

## PROJEKTOWANIE STAŁOCZASOWEJ WIELOPROGRAMOWEJ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ NA PODSTAWIE BADAŃ EMPIRYCZNYCH

### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano problematykę sterowania ruchem na skrzyżowaniach potoków ruchu samochodowego i pieszego. Zwrócono uwagę na zagadnienie kolizyjności skrzyżowań i zagrożenia dla bezpieczeństwa uczestników ruchu. Zaproponowano rozwiązanie dedykowane niewielkim skrzyżowaniom o znacznej, powtarzalnej, zmienności natężenia. Metoda opiera się na algorytmie ewolucyjnym, którego rozwiązaniem jest plan pracy sygnalizacji świetlnej podczas całego cyklu podzielonego na fazy. Informacje o ruchu na skrzyżowaniu w różnych porach doby stanowią kluczowe dane wejściowe do obliczeń. Są one gromadzone podczas standardowych badań natężenia ruchu.

### WSTĘP

W miejscach krzyżowania się potoków ruchu (samochodowego, kolejowego lub pieszego) sygnalizacja świetlna (SŚ) pełni funkcje regulujące i ostrzegawcze. Funkcję regulującą SŚ spełnia najczęściej poprzez rozdzielanie kolidujących potoków w czasie. Dzięki temu uzyskuje się redukcję punktów kolizyjnych bez konieczności przebudowy skrzyżowania, przy względnie niskich kosztach inwestycyjnych. Negatywnym efektem tej metody jest obniżenie przepustowości skrzyżowania. Podstawowym problemem optymalizacyjnym jest więc poszukiwanie takiego programu SŚ, dla którego następuje możliwie najmniejsza liczba punktów kolizyjnych oraz największa przepustowość.

Zmiennymi decyzyjnymi podczas projektowania SŚ są:

- struktura programu – liczba faz i potoki ruchu uruchomione podczas każdej fazy,
- charakterystyka czasowa programu – czas trwania cyklu i poszczególne fazy.

Projekt SŚ musi uwzględniać, oprócz ustalonej organizacji skrzyżowania (budowa dróg, sposób sterowania ruchem przed wdrożeniem innowacji), również dynamikę natężenia ruchu w skali doby, tygodnia, czasem nawet roku (na przykład okresy wakacji i świąt). Istotnym czynnikiem jest również liczba wypadków i kolizji, które miały miejsce w rejonie skrzyżowania.

Wskazane problemy podzielić można na trzy grupy:

1. czynniki wpływające na bezpieczeństwo kierowców,
2. czynniki wpływające na bezpieczeństwo pieszych,
3. czynniki wpływające na komfort użytkowników skrzyżowania.

Sposób zmniejszenia zagrożeń we wszystkich trzech grupach jest głównym tematem tej pracy. Ponadto głównym priorytetem jest zapewnienie jak największego bezpieczeństwa najmłodszym użytkownikom skrzyżowania. Jest to ważne ponieważ Polska znajduje się aktualnie w grupie państw Unii Europejskiej, z największym zagrożeniem dla pieszych uczestników ruchu drogowego [6], [7].

Zgromadzenie odpowiednich danych wejściowych dla procesu projektowania SŚ sterującego ruchem na skrzyżowaniu odbywa się na drodze badań empirycznych natężenia ruchu, oceny technicznej skrzyżowania, analizy statystyki zdarzeń.

W artykule przedstawiono model optymalizacji planu pracy SŚ, który przetestowano na rzeczywistym skrzyżowaniu w Szczecinie. W tym celu wykonano niezbędne pomiary natężenia ruchu. Charakter dynamiki ruchu może wskazywać na konieczność zaprojektowa-

nia SŚ, którego program będzie zmienny. W artykule rozważa się rozwiązania wieloprogramowe.

### 1. PRZEGLĄD LITERATURY

Do najskuteczniejszego sposobu poprawy bezpieczeństwa na skrzyżowaniu, należy jego przebudowanie, na skrzyżowanie wielo-poziomowe, pozbawione punktów kolizji. Jest to jednak proces kosztowny, długotrwały i uciążliwy dla okolicznych mieszkańców. W celach pogodzenia interesów różnych grup (użytkowników dróg, lokalnych mieszkańców, władz) stosuje się środki uspokajania ruchu. Należą do nich między innymi: zwężanie pasów ruchu, przesunięcie wlotów skrzyżowań czy przebudowa skrzyżowań na mini ronda [8]. Jednak ponownie są to sposoby wymagające dużych nakładów finansowych, oraz znacznej ilości czasu. W przypadku budowy mini rond, jest to proces najszybszy z wyżej wymienionych i niekoniecznie drogi, ale według badań przytoczonych w [8], stosowanie rond nie zmniejsza ilości zdarzeń, a jedynie ich ciężkość. Jednak, ze względu na bezpieczeństwo pieszych w wieku szkolnym i młodszym, zmniejszenie ciężkości zdarzeń jest najwyżej tak samo ważne jak ograniczenie częstości ich występowania.

Rozwiązaniem pozwalającym znacznie zredukować punkty kolizyjne na skrzyżowaniu i w efekcie również zmniejszyć liczbę zdarzeń jest czasowe blokowanie wybranych potoków ruchu za pomocą sygnalizacji świetlnej. Koszt inwestycji w takie rozwiązanie jest umiarkowany, zaś jej montaż, nie jest zbyt uciążliwy dla mieszkańców. Skuteczność sygnalizacji świetlnej jest jednak zależna od doboru szeregu zmiennych sterujących. Zgodnie z [12] przed zastosowaniem sygnalizacji świetlnej należy zebrać następujące dane:

- informacje o istniejącym i przewidywanym natężeniu ruchu pojazdów w kilku wybranych charakterystycznych okresach doby oraz tygodnia,
- informacje o natężeniu i charakterze ruchu pieszego.

Przeгляdu literatury z zakresu projektowania systemów sterowania ruchem drogowym dokonano w artykule [2], gdzie przytoczonych jest wiele sposobów kontroli systemu sygnalizacji świetlnej, opierających się na metodach teoretycznych. Najbardziej zaawansowanymi rozwiązaniami są systemy rejestrujące stan otoczenia, generujące optymalne rozwiązania i uczące się na podstawie obserwacji skutków wprowadzanych rozwiązań.

Autor klasycznej pozycji [9] charakteryzuje systemy świateł o stałych cyklach działania.

Pierwsze zastosowanie algorytmów genetycznych w optymalizacji sygnalizacji świetlnej, przedstawił Foy [4], jako zmienne decyzyjne uznając czas trwania światła zielonego oraz czas trwania fazy. Algorytmy genetyczne zostały zaproponowane również do jednoczesnej optymalizacji wszystkich czterech parametrów czasowych sygnalizacji tj. długości cyklu, czasów między zielonych, czasu trwania danej fazy oraz sekwencji fazowych [10].

W artykułach [11], [3], [13] zostały zastosowane połączenia algorytmów genetycznych z istniejącymi już narzędziami, między innymi modelem CORSIM, w celu optymalizacji sygnalizacji świetlnej. Autorzy dążą generalnie do wysoce dokładnego modelu ruchu optymalizowanego pod względem przepustowości.

Autorzy [14] i [15] wskazali, że operatory genetyczne pozwalają sprawniej sterować sygnalizacją świetlną niż metodą klasyczną. Metody klasyczne zostały zdefiniowane jako modele bazujące tylko na czujnikach ruchu i na zasadzie kolejki FIFO. Ponadto udowodniono też na podstawie badań, iż systemy akomodacyjne sterowane z wykorzystaniem algorytmów genetycznych sprawują się o 33% lepiej od standardowej sygnalizacji stałoczasowej.

Autorzy artykułu [5] zwracają uwagę na szerokie zastosowanie algorytmów genetycznych oraz tak zwanej "inteligencji roju" w optymalizacji bezpieczeństwa przy użyciu systemu sygnalizacji świetlnej. Zwracają jednak uwagę na fakt, iż większość metod, może być zastosowana tylko w jednym konkretnym przypadku. Ich praca traktuje o połączeniu dwóch wspomnianych metod, w celu uzyskania uniwersalnego algorytmu optymalizacyjnego.

W artykule [1] podkreśla się wagę badań nad usprawnianiem sygnalizacji świetlnej, powiązując ten problem z rosnącą kongestią w miastach. Zauważono, że metody matematyczne radzą sobie lepiej, niż metody korzystające z stosowania kamer i czujników. Zwrócona zostaje uwaga na problem niestabilności modeli obliczeniowych, przy dużej liczbie zmiennych.

## 2. MODEL OBLICZENIOWY

Danych jest  $n$  potoków ruchu przepływających przez skrzyżowanie. Każdy potok zaklasyfikowany jest do jednej z dwóch kategorii: ruch kołowy albo ruch pieszy. Dla ustalonej daty oraz przedziału godzin określone jest natężenie każdego potoku:  $q_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ . Każde natężenie odniesione jest do odcinka czasu o tej samej ustalonej długości. Wygodnie jest posługiwać się godziną, lub kwadranssem (w przypadku potrzeby szczegółowej analizy, lub bardzo zmiennego natężenia).

Dla ustalonego stanu organizacji ruchu na skrzyżowaniu między potokami ruchu mogą występować punkty kolizyjne. Punkty te mogą być zaliczone do jednej z trzech klas (Rys. 2):

- punkty wyłączenia – potoki ruchu rozdzielają się,
- punkty włączenia – potoki ruchu łączą się,
- punkty przecinania – potoki ruchu przecinają się.

Każdy punkt kolizyjny jest jednoznacznie zdefiniowany przez parę numerów tworzących go potoków ( $i,j$ ). Dla każdego punktu kolizyjnego definiuje się dwa rodzaje wag:

- zależne od klas kolizyjnych potoków ruchu:
  - jeden z potoków jest potokiem ruchu pieszego:  $V_{ij}^1 = 1$ ,
  - obydwa są potokami ruchu samochodowego:  $V_{ij}^1 = 0,8$ ,
  - potoki nie kolidują:  $V_{ij}^1 = 0$ ,
- zależne od klasy punktu kolizyjnego:
  - potoki krzyżują się:  $V_{ij}^2 = 1$ ,
  - potoki łączą się:  $V_{ij}^2 = 0,6$ ,
  - – potoki rozdzielają się lub nie kolidują  $V_{ij}^2 = 0$ .

Obydwa rodzaje wag można przedstawić w postaci macierzy kwadratowych  $n \times n$ :  $V^1, V^2$ .

Macierz wag punktów kolizyjnych nazywa się tablicą utworzoną według wzoru:

$$W = (W_{i,j})_{n \times n}, \quad W_{i,j} = V_{i,j}^1 \cdot V_{i,j}^2 \quad (1)$$

### 2.1. Zmienne decyzyjne

Problem decyzyjny sprowadza się do podzielenia zbioru potoków ruchu na pewną ustaloną liczbę parami rozłącznych podzbiorów. Każdy podzbiór obejmuje potoki uruchamiane równocześnie w odrębnej fazie cyklu pracy sygnalizacji świetlnej. Dla liczby faz  $F$  plan pracy sygnalizacji reprezentuje macierz binarna  $P \in M(n \times F, \{0,1\})$  nazywana planem cyklu sygnalizacji. Kolumny macierzy  $P$  odpowiadają fazom cyklu, wiersze odpowiadają potokom ruchu.  $P_{i,f} = 1$  oznacza, że  $i$ -ty potok jest uruchomiony podczas fazy  $f$ .

### 2.2. Kryteria decyzyjne

Proponowany model ma charakter dwukryterialny. Pierwszym kryterium jest minimalizacja kolizyjności planu  $P$ , wyznaczonej według formuły:

$$K(P) = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \cdot P_{i,f} \cdot P_{j,f}}{n^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

Można zauważyć, że  $K(P)$  zawiera się w przedziale  $[0,1]$ .

Drugie kryterium dąży do grupowania potoków o zbliżonych natężeniach ruchu w ramach każdej fazy. Wskaźnik rozrzutu natężeń potoków w fazie  $f$  wyznacza się jako odchylenie standardowe z próby:

$$\eta_f(P) = \begin{cases} \sqrt{n^{-1} \cdot \max\{q_i\}^{-2} \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_{i,f}\right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{i,f} \cdot q_i - \bar{q}_f)^2}, & \text{gdy } \sum_{i=1}^n P_{i,f} > 0 \\ 1, & \text{gdy } \sum_{i=1}^n P_{i,f} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie  $\bar{q}_f$  jest średnią wartością natężenia potoków otwartych w danej fazie.

Wskaźnik (3) przyjmuje wartości z przedziału  $[0,1]$ . Przypadek, gdy danej fazie nie przypisano żadnego potoku jest niepożądany i obarcza się go karą w postaci zawyżonej wartości wskaźnika rozrzutu. Suma wskaźników wyznaczonych dla wszystkich faz jest matematycznym przedstawieniem drugiego kryterium:

$$N(P) = \frac{1}{F} \cdot \sum_{f=1}^F \eta_f(P) \rightarrow \min \quad (4)$$

Funkcja  $N(P)$  jest unormowana i przyjmuje wartości z przedziału  $[0,1]$ .

### 2.3. Ograniczenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych

Plan pracy sygnalizacji świetlnej musi zostać tak ułożony aby każdy potok ruchu był przynajmniej raz uruchomiony podczas cyklu. W proponowanym modelu przyjmuje się więc następujące ograniczenie:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\} : \sum_{f=1}^F P_{i,f} \geq 1 \quad (5)$$

Model można uprościć wprowadzając wymóg występowania dokładnej jednej jedynek w każdym wierszu macierzy  $P$ , co odwzorowuje sytuację, gdy każdy potok zostaje uruchomiony podczas tylko jednej fazy cyklu.

Zakłada się, że wszystkie fazy sygnalizacji są wykorzystane, czyli:

$$\forall f \in \{1, 2, \dots, F\} : \sum_{i=1}^n P_{i,f} \geq 1 \quad (6)$$

Ograniczenie to zostało przekształcone do postaci kary nałożonej na wartość kryterium decyzyjnego (4).

**2.4. Parametry modelu**

Parametrami wejściowymi modelu obliczeniowego są natężenia potoków ruchu  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , macierz wag punktów kolizyjnych skrzyżowania **W** oraz liczba  $F$  faz pracy świateł w cyklu.

Natężenia potoków określane są empirycznie dla ustalonego przedziału godzin w dobie oraz ustalonych dni w tygodniu oraz w roku.

**2.5. Metoda rozwiązania zadania optymalizacyjnego**

Problem ma charakter kombinatoryczny. Jest to przesłanka dla zastosowania algorytmu ewolucyjnego do poszukiwania rozwiązań optymalnych. Osobnikiem jest plan cyklu pracy sygnalizacji świetlnej. Liczba faz jest ustalona. Dane są również wartości parametrów modelu. Algorytm wykorzystuje następujące operatory genetyczne:

- generowanie pierwszego pokolenia – pierwsze osobniki są losowymi macierzami binarnymi, które spełniają ograniczenie (5),
- ocena przystosowania osobników – na podstawie funkcji celu:

$$Q(\mathbf{P}) = \omega \cdot K(\mathbf{P}) + (1 - \omega) \cdot N(\mathbf{P}) = \omega \cdot n^{-2} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \cdot P_{i,f} \cdot P_{j,f} + (1 - \omega) \cdot \frac{1}{F} \cdot \sum_{f=1}^F \eta_f(\mathbf{P}) \rightarrow \min, \quad \omega \in [0, 1] \quad (7)$$

gdzie  $\omega$  jest wagą kryterium minimalizacji kolizyjności planu **P**,

- selekcja osobników – osobniki-rodzice wybierane są z populacji metodą ruletki, z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do odwrotności przystosowania,
- krzyżowanie osobników – wyznaczany jest losowy numer z przedziału  $c=[1, n-1]$ , osobnik-potomek jest reprezentowany przez macierz planu cyklu sygnalizacji, której wiersze o numerach  $1, 2, \dots, c$  są skopiowane od rodzica 1, natomiast wiersze o numerach  $[c+1, c+2, \dots, n]$  skopiowane są od rodzica 2. Liczba generowanych potomków jest mniejsza od populacji o liczbę jednostek elitarnych – najlepiej przystosowanych osobników, którzy są bezpośrednio kopiowani do następnego pokolenia,
- mutacja potomków – operator uruchamiany z ustalonym prawdopodobieństwem. Mutacja polega na wylosowaniu wiersza

macierzy **P** (potoku ruchu) i numeru kolumny (fazy) do której przemieszczone zostaje uruchomienie potoku.

**2.6. Wykorzystanie rozwiązania optymalnego**

Wynikiem działu algorytmu ewolucyjnego jest osobnik najlepiej przystosowany w ciągu zadanej liczby pokoleń. Parametry działania algorytmu dobierane są w taki sposób aby otrzymywane rozwiązania spełniało warunek wykorzystania wszystkich  $F$  faz cyklu. Główny wpływ na osiągnięcie tego efektu ma waga  $\omega$  zastosowana w funkcji celu (7). Zmniejszanie wartości wagi skutkuje wzrostem znaczenia kryterium minimalizacji odchyżeń standardowych natężeń ruchu w węzłach uruchamianych jednocześnie. Równocześnie silniejszy jest wpływ kary za niewykorzystanie którejkolwiek fazy w cyklu.

Model nie zakłada ustalonych czasów trwania faz. Aby w pełni zaplanować pracę sygnalizacji świetlnej należy określić czasy trwania faz. Czas dla każdej fazy jest określany dla ustalonego planu, na podstawie natężenia otwartych potoków. Dla ustalonej długości cyklu  $T_c$  wyrażonego w sekundach korzysta się z formuły:

$$\forall f \in \{1, 2, \dots, F\} : T_f = \max \left\{ 5, \frac{qsrf}{\sum qsrf} \cdot T_c \right\}, \quad qsrf = \left( \sum_{i=1}^n P_{i,f} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n P_{i,f} \cdot q_i \quad (8)$$

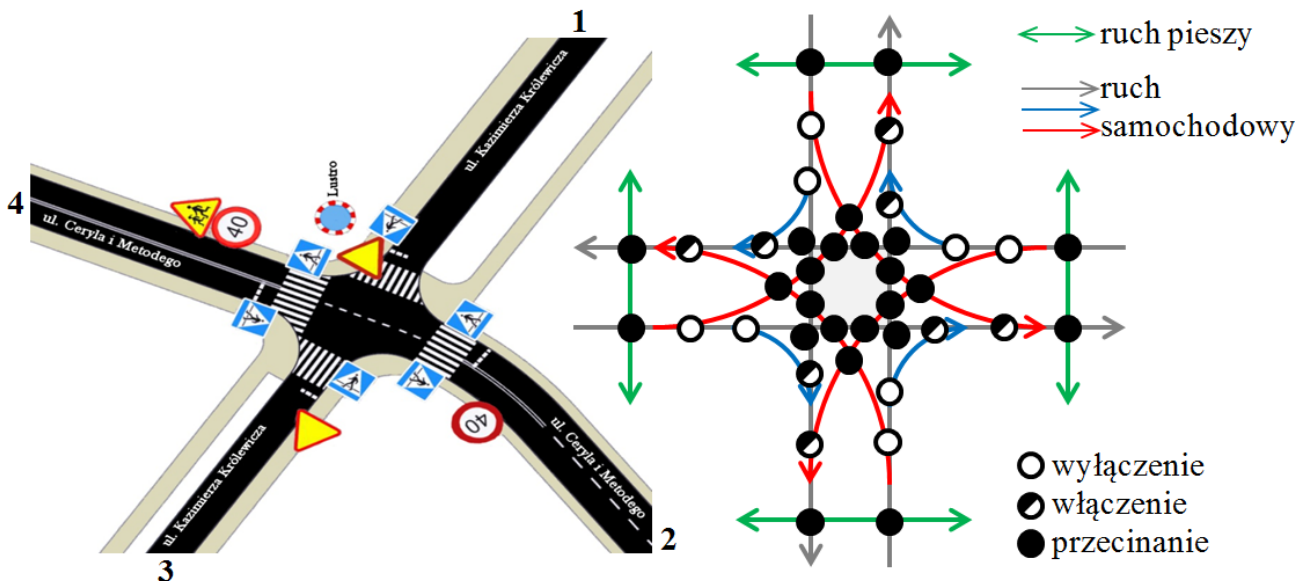
Z założenia projektowany plan pracy sygnalizacji świetlnej ma charakter wieloprogramowy. Każdy program jest rozwiązaniem optymalnym dla pewnego przedziału czasu podczas doby. W ustalonych chwilach cykl jednego programu dobiega końca i system przełącza się na kolejny program rozpoczynając jego pierwszy cykl.

**3. PRZYKŁADOWA ANALIZA**

**3.1. Charakterystyka skrzyżowania**

Wybrany element infrastruktury jest skrzyżowanie ulicy Świętych Cyryla i Metodego z ulicą Kazimierza Królewicza w Szczecinie. Natężenie ruchu na skrzyżowaniu jest znaczne (szczególnie w okresie powakacyjnym) z racji tego, iż bezpośrednio przy nim znajduje się złobek. Ponadto w niedalekiej odległości od skrzyżowania znajduje się Szkoła Podstawowa nr 41 im. M. Goliaża. Skrzyżowanie leży też na trasie, dwóch linii autobusowych dziennych oraz dwóch linii nocnych.

Ulice są dwukierunkowe dwupasmowe, więc skrzyżowanie ma cztery wloty i wyloty. Wokół skrzyżowania są przejścia dla pieszych.



Rys.1. Schemat wybranego skrzyżowania i punkty kolizyjne



5. Garcí'a-Nieto J., Alba E., Carolina Olivera A., Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2)2012, 274-283.
6. Jamroz K., Kaczmarek J., Jak zmniejszyć poziom ryzyka pieszych w ruchu drogowym w Polsce? *Transport Miejski i Regionalny* (07-08)2006, 40-47.
7. Kaup M., Filina-Dawidowicz L., Klapczyński Ł., Rozwój infrastruktury transportu drogowego w województwie wielkopolskim w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony środowiska. *Logistyka* 6/2013, 848-857.
8. Macioszek E., Analiza porównawcza wybranych środków technicznych stosowanych w uspokojeniu ruchu na skrzyżowaniach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 1835(2011), 55-62
9. Miller A.J., Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals. *Journal of the Operational Research Society* 14(4)1963, 373-386.
10. Park, B.B., Messer, C.J., Urbanik, T.II., Traffic signal optimization program for oversaturated conditions – genetic algorithm approach. *Transportation Research Record*, (1683)1999, 133-142.
11. Roupail N., Park B., and Sacks J., Direct Signal Timing Optimization: Strategy Development and Results. In: *XI Pan American Conference in Traffic and Transportation Engineering*, Gramado, Brazil, 2000.
12. 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.2003.220.2181
13. Stevanovic J., Stevanovic A., Martin P.T., Bauer T., Stochastic optimization of traffic control and transit priority settings in VISSIM. *Transportation Research Part C*, 16(3)2008, 332-349.
14. Topolska K., Topolski M., Optymalizacja i niezawodność inteligentnych systemów sterowania ruchem drogowym. *Journal of KONBiN* 4(20)2011, 133-139.
15. Topolska K., Topolski M., Błachut B., Haber M., Piekarz A., Zastosowanie fuzji klasyfikatorów rozmytych i genetycznych w zadaniu sterowania sygnalizacją świetlną. *Biuletyn Naukowy Wrocławskiej Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej*, (2)2012, 30-33.

*mation about traffic on junction in different times of the day pose entrance key data for calculations. They are collected during standard research of traffic intensity.*

Autorzy:

**Iwańkiewicz Remigiusz** - Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Al. Piastów 41, 71-065 Szczecin. Tel: +48 91 449-41-80

**Taraska Michał** - Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Al. Piastów 41, 71-065 Szczecin.

## DESIGNING OF FIXED-TIME MULTI-PLAN TRAFFIC LIGHTS SYSTEM ON THE BASIS OF EMPIRICAL RESEARCH

### *Abstract*

*The article describes the problems of traffic control at the crossroads of streams of automotive traffic and pedestrian. Attention was drawn to the issue of collisions at junctions and the danger for safety of road traffic participants. We proposed a solution dedicated for small junctions with significant, repeatable, variability of intensity. The method is based on evolutionary algorithm whose solution is a traffic lights work plan during whole cycle divided into separate phases. Infor-*