Niezawodność i bezpieczeństwo 2019

Skrypt do zajęć ćwiczeniowych.

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, kierunek Transport, studia drugiego stopnia, semestr I

Dr inż. Rafał Kucharski Zakład Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska rkucharski@pk.edu.pl

# Organizacja i warunki zaliczenia

* Ćwiczenia odbywają się co dwa tygodnie w formie audytoryjnej.
* Ćwiczenia wykonywane są w grupach maksymalnie trzyosobowych.
* Ćwiczenie jest zaliczone po wykonaniu go na zajęciach, zaakceptowaniu przez prowadzącego i oddaniu sprawozdania (wykonywane na bieżąco w trakcie zajęć).
* Każda grupa ćwiczeniowa oddaje jedno sprawozdanie (wzory załączone poniżej).
* Dopuszczalna jest jedna nieobecność na ćwiczeniu. Za nieobecność uznaje się brak przekazanego sprawozdania.
* Do przeprowadzenia ćwiczenia wymagany jest własny komputer (jeden na grupę ćwiczeniową) i model podróży (wykonany na semestrze 6 w ramach ćwiczeń projektowych z przedmiotu PST).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | tygodnie parzyste | | |
| 1 | ~~28 luty~~ | ~~Wprowadzenie~~ | 1 | 06.03.2019 | Wprowadzenie |
| 2 | ~~14 marzec~~ | ~~Ćwiczenie 1~~ | 2 | 20.03.2019 | Ćwiczenie 1 |
| 3 | ~~28 marzec~~ | ~~Ćwiczenie 2~~ | 3 | 03.04.2019 | Ćwiczenie 2 |
| 4 | ~~11 kwiecień~~ | ~~Ćwiczenie 3~~ | 4 | 17.04.2019 | Ćwiczenie 3 |
| 5 | ~~25 kwiecień~~ | ~~Ćwiczenie 4~~ | 5 | 15.05.2019 | Ćwiczenie 4 |
| 6 | ~~9 maj~~ | ~~Ćwiczenie 5~~ | 6 | 29.05.2019 | Ćwiczenie 5 |
| 7 | ~~23 maj~~ | ~~Ćwiczenie 6~~ | 7 | 12.06.2019 | Ćwiczenie 6 |
| 8 | ~~6 czerwiec~~ | ~~termin zapasowy~~ | 8 | 26.06.2019 | termin zapasowy |

# Wstęp teoretyczny i dane wejściowe

* Skrypt zawiera wstęp teoretyczny i ćwiczenia.
* Ćwiczenia wykonywane będą przez studentów w trakcie zajęć.
* Poniższe ćwiczenia dotyczą niezawodności na przykładzie miejskich sieci transportowych. Tematyka bezpieczeństwa poruszana jest na zajęciach projektowych, na ćwiczeniach tematyką jest niezawodność.
* Do ćwiczeń wymagany jest Modelu Ruchu wykonany na przedmiocie PST na semestrze 6.

#### Sieć transportowa

Siecią transportową nazywamy zbiór węzłów *nN,* oraz odcinków *aA*, tworzących graf skierowany *G(N,A).* W odniesieniu do sieci drogowej węzły reprezentują skrzyżowania (*Nodes)*, a odcinki to odcinki uliczne łączące węzły *(Links)*.

#### Model ruchu

Model ruchu *M* składa się z:

* sieci transportowej *G(N,A)*,
* więźby ruchu *Qij*
* wyników rozkładu ruchu wyrażonych w postaci:
  1. potoków pojazdów na ścieżkach q*k*,i/lub
  2. potoków pojazdów na każdym z odcinków *qa*

Oznaczać go będziemy jako *q=M(G,Q)* i rozumieć jako obliczenie działające na sieci *G* i więźbie ruchu *Q*, dostarczające informacje o obciążeniu sieci ruchem *q.*

Model ruchu *M* to plik *.ver* przygotowany na zajęciach z PST, graf *G* to układ drogowy, a więźba *Q* to obliczona na podstawie modelu popytu więźba ruchu używana w programie. Wyniki modelowania, czyli potoki *q* otrzymujemy na podstawie procedury rozkładu ruchu *PrT Assignment*, każda zmiana w grafie, lub w więźbie wymaga obliczenia ścieżek na nowo procedurą rozkładu ruchu.

Dane wejściowe do obliczeń otrzymujemy z modelu na podstawie atrybutów elementów sieci dla odcinków *links,* lub ścieżek *PrTPaths*:

* + potoki pojazdów *qa* otrzymujemy z parametru *VolVehPrT(AP)* (w ciągu godziny szczytu popołudniowego)
  + długość odcinka to parametr *Length*,
  + prędkość w ruchu swobodnym to *v0*, po obciążeniu potokiem *qa* to *vcur*
  + prędkość w ruchu swobodnym to *t0*, po obciążeniu potokiem *qa* to *tcur*

## Odczytanie wskaźników sieciowych. Minimalne cięcie grafu.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

## Analiza wyników rozkładu ruchu

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| odcinek: | atrybut | nr | wartość |
| o największym potoku | *VolVehPrT(AP)* |  |  |
| o największym stopniu wykorzystania przepustowości | *VolCapRatio* |  |  |
| o najdłuższym czasie przejazdu | *tCur(C)* |  |  |
| o najniższej prędkości | *vCur(C)* |  |  |
|  |  |  |  |
| liczba odcinków o stopniu wykorzystania przepustowości powyżej 75% | | | |
|  | | | |
|  |  |  |  |
| węzeł: | atrybut | nr | wartość |
| o największym potoku | *VolVehPrT(AP)* |  |  |
|  |  |  |  |
| relacja skrętna: | atrybut | nr (From, Via, To) | wartość |
| o największym potoku | *VolVehPrT(AP)* |  |  |
|  |  |  |  |
| element: | Z | Do | Wartość |
| więźby ruchu o największym potoku |  |  |  |
| macierzy kosztów o najdłuższym czasie przejazdu |  |  |  |
| macierzy kosztów o najdłuższym wydłużeniu czasu przejazdu |  |  |  |
| macierzy kosztów o największej pracy przewozowej |  |  |  |

### Wyznaczanie całkowitych kosztów podróży w sieci transportowej: czasu (pojazdo-godzin) i przemieszczenia (pojazdo-kilometrów)

Dla modelu ruchu *q=M(G,Q)* oblicz całkowite koszty przemieszczeń *C* wyrażone w:

* pojazdo-godzinach, wyrażają całkowity czas przemieszczeń;
* pojazdo-kilometrach, wyrażają całkowite przemieszczenie (pokonany dystans).

Koszty te mogą być obliczone na dwa równoważne sposoby:

* jako suma kosztów wszystkich ścieżek *kK:* 

, gdzie *c(k)* to koszt danej ścieżki, np. jej czas *ta*, lub długość *la*, a *qk* to potok pojazdów na tej ścieżce.

* jako suma kosztów wszystkich odcinków w sieci *aA:* ,

, gdzie *ca* to koszt przejazdu danego odcinka, np. czas *ta*, lub długość *la*, a *qa* to potok pojazdów na tym odcinku.

Na podstawie prac przewozowych i liczby podróży *N* określ podstawowe wskaźniki dla sieci:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parametr | *symbol* | *wartość* |
| liczba podróży | *N* |  |
| pojazdokilometry | *Dtot* |  |
| pojazdogodziny | *Ttot* |  |
| średnia prędkość | *Dtot/Ttot* |  |
| średnia długość podróży | *Dtot/N* |  |
| średni czas podróży | *Ttot/N* |  |

### Minimalne cięcie grafu

Cięciem grafu nazywamy podzbiór odcinków grafu, który dzieli graf na dwie rozłączne części (podgrafy). W odniesieniu do sieci transportowej, cięciem będzie taki zbiór odcinków, który dzieli sieć na dwie części pomiędzy którymi nie ma połączeń (metoda szukania najkrótszej ścieżki nie znajduje połączeń). W ćwiczeniu tym należy zidentyfikować linie cięcia sieci na dwa rozłączne grafy i wybrać cięcia najmniejsze (wąskie gardła). Naturalnymi cięciami sieci transportowej są przeszkody przestrzenne: rzeki, kolej, autostrady, które przecina niewielka ilość połączeń (mostów/tuneli/przejazdów).

W sieci transportowej cięcia rozpatruje się z punktu widzenia pary źródło-cel *ij* i jej ścieżek *kij.* Cięciem, w tym ćwiczeniu, niech będzie taki podzbiór *cij={a:aA}* odcinków grafu, który ma niepuste przecięcie z każdą ścieżką **. Innymi słowy należy znaleźć taki zbiór odcinków, który przetnie wszystkie ścieżki *kij.* Zbiór wszystkich cięć nazwijmy *Cij={cij}*, w tym zbiorze interesuje nas cięcie minimalne **, czyli (w zależności od przyjętej heurystyki):

1. najmniej liczne (zawierające najmniej odcinków) **
2. o najmniejszej sumarycznej przepustowości **

Dla zadanego modelu ruchu *q=M(G,Q)*, określ parę źródło-cel *ij* o największej liczbie podróży . Przeanalizuj możliwe ścieżki *kij* i na ich podstawie określ minimalne cięcie grafu ze względu na parę *ij* pod kątem kryterium (a) liczności i (b) przepustowości.

|  |  |
| --- | --- |
| Cięcie grafu | |
| Odcinki |  |

## Identyfikacja wrażliwych elementów sieci

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

Dla zadanego modelu ruchu *q=M(G,Q)* zidentyfikuj odcinki sieci transportowej potencjalnie wrażliwe **, czyli takie których niesprawność spowoduje znaczne zwiększenie kosztów przemieszczeń *C.* Odcinki *w* mogą być identyfikowanena podstawie następujących kryteriów (Tampere, 2007):

1. intuicyjnych, wskaż odcinek którego zamknięcie według Ciebie spowoduje największe utrudnienia.
2. Na podstawie warunków ruchu np.:
   1. kryterium największego potoku:

 ;

* 1. kryterium największego wydłużenia czasu:

, gdzie to przepustowość odcinka *a*;

* 1. kryterium największego wydłużenia czasu:



1. Na podstawie kryteriów sieciowych np.:
   1. kryterium największej liczby ścieżek:



, gdzie |*k(a)*| to liczba ścieżek o dodatnim potoku *qk* przebiegająca przez dany odcinek;

* 1. kryterium propagacji zatłoczenia. Odcinek którego poprzedniki są wrażliwe z punktu widzenia któregoś z powyższych kryteriów, najczęściej chodzi o kryterium najszybszego zapełnienia się odcinka (7). Kryterium to pozwala uchwycić te odcinki na których łączą się potoki z kilku odcinków wrażliwych, np. łącznica na autostradzie:



, gdzie *a-* to zbiór poprzedników odcinka *a,* wszystkie odcinki połączone bezpośrednio z odcinkiem *a* (za pomocą węzła).

* 1. centralność (*betweenness centrality*), obciąż sieć macierzą jednostkową (*q­od=1*), ustaw dla wszystkich odcinków nieograniczoną przepustowość, wykonaj rozkład ruchu, znajdź odcinek najbardziej obciążony (o największym stopniu *betweenness centrality*) – ten odcinek wskazany jest do zamknięcia. Wróć do wariantu bazowego, obciąż sieć po zamknięciu wskazanego odcinka.

## Analiza wrażliwości kosztów podróży *C* na zamknięcie odcinków wrażliwych *w*

Dla każdego ze zidentyfikowanych odcinków wrażliwych *W={w}* znalezionych w 0 określ całkowite koszty podróży *Cw* po usunięciu tego odcinka z sieci i to jak wzrastają one w stosunku do kosztów bazowych *C*.

Aby to obliczyć wyrazimy koszt *C* jako funkcje modelu *C(q=M(G,Q)),* a więc sieci *G* i więźby *Q*. Więźba będzie stała, natomiast sieć będzie się zmieniać – kolejno wyłączać będziemy z niej odcinki wrażliwe. Dla każdego z odcinków wrażliwych *wW* określmy modyfikacje sieci *G(N,A)* 🡪 *,* czyli usunięcie odcinka wrażliwego *w*. Z siecią tą związany jest nowy model *q=M(Gw,Q)*, oraz nowe koszty *Cw(q=M(Gw,Q))*, które należy obliczyć (obliczając na nowo rozkład ruchu).

Dla każdego ze zidentyfikowanych odcinków wrażliwych *wW* określ:

1. koszty *Cw* wyrażone w pojazdo-godzinach i pojazdo-kilometrach związane z zamknięciem tego odcinka
2. wrażliwość sieci na zamknięcie odcinka *w:  [%]*

Określ odcinek najbardziej wrażliwy **.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| grupa | kryterium (nr) | odcinek (nr) | *Dtotw[poj.km]* | *Ttotw[poj.H]* | *ΔD [%]* | *ΔT [%]* |
| *intuicyjne* |  |  |  |  |  |  |
| *wybrane z grupy 2.* |  |  |  |  |  |  |
| *wybrane z grupy 2.* |  |  |  |  |  |  |
| *wybrane z grupy 3.* |  |  |  |  |  |  |
| *wybrane z grupy 3.* |  |  |  |  |  |  |
| *Odcinek najbardziej wrażliwy:* | | | | |  | |

## Zmniejszenie wrażliwości sieci

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

Dla najbardziej wrażliwego odcinka sieci **znalezionego w poprzednim ćwiczeniu zmodyfikuj sieć transportową  dodając węzły, lub odcinki tak, żeby zminimalizować wrażliwość sieci **. Należy określić wrażliwość sieci ** na zamknięcie odcinka *w* (**)oraz porównać z wrażliwością sieci bazowej *G* na zamknięcie tego odcinka **. Należy zaproponować 3 rozwiązania (3 modyfikacje sieci G) i wybrać to, dla którego wrażliwość jest najmniejsza.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Zmiana wrażliwości sieci (mierzona poprzez zmianę pojazdogodzin *Ttot*) | | | |
| modyfikacja | sieć pełna | sieć bez odcinka *w* | *ΔT* |
| *G* |  |  |  |
| *G`* |  |  |  |
| *G``* |  |  |  |
| *G```* |  |  |  |

## Krzywa zmiany pracy przewozowej wraz ze zmianą popytu

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

Dla zadanej więźby ruchu w modelu *Q* odczytaj pracę przewozową w pojazdo-kilometrach *Dtot* i pojazdo-godzinach *Ttot*. Narysuj funkcję zmiany tych prac przewozowych od zmian w więźbie **. Dla każdej pary źródło cel w więźbie *qod*zwiększ/zmniejsz ją odpowiednio *qod🡪 k•qod*. Określ przebieg zmienności dla przedziałów:

1. – małe wahania systematyczne

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *k* | *Dtot* | *Ttot* |
| 0.8 |  |  |
| 0.9 |  |  |
| 1 |  |  |
| 1.1 |  |  |
| 1.2 |  |  |

1. – wrażliwość kosztów na znaczny spadek potoków

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *k* | *Dtot* | *Ttot* |
| 0.1 |  |  |
| 0.2 |  |  |
| 0.3 |  |  |
| 0.5 |  |  |
| 1 |  |  |

1.  – wrażliwość kosztów na znaczny wzrost potoków

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *k* | *Dtot* | *Ttot* |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |

Wyniki przedstaw na wykