

KAWALEC Piotr<sup>1</sup>  
KRUKOWICZ Tomasz<sup>2</sup>

### **MODELOWANIE ZMIANY PROGRAMU SYGNALIZACJI ZA POMOCĄ HIERARCHICZNYCH GRAFÓW PRZEJŚĆ AUTOMATÓW SKOŃCZONYCH**

*Artykuł opisuje zagadnienia związane z modelowaniem zmiany programów sygnalizacji podczas realizacji opisu sterowników sygnalizacji świetlnej za pomocą języków opisu sprzętu. Zawarto w nim zagadnienia wymagań formalnych dla programów przejściowych, zagadnienie określenia liczby programów niezbędnych dla prawidłowego funkcjonowania sterownika oraz weryfikacji poprawności przyjętych założeń. Informacje przedstawione w artykule są oparte na projekcie algorytmu sterowania dla rzeczywistego skrzyżowania.*

### **MODELLING OF CHANGING CONTROL PROGRAM WITH HIERARCHIC GRAPHS OF FINITE STATE MACHINES**

*The paper describes problems of modelling of changing control program while describing traffic lights controllers with hardware description language. It discusses issues of formal requirements for interchange programs, determination of a number of programs necessary for proper controller operation as well as verification of assumptions. The baseline information for the paper was the design of traffic control algorithm for a real road crossing in Warsaw.*

#### **1. WSTĘP**

Stosowane współcześnie metody sterowania wymagają stosowania wielu programów sygnalizacji, które są przełączane podczas pracy sterownika. Także w przypadku sterowania jednoprogramowego konieczne jest opracowanie zasad rozpoczynania oraz kończenia pracy sterownika – tzw. programu startowego i programu końcowego. W sterownikach mikroprocesorowych zadanie zmiany programów jest realizowane przez warstwę oprogramowania systemowego, niezależnego od projektanta zajmującego się inżynierią i sterowaniem ruchem. Współczesne sterowniki mikroprocesorowe wyznaczają automatycznie programy przejściowe wykorzystywane do zmiany programów

---

<sup>1</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Sterowania Ruchem, Zespół Sterowania Ruchem Drogowym, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, tel. +48 22 234 75 85, e-mail: pka@it.pw.edu.pl

<sup>2</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Sterowania Ruchem, Zespół Sterowania Ruchem Drogowym, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, tel. +48 22 234 75 85, e-mail: tkr@it.pw.edu.pl

zasadniczych. Niektóre sterowniki w sposób automatycznych i niezależny od projektanta programy startowe oraz końcowe.

W przypadku sterowników realizowanych w reprogramowalnych strukturach logicznych zaprojektowanie właściwego algorytmu zmiany programów sygnalizacji spoczywa na projektancie. Sterowniki takie nie posiadają bowiem oprogramowania systemowego, a zapis wszystkich zadań realizowanych przez sterownik odbywa się w postaci hierarchicznego grafu przejść automatu synchronicznego (FSM).

## 2. PROGRAMY STEROWANIA

Według [2] programem sterowania jest określony w czasie sposób cyklicznego nadawania sygnałów dla poszczególnych uczestników ruchu. Definicja ta zawęża pojęcie programów sygnalizacji do programów cyklicznych, pomijając programy adaptacyjne, jak również programy startowe, końcowe bądź awaryjne. W teorii sterowania ruchem drogowym występuje pojęcie funkcji sterowania, jako jednoznacznego przyporządkowania stanów sygnalizatorów do kolejnych chwil czasu. Praktycznie stosowane pojęcie programu dotyczy funkcji sterowania ruchem zapisanej w pamięci sterownika. Sposób zapisu oraz ilość realizowanych programów zależy ściśle od budowy sterownika, niejednokrotnie, ze względu na ograniczenia urządzeń, konieczne jest zrealizowanie jednego programu w formie kilku, które są przełączane automatycznie przez sterownik.

Ze względu na sposób realizacji w grafach FSM programy sygnalizacji można podzielić na:

- cykliczne,
- sekwencyjne,
- adaptacyjne.

Programy cykliczne charakteryzują się dokładnie taką samą wartością funkcji sterowania w odstępach równych długościom cyklu. Programy sekwencyjne są realizowane jednokrotnie, po zaistnieniu zdarzenia w procesie sterowania. Przykładem mogą być program startowy – realizowany po włączeniu sterownika sygnalizacji oraz programy przejść międzyfazowych, realizowane po wystąpieniu określonego warunku w programie adaptacyjnym. Najbardziej złożonymi programami sygnalizacji są programy adaptacyjne, które zapisywane są w postaci algorytmów sterowania ruchem. Z punktu widzenia inżynierii ruchu poszczególne rodzaje programów można przyporządkować do sposobów realizacji w sposób przedstawiony w tabeli 1.

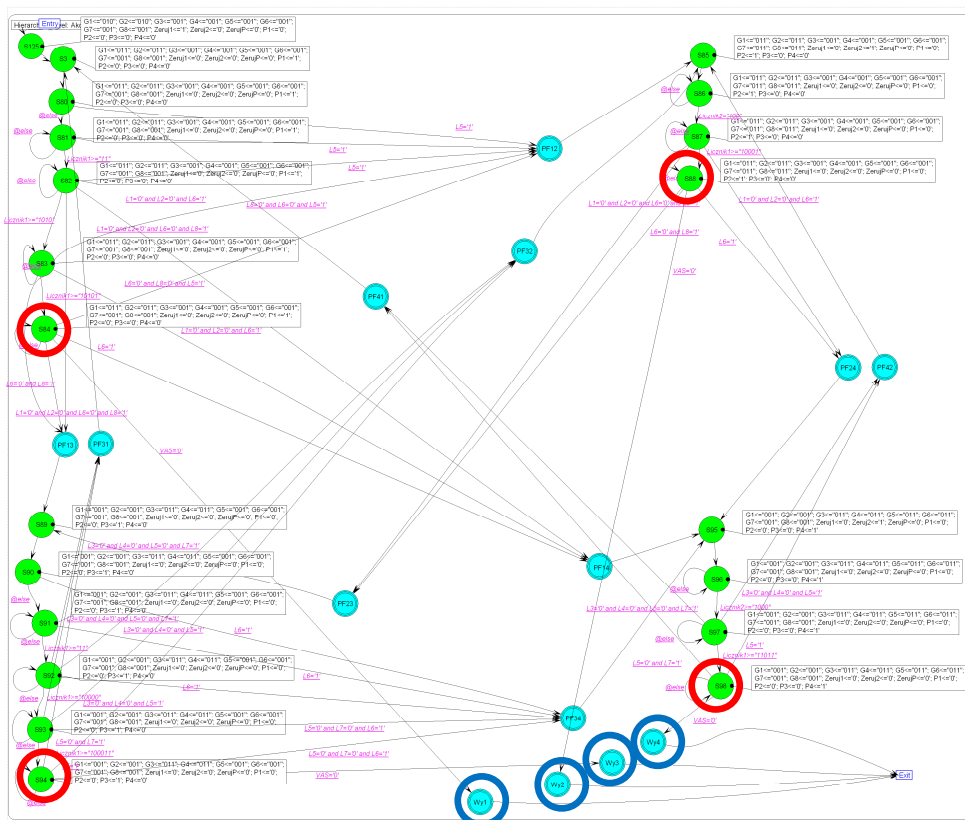
*Tab. 1. Realizacja programów sygnalizacji*

<b>Rodzaj programu – inżynieria ruchu</b>	<b>Sposób realizacji – graf FSM</b>
Program cykliczny	Program cykliczny
Program startowy	Program sekwencyjny
Program awaryjny	Program cykliczny
Program adaptacyjny	Program adaptacyjny
Program przejścia międzyfazowego	Program sekwencyjny lub program adaptacyjny



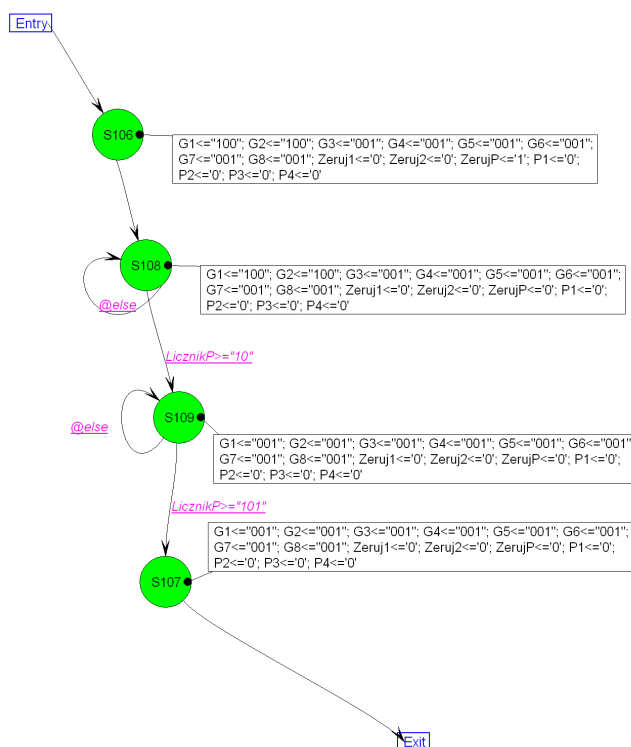
Rysunek 1 przedstawia najwyższy poziom hierarchii sterownika, który przedstawia przejścia pomiędzy następującymi stanami pracy:

- sygnalizatory ciemne,
- realizacja programu awaryjnego,
- przejście w tryb ogólnoczerwony,
- realizacja programu startowego,
- realizacja programu końcowego,
- realizacja programu adaptacyjnego,
- realizacja programu cyklicznego.



Rys.2. Graf sterownika sygnalizacji – poziom programu sterowania.

Na rysunku 2 przedstawiono adaptacyjny program sterowania. Za pomocą kolorowych okręgów przedstawiono stany grafu biorące udział w procedurze zmiany programu sygnalizacji. Przykładowy graf dla programu przejściowego, wykorzystywanego do zmiany programu sygnalizacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Graf sterownika sygnalizacji –najniższy poziom grafu hierarchicznego. Program przejściowy wykorzystywany do zmiany programu oraz trybu pracy sygnalizacji.

#### 4. WYZNACZENIE PROGRAMÓW PRZEJŚCIOWYCH DO ZMIANY PROGRAMÓW SYGNALIZACJI

W pracy sterownika można wyróżnić następujące okresy, w których wymagane jest zastosowanie programu przejściowego:

- uruchomienie sterownika – realizacja programu startowego,
- zakończenie pracy sterownika lub przełączenie na program ostrzegawczy – realizacja programu końcowego,
- zmiana programu sygnalizacji na inny program o tej samej strukturze,
- zmiana programu sygnalizacji na program o innej strukturze.

Wszystkie wymienione powyżej sytuacje wymagają opracowania specjalnego programu o charakterze programu sekwencyjnego.

Wymagania formalne dla takich programów określają przepisy [2]. Określają one wymagania związane z bezpieczeństwem:

- spełnienie minimalnych czasów międzyzielonych,
- zapewnienie właściwej sekwencji sygnałów,

- realizację minimalnych sygnałów dla poszczególnych grup sygnałowych.

Opracowana metoda wyznaczania takich programów powstała podczas realizacji projektu sterownika dla rzeczywistego skrzyżowania w Warszawie. W ramach metody przewidziano realizację następujących czynności:

1. Należy określić liczbę niezbędnych do opracowania programów startowych: dla każdej struktury programu sygnalizacji konieczne jest opracowanie odrębnego programu startowego, z wyjątkiem przypadku, w którym programy dla poszczególnych struktur mają wspólną fazę początkową.
2. Należy określić liczbę programów końcowych:
  - a) w pierwszym kroku wyznaczyć liczbę faz, w których możliwe jest zakończenie pracy programu sygnalizacji; każda faza, w której program może pozostawać przez nieokreślony czas (brak ograniczeń wydłużeń sygnałów zielonych) musi być fazą, w której możliwe jest zakończenie programu sygnalizacji; na rysunku 2 stany takie oznaczono czerwonymi okręgami,
  - b) następnie konieczne jest określenie liczby stosowanych na skrzyżowaniu struktur programów sygnalizacji i przeprowadzenie powyższych czynności dla wszystkich struktur programów sygnalizacji.
3. Należy określić, w jakich fazach dopuszczalna jest zmiana programu sygnalizacji na inny program sygnalizacji (warunkiem koniecznym jest, aby były to wszystkie fazy, w których możliwe jest nieograniczone przedłużanie sygnału zielonego) i od jakiej fazy powinna się rozpoczynać realizacja nowego programu.
4. W przypadku stosowania programów o różnych strukturach należy określić, w jakich fazach możliwa będzie zmiana programów konieczne jest, aby były to wszystkie fazy, w których możliwe jest podtrzymanie sygnału zezwalającego.

