

Krzysztof FIRLAĞ, Piotr KAWALEC
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ TRANSPORTU

Badania niezawodnościowe urządzeń sterowania ruchem w transporcie zaimplementowanych w układach programowalnych

Mgr inż. Krzysztof FIRLAĞ

Ukończył studia na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej w 2001 r. Jest asystentem w Zakładzie Sterowania Ruchem Drogowym Wydziału Transportu. Jego zainteresowania naukowe to technika cyfrowa, elektronika, układy programowalne, układy sterowania ruchem drogowym.



e-mail: kfr@it.pw.edu.pl

Dr inż. Piotr KAWALEC

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Instytutu Transportu w Leningradzie w 1975 r., obronił pracę doktorską w 1979 r. w Instytucie Elektrotechnicznym w Leningradzie. Jest adiunktem na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe to automatyka, elektronika, technika cyfrowa i ich zastosowanie w układach i systemach sterowania i teleinformatyki stosowanych w transporcie.



e-mail: pka@it.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono specyficzne wymagania dotyczące parametrów niezawodnościowych systemów sterowania ruchem w transporcie. Opracowano i wyspecyfikowano w języku VHDL bazę modeli reprezentatywnych urządzeń sterowania ruchem w transporcie. Dokonano syntezy i implementacji modeli urządzeń w różne rodziny układów programowalnych FPGA. Po implementacji przeprowadzono prognozowanie parametrów niezawodności otrzymanych urządzeń sterowania, otrzymane wyniki przedstawiono oraz przeanalizowano pod względem spełniania wymogów niezawodnościowych dla układów sterowania ruchem w transporcie.

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem w transporcie, sterowniki ruchu drogowego, niezawodność, FPGA.

Reliability researches of traffic control devices implemented in programmable logic devices

Abstract

Specific requirements concerning reliability parameters of traffic control systems in transport are presented in the article. Datum feature of representative models of traffic control devices has been drawn up and specified in VHDL language. Synthesis and implementation of model devices into various families of programmable logic devices FPGA has been conducted. After the implementation, the prognosis of reliability parameters of control devices has been performed and the results have been presented and analysed in respect of complying with the reliability requirements for traffic control systems in transport.

Keywords: traffic control in transportation, traffic controller, reliability, FPGA.

1. Wstęp

Współczesne systemy sterowania ruchem w transporcie charakteryzują się geograficznym rozproszeniem w obrębie sterowanego obszaru, koniecznością realizacji złożonych algorytmów sterowania ruchem, koniecznością zbierania i obróbki informacji o ruchu oraz koniecznością ciągłej kontroli i analizy stanu czujników (detektorów) informujących o stanie procesu transportowego [5]. Spełnienie tych funkcji wymaga szybkich i wydajnych układów cyfrowych. Jest to idealne pole do zastosowań układów programowalnych.

Realizacja układów sterowania ruchem w transporcie z wykorzystaniem struktur programowalnych jest zjawiskiem coraz częstszym. Jednak, aby układy programowalne weszły do powszechnego użytku w branży sterowania ruchem w transporcie, niezbędne są badania dowodzące, że urządzenia sterowania budowane w oparciu o układy FPLD spełniają szereg ściśle określonych wymogów bezpieczeństwa i niezawodnościowych specyficznych dla urządzeń sterowania ruchem w transporcie [1, 7, 8].

2. Systemy sterowania ruchem w transporcie

Jednym z podstawowych zadań systemów sterowania w transporcie, a w szczególności w ruchu drogowym, jest sterowanie ruchem, czyli wywieranie określonego wpływu na przebieg ruchu. Celem sterowania jest zapewnienie określonych, zamierzonych warunków ruchu określanych przez parametry ruchu takie jak: przepustowość, czasy oczekiwania, długości kolejek itp.

Kolejnym niezwykle istotnym zadaniem systemów sterowania w transporcie, powiązanych bezpośrednio z pierwszym, jest zapewnienie bezpieczeństwa procesu transportowego, tzn. eliminacja zagrożeń dla jego uczestników, zarówno ludzi jak i środków transportu [7, 8]. Jest to najważniejsza funkcja systemów sterowania w transporcie, której realizacja może odbywać się kosztem pogorszenia parametrów ruchu.

Realizacja powyższych zadań systemów sterowania zależy od dwóch głównych elementów. Pierwszy element to złożone, adaptacyjne algorytmy sterowania ruchem, uzależnione od aktualnych warunków ruchu. Drugi, to niezawodne, wydajne urządzenia realizujące algorytmy sterowania. Opracowywanie algorytmów, w klasycznym wydaniu, należy do inżynierów sterowania ruchem. Metodyka budowy algorytmów sterowania ruchem drogowym została opracowana i przedstawiona w poprzednich pracach [6], w artykule skupiono się na warstwie sprzętowej systemów sterowania. W poprzednich badaniach zaproponowano realizację specjalizowanych urządzeń sterowania ruchem w układach programowalnych [4]. Wykazano szereg zalet tego typu specjalizowanych rozwiązań sterowników ruchu. Aby wdrożyć te rozwiązania do produkcji niezbędne są badania nad niezawodnością i bezpieczeństwem tych rozwiązań

Wymagania w stosunku do urządzeń i systemów sterowania ruchem w transporcie w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności są bardzo wysokie. Wymagane jest nawet w przypadku wystąpienia uszkodzenia, żeby stan systemu po uszkodzeniu był bezpieczny.

Systemy sterowania ruchem muszą spełniać wymagania dotyczące odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa [1]. Zalecenia międzynarodowych komitetów normalizacyjnych nakładają na projektantów systemów komputerowych i elektronicznych, obowiązek obliczenia wartości liczbowych wskaźników określających poprawne i bezpieczne działanie zaprojektowanego systemu sterowania ruchem. W tabeli 1 podano przyjęte poziomy bezpieczeństwa opracowane przez IRSE (*Technical Committee of Institution of Railway Signalling Engineers*). Ponieważ znaczny wpływ na bezpieczeństwo systemu transportowego ma posiadanie w swojej strukturze rozwiązań o wysokiej niezawodności funkcjonalnej, dlatego przyjętym tu kryterium jest wartość intensywności uszkodzeń λ dla pojedynczego elementu systemowego.

Wyróżnia się 5 poziomów bezpieczeństwa. Poziom 4 jest najwyższym poziomem wymaganym w przypadku urządzeń sterowania ruchem, poziom 0 nie ma żadnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa.

Tab. 1. Poziomy bezpieczeństwa wg. zaleceń IRSE
Tab. 1. Safety levels

Poziom bezpieczeństwa	λ	Opis poziomu bezpiecz.	Funkcje systemu	Skutki uszkodzeń i błędów
4	10^{-11}	bardzo wysoki	zabezpieczenia przed kolizjami środków transportu	utrata życia ludzi
3	10^{-9}	wysoki	zapewnienie prawidłowego przemieszczania środków transportu	obrażenia ciała i utrata zdrowia ludzi
2	10^{-7}	średni	zapewnienie kierowania ruchem	skażenie środowiska
1	10^{-5}	niski	zapewnienie obsługi i informowania pasażerów	utrata własności użytkowych systemu
0		nie związany z bezpieczeństwem	zarządzanie w transporcie	utrata właściwości nie wpływających na bezpieczeństwo

Określenie bezpieczeństwa i niezawodności urządzeń sterowania ruchem za pomocą wskaźników liczbowych jest trudne. Istnieje kilka metod wyznaczania tych parametrów. Oprócz niezawodności i intensywności uszkodzeń, najczęściej stosowanym wskaźnikiem oceny urządzeń i ich elementów, w systemach sterowania w transporcie, jest średni czas pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami MTBF (*Mean Time Between Failures*).

3. Budowa urządzeń sterowania ruchem drogowym

Wykorzystując opracowaną metodologię realizacji urządzeń sterowania ruchem w transporcie w układach programowalnych [6], zbudowano bazę reprezentatywnych sterowników ruchu drogowego. Opracowano i wyspecyfikowano w języku VHDL 10 różnych modeli sterowników ruchu drogowego dla konkretnych skrzyżowań w Warszawie. Modele przetestowano, następnie poddano syntezie i implementacji. Każdy z modeli zaimplementowano w 8 różnych układach programowalnych:

- Virtex xcv50sc144,
- Virtex2 xc2v40cs144,
- Virtex4 xc4vfx12sf363,
- Spartan2 xc2s15vq100,
- Spartan3 xc3s50vq100,
- Spartan3 xc3s200ft256,
- XC9000 xc9572pq100,
- XC4000 xc4013pq160.

Ze względu na stosunkowo proste modele sterowników ruchu wykorzystano najprostsze układy z każdej rodziny. Wykorzystanie zasobów układów programowalnych oczywiście różniło się zależnie od zaimplementowanego modelu sterownika, np. dla jednego z najbardziej rozbudowanych modeli, po implementacji do układu xc2s15vq100, wykorzystane zasoby przedstawiały się następująco (tab. 2):

Tab. 2. Wykorzystanie zasobów użytego układu FPGA
Tab. 2. FPGA's used resources

Struktura logiczna	xc2s15vq100
Wyprowadzeń	27 (43%)
Bloków Slice	118 (61%)
Komórek LUT 4 wej	217 (56%)
Przerzutników	86 (22%)
Maksymalna częstotliwość pracy	95,184 MHz

Dla otrzymanych urządzeń sterowania ruchem przeprowadzono prognozowanie wartości podstawowych parametrów niezawodnościowych.

4. Wyznaczanie parametrów niezawodnościowych

Badania niezawodności przeprowadzono na opracowanych sterownikach ruchu drogowego. Wyznaczono następujące parametry [3]:

- Intensywność uszkodzeń λ ;
- Niezawodność $R(t)$;
- MTBF.

Intensywność uszkodzeń λ wyznaczono dwoma niezależnymi metodami, pierwszą – opartą o MIL-HDBK 217, ze wzoru:

$$\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E)\pi_Q\pi_L \text{ (uszkodzenia / } 10^6 \text{ godzin)}, \quad (1)$$

gdzie:

C_1, C_2 - współczynniki złożoności struktury krzemu, ilości wyprowadzeń;

$\pi_T, \pi_E, \pi_Q, \pi_L$ - współczynniki stresu temperatury otoczenia, środowiska, jakości elementu, dojrzałości procesu produkcyjnego;

Drugą – wykorzystującą wartość FIT, bazującą na parametrach publikowanych przez producenta układów programowalnych, firmę Xilinx, w co kwartalnych raportach niezawodnościowych [2]:

$$FIT = \frac{\chi^2 10^9}{2(\text{liczba ukl.})(\text{liczba. godzin})(\text{Acc.})} \text{ (uszkodzenia / } 10^9 \text{ godzin)}. \quad (2)$$

Posiadając wyznaczone wartości intensywności uszkodzeń, zakładając wykładniczy rozkład występowania uszkodzeń, niezawodność układów wyznaczono ze wzoru:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad t > 0. \quad (3)$$

Czas MTBF wyznaczono z zależności:

$$MTTF = MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

lub

$$MTBF = \frac{1}{FIT}. \quad (4)$$

W poniższych tabelach przedstawiono wyliczone parametry niezawodnościowe opracowanych urządzeń sterowania ruchem drogowym, wyznaczone metodami MIL-HDBK-217 (tab. 3) i opartą na FIT (tab. 4).

Tab. 3. Parametry niezawodności urządzeń sterowania ruchem wg. MIL-HDBK-217

Tab. 3. Reliability parameters of traffic control devices according to MIL-HDBK-217

Struktura logiczna	Virtex xcv50sc144	Virtex2 xc2v40cs144	Virtex4 xc4vfx12 sf363
Metoda MIL-HDBK-217			
λ [$10^{-6}h^{-1}$]	0,11315	0,1128	0,72756
R	0,893017	0,893329	0,483086
MTBF [10^6h]	8,837826	8,865248	1,374457
Metoda oparta na parametrach producenta (FIT)			
Struktura logiczna	Spartan2 xc2s15vq100	Spartan3 xc3s50vq100	Spartan3 xc3s200 ft256
λ [$10^{-6}h^{-1}$]	0,09175	0,09315	0,3842
R	0,912333	0,911057	0,680995
MTBF [10^6h]	10,89918	10,73537	2,602811

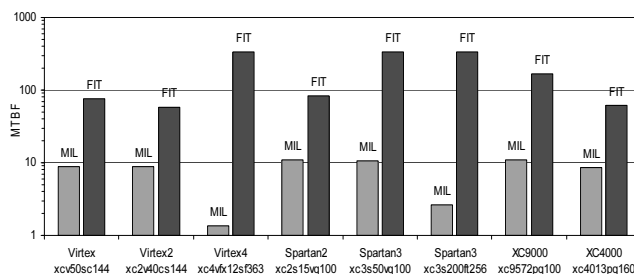
Tab. 4. Parametry niezawodności urządzeń sterowania wyznaczone z wykorzystaniem FIT

