, należy zastosować algorytmy pozwalające wykrywać i niwelować powstające przekłamania. W systemach opracowanych w ITWL dla każdej paczki danych zastosowane są kody korekcyjne oraz zapisana w przestrzeni dodatkowej suma kontrolna CRC16. Taki mechanizm pozwala jednoznacznie wykryć przekłamane bity a w większości przypadków odzyskać uszkodzone informacje. Determinuje to jednak konieczność zapisywania w stosunkowo dużych paczkach danych. Aby zapobiedz niekorzystnym skutkom takiego działania opracowano system zapisu, oparty o podział pamięci na dwie abstrakcyjne części: przestrzeń zapisu oraz przestrzeń roboczą. W takim rozwiązaniu zapisuje się bardzo małe paczki danych (3- 10 bajtów) w przestrzeni roboczej, następnie gdy ilość danych w tej przestrzeni przekroczy 512 bajtów, zostają one zapisane do przestrzeni zapisu. Pozwala to na jednoczesne pełne wykorzystanie przestrzeni pamięci oraz zachowanie najświeższych danych w razie nagłego przerwania pracy urządzenia.

4.1. Algorytm zapisu do pamięci

Uproszczony algorytm zapisu do pamięci został przedstawiony na rysunku 2. Jest on zaprojektowany pod kątem zapisu w dwóch przestrzeniach pamięci. Działanie algorytmu jest wyzwolone przerwaniem pochodzącym od skonfigurowanego licznika. Częstotliwość wyzwalania jest dobierana w zależności od ilości zapisywanych informacji w jednosekundowym przedziale czasu. Czas pomiędzy kolejnymi przerwaniem jest dużo krótszy w porównaniu do czasu potrzebnego na dokonanie operacji zapisu. Zastosowano tutaj flagę: znacznik zapisu. Jeżeli jest ona wyzerowana to należy poczekać na dokończenie operacji zapisu. Na początku obsługi przerwania sprawdzane jest czy znacznik zapisu jest ustawiony. Następnie jest on zerowany po czym następuje kopiowanie z bufora, do którego napływają dane z zewnętrznego interfejsu, do bufora, który wykorzystywany jest w procesie zapisu do pamięci nieulotnej. Mechanizm, w którym używane są dwa bufory cykliczne o strukturze kolejki, pozwala na zapisywanie odbieranych danych, zarówno w momencie operacji kopiowania buforów jak i w trakcie procesu zapisu do pamięci nieulotnej. W momencie, w którym wszystkie dane z bufora odczytu zostaną skopiowane będzie on pusty, wtedy sprawdzane jest czy ilość bajtów w buforze zapisu jest większa lub równa 512B. Jeżeli tak, to prowadzona jest operacja przechowania informacji w przestrzeni zapisu, pozostałe dane zostaną przechowane w przestrzeni roboczej. Jeżeli danych jest zbyt mało by umieścić je w przestrzeni zapisu, są one przechowane tylko w przestrzeni roboczej. Gdyby w tym momencie nastąpiło wyłączenie urządzenia to informacje zapisane w przestrzeni roboczej będą dołączone do zapisu w trakcie procedur inicjalizacyjnych, podczas kolejnego uruchomienia urządzenia. Można zaobserwować, że przestrzeń robocza stanowi swego rodzaju bufor, w którym przechowywane są dane częściowe zanim uzyskają formę pozwalającą na zapis z pełnym wykorzystaniem dostępnej pamięci w przestrzeni zapisu. Zapisywanie danych w ten sposób wymaga zastosowania bardziej skomplikowanych algorytmów, nie mniej jednak korzyści jakie niesie ze sobą są ten wysiłek, bezpośrednio przekładają się na pewność odzyskania jak najświeższych informacji po nagłym przerwaniu pracy urządzenia. W każdym przypadku zostały zaimplementowane procedury kontrolujące zapis do odpowiedniego miejsca w przestrzeni pamięci. W trakcie gdy przestrzeń robocza jest zapełniona zostaje ona kasowana.

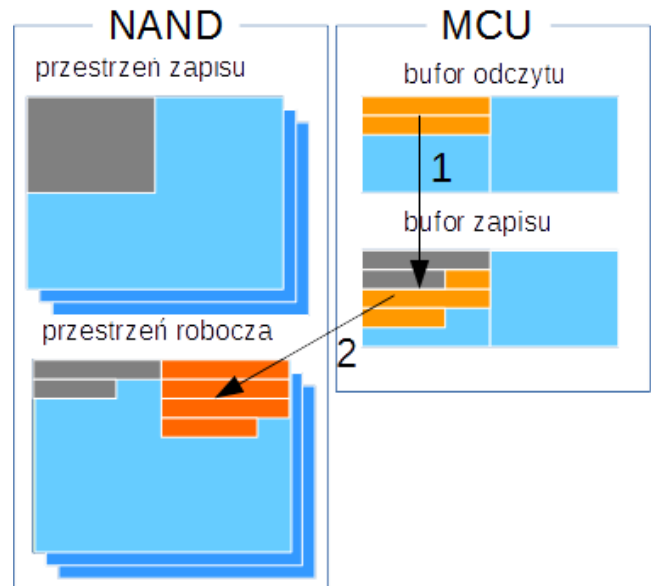


Rys. 2. Algorytm zapisu do pamięci

W momencie gdy blok przestrzeni zapisu zostaje zapisana w całości, następuje procedura przejścia do kolejnego bloku. Należy zwrócić uwagę, że najstarsze zapisy są kasowane dopiero w momencie zapisywania nowych danych. Kolejnym istotnym spostrzeżeniem jest fakt, że blok przestrzeni roboczej zmienia swoje położenie wraz z inkrementacją bloku przestrzeni zapisu. Takie działanie spowodowane jest potrzebą zapewnienia zrównoważenia zurzycia wszystkich bloków pamięci. Blok przestrzeni roboczej jest często zapisywany i kasowany, gdyby został zaadresowany na stałe to bardzo szybko została by w nim wypracowana maksymalna ilość procesów kasowanie/zapis.

Zobrazowanie zapisu z podziałem na przestrzenie pamięci oraz kolejne etapy algorytmu zapisu zostały przedstawione na rysunkach 3 i 4. Bufory odczytu i zapisu znajdują się w pamięci RAM układu sterującego, która jest pamięcią ulotną czyli w momencie odłączenia dane w niej przechowane zostają utracone. Rysunek 3 przedstawia sytuację, w której ilość danych w buforze zapisu nie przekracza 512B dlatego dane zostają umieszczone tylko w przestrzeni roboczej. Kolejne operacje oznaczają:

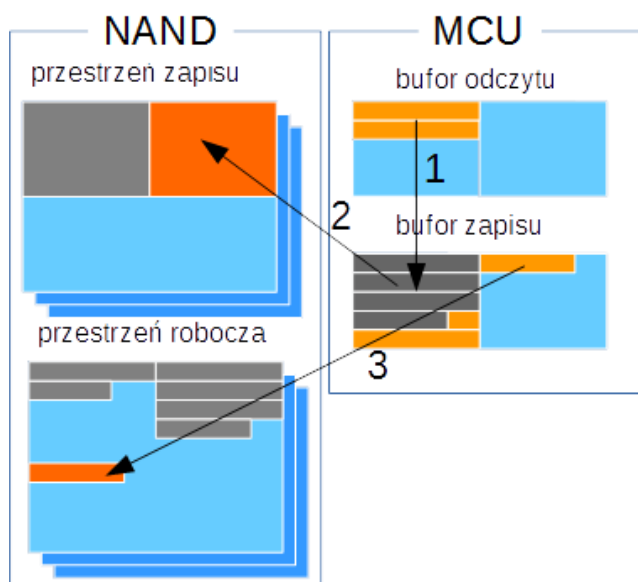
1. Kopiowanie z bufora odczytu do bufora zapisu,
2. Zapis w przestrzeni roboczej danych z bufora odczytu.



Rys. 3. Zapis do przestrzeni roboczej

Rysunek 4 przedstawia sytuację, w której ilość danych w buforze zapisu jest większa niż 512B. W takim przypadku część danych zostaje przechowana w przestrzeni zapisu a pozostała część w przestrzeni roboczej. Warto zauważyć, że informacje zawarte w buforze zapisu są bezpośrednio używane w procesie zapisywania do pamięci nieulotnej. Kolejne operacje oznaczają:

1. Kopiowanie z bufora odczytu do bufora zapisu,
2. Zapis w przestrzeni zapisu danych z bufora odczytu,
3. Zapis w przestrzeni roboczej danych z bufora odczytu.



Rys. 4. Zapis do przestrzeni zapisu i przestrzeni roboczej

PODSUMOWANIE

Współczesny nośnik informacji w systemach rejestracji parametrów lotu odpowiada szczególnemu przypadkowi komputerowej pamięci masowej. Warunki, jakie muszą być spełnione przez takie systemy determinują do znaczących zmian w postrzeganiu bezpieczeństwa oraz wiarygodności zapisywanych informacji w nośniku tego rodzaju. Opracowane w ITWL algorytmy pozwalają na zapis parametrów lotu oraz dźwięku w postaci cyfrowej. Na uwagę zasługują algorytmy zoptymalizowane pod kątem niezawodności i wiarygodności danych oraz prędkości zapisu. Dzięki zastosowaniu przestrzeni roboczej można zaimplementować bufor w pamięci nieulotnej, który przechowuje dane z systemu rejestracji zanim ich wielkość pozwoli na umieszczenie w przestrzeni zapisu. Uzyskano kasety o pojemności od 256 MB do 4 GB pozwalające na zapis z maksymalną prędkością 6 MB/s.

BIBLIOGRAFIA

1. EUROCAE: Norma ED-112, Minimum Operational Performance Specification For Crash Protected Airborne Recorder Systems: 2004.
2. MICRON: TLC MLC and SLC Devices: 2015.
3. MICRON: NOR | NAND Flash Guide: Selecting a Flash Memory Solution for Embedded Applications: 2015.
4. MICRON: NAND Flash Memory MT29F2G08ABAEAH4, MT29F2G08ABAEAWP, MT29F2G08ABBEAH4, MT29F2G08ABBEAHC, MT29F2G16ABAEAWP, MT29F2G16ABBEAH4, MT29F2G16ABBEAHC: 2014.
5. Technical Note Error Correction Code (ECC) in Micron® Single-Level Cell (SLC) NAND: 2011.

Data writing into crash cassette of flight data recording system

The article presents procedures and algorithms allowing providing the greatest possible reliability and security of information stored into flight data recorder. The content of the paper is based on the experience gained during the design process of flight data recorders in the Air Force Institute of Technology. The lecture describes generic issues related with application of modern non-volatile memory into systems that must meet the stringent reliability requirements and the solutions proposed by ITWL.

Autorzy:

ppor. mgr inż. Przemysław Kordowski – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Ks. Bolesława 6. Tel: +48 261851489, Fax: +48 261364603, przemyslaw.kordowski@itwl.pl

ppor. mgr inż. Marcin Chodnicki – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Ks. Bolesława 6. Tel: +48 26 1851136, marcin.chodnicki@itwl.pl

Komandor pil. mgr inż. Wiesław Cuper – 43. Baza Lotnictwa Morskiego w Gdyni; 81-197 Gdynia ul. Zielona. Tel: +48 261268004

prof. nadzw. dr hab. inż. Mirosław Nowakowski – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Ks. Bolesława 6. Tel: +48 261851336, Fax: +48 261364603, miroslaw.nowakowski@itwl.pl