Po rozpatrzeniu ww. przypadków otrzymuje się liczbę koniecznych do przeanalizowania programów przejściowych:

$$P = s + \sum_{i=1}^s f_{ip} + \sum_{i=1}^s f_{ip}^2 + s \cdot (s-1) \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^s f_i \cdot f_j \quad (1)$$

gdzie: P – liczba programów przejściowych objętych analizą,

s – liczba struktur programu sygnalizacji,

$f_i$  – liczba faz sygnalizacyjnych w i-tej strukturze programu adaptacyjnego,

$f_{ip}$  – liczba faz w strukturze i, w których możliwe jest nieograniczone podtrzymanie sygnału zielonego.

Poszczególne składniki sumy odpowiadają liczbie programów przejściowych dla wymienionych wyżej stanów pracy sterownika. W toku prac możliwe jest zmniejszenie liczby programów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania sterownika, gdyż niektóre z nich mogą mieć identyczną postać. Możliwe jest również wprowadzenie przez projektanta dodatkowych programów przejściowych, które umożliwiają zmianę sposobu pracy sterownika wcześniej, niż w ostatnim stanie danej fazy. Rozwiązania takie są stosowane w sterownikach mikroprocesorowych. Stworzenie w języku opisu sprzętu takich programów jest możliwe poprzez:

- stworzenie dużej liczby dodatkowych programów przejściowych, uwzględniających wszystkie sytuacje, które mogą wystąpić w sterowniku podczas realizacji programów,

- zwiększenie liczby stanów w fazie oraz wprowadzenie dodatkowych warunków zabezpieczających przed przedwczesnym zakończeniem fazy w związku ze zmianą programu sygnalizacji.

## **5. REALIZACJA POMOCNICZYCH PROGRAMÓW STEROWANIA W JĘZYKACH OPISU SPRZĘTU**

Pomocnicze programy sterowania w językach opisu sprzętu zapisuje się w formie programów sekwencyjnych, a w szczególnych przypadkach programów adaptacyjnych (jeśli w trakcie realizacji programu badane są warunki). Programy sekwencyjne mogą być realizowane z wykorzystaniem metod „krok po kroku” lub „przedział po przedziale”. Przykładowy program pomocniczy przedstawiono na rysunku 3. Został on zrealizowany metodą „przedział po przedziale”, w grafie tego programu jedynym badanym warunkiem są warunki czasowe.

Dla ułatwienia czytelności programy pomocnicze powinny być realizowane w innym poziomie hierarchii niż algorytm sterowania ruchem. Na rysunku 2 programy przejściowe, wykorzystywane do kończenia pracy sterownika sygnalizacji oraz do zmiany programów, oznaczono okręgami koloru niebieskiego.

Poza wymienionymi wyżej zasadami zapis programów pomocniczych nie różni się w jakikolwiek sposób od metod opisywanych w literaturze [1].

## **6. WNIOSKI**

Podczas projektowania sterowników sygnalizacji pracujących w oparciu o programowalne struktury logiczne konieczne staje się uwzględnienie zagadnień związanych ze zmianą programów oraz trybu pracy sterowników. W sterownikach mikroprocesorowych problemy te są realizowane przez system operacyjny sterownika, bądź oprogramowanie dostarczane przez producenta.

Podczas projektowania konieczne jest przeanalizowanie wszystkich sytuacji, w których może wystąpić potrzeba zmiany programu. Zadanie to spoczywa na projektancie, gdyż nie ma narzędzi pozwalających na jego automatyzację. Ułatwieniem w projektowaniu sterowników jest stosowanie edytorów grafów przejść automatów skończonych (FSM), jednak uzasadnione jest prowadzenie prac nad automatyzacją procesu wyznaczania programów przejściowych. Wyznaczanie tych programów nie wymaga stosowania zaawansowanych metod obliczeniowych. Natomiast ze względu na liczbę sytuacji, które powinny być poddane analizie powierzenie tego zadania narzędziom wspomagania komputerowego wydaje się być zasadne.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- [1] Firląg K., Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, Zeszyt 77, Projektowanie i realizacja specjalizowanych sterowników ruchu drogowego w reprogramowalnych strukturach logicznych, Warszawa, 2011
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz. U. 220

poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003 r. z późn. zm.), Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, Warszawa, 2003-2011

- [3] Szatkowski M., Materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Sterowanie ruchem drogowym I, prace niepublikowane, Warszawa, 2004