Tab. 4. Reliability parameters of traffic control devices according to FIT

Struktura logiczna	Virtex xcv50sc144	Virtex2 xc2v40cs144	Virtex4 xc4vfx12 sf363
Metoda oparta na parametrach producenta (FIT)			
λ [$10^{-9}h^{-1}$]	13	17	3
R	0,9870841	0,98314368	0,997004496
MTBF [10^6h]	76,923076	58,8235294	333,3333333
Metoda oparta na parametrach producenta (FIT)			
Struktura logiczna	Spartan2 xc2s15vq100	Spartan3 xc3s50vq100	Spartan3 xc3s200 ft256
λ [$10^{-9}h^{-1}$]	12	3	3
R	0,98807171	0,9970045	0,997004496
MTBF [10^6h]	83,3333333	333,333333	333,3333333

Porównując uzyskane wyniki parametrów wyznaczonych tradycyjną metodą opartą na MIL-HDBK-217 i metodą opartą na FIT, stwierdzono znaczną różnicę wyników. Wartości czasów MTBF przedstawiono zbiorczo, (rys. 1), dodatkowo z czasami MTBF układów xc9572pq100 i xc4013pq160 niezawartymi w powyższych tabelach, stosując dla zwiększenia czytelności skalę logarymiczną. Różnica w otrzymanych wynikach, na korzyść metody opartej na FIT, wynika z faktu, że metoda MIL-HDBK-217 jest starszą metodą. Parametry niezawodnościowe wyznaczone w oparciu o nią zależą głównie od ilości wyprowadzeń układu, w mniejszym zaś stopniu od jego zaawansowania technologicznego, praktycznie zaawansowanie technologiczne dla układów starszych niż 2 lata, nie wpływa na

MTBF. Metoda oparta o FIT bazuje na rzeczywistych parametrach intensywności uszkodzeń, wyznaczonych w wyniku testów konkretnych struktur FPGA. Jej wyniki są więc bardziej zbliżone do rzeczywistości.



Rys. 1. Porównanie czasów MTBF wyznaczonych różnymi metodami, dla sterowników realizowanych w różnych strukturach programowalnych
Fig. 1. Comparison of MTBF times determined by various methods for controllers implemented in different programmable structures

5. Wnioski

Przyjmując, jako bardziej realne wartości wskaźników charakteryzujących niezawodność wyznaczonych w wykorzystaniu FIT, badane urządzenia sterowania ruchem, zaimplementowane w układy programowalne, charakteryzowały się intensywnością uszkodzeń λ rzędu 10^{-10} [uszk/h]. Klasyfikuje to badane układy pomiędzy 3 a 4 poziomem bezpieczeństwa (tab. 1). Uwzględniając uzyskane wyniki, dla spełnienia wymogów bezpieczeństwa wymaganych dla urządzeń wyższych klas, konieczne jest zastosowanie dodatkowych działań. Zwiększenie bezpieczeństwa układów sterowania ruchem w transporcie można uzyskać stosując np.: nadmiarowość sprzętową lub czasową, poprzez zwielokrotnianie układów lub wielokrotne przetwarzanie w cyklu pracy urządzenia.

6. Literatura

- [1] M. Dąbrowa-Bajon: Podstawy sterowania ruchem kolejowym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.
- [2] Device Reliability Report, Fourth Quarter 2007. www.xilinx.com, Xilinx, 2006
- [3] P. Kawalec, K. Firląg: Reliability analysis of specialized traffic control devices. Archives of transport, volume 19, issue 1-2, Warszawska Drukarnia Naukowa PAN, Warszawa, 2007 str. 75-82.
- [4] Kawalec P., Firląg K.: Synteza specjalizowanych układów sterowania ruchem drogowym w strukturach FPGA. Pomiar Automatyka Kontrola nr 7 bis'2006, Agenda Wydawnicza Stowarzyszenia SIMP, Warszawa, 2006, str. 8 - 10.
- [5] M. Leško, J. Guzik: Sterowanie ruchem drogowym. Sterowniki i systemy sterowania i nadzoru ruchu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
- [6] K. Firląg, P. Kawalec: Metodyka budowy specjalizowanych układów srd w językach opisu sprzętu. Politechnika Warszawska, Prace Naukowe - Transport, z.62, OWPW, Warszawa, 2007, str. 111-119.
- [7] W. Wawrzyński: Bezpieczeństwo systemów sterowania w transporcie. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom, 2004.
- [8] K. Ważyńska-Fiok: Podstawy teorii eksploatacji i niezawodności systemów transportowych. Wydawnictwo PW, Warszawa, 1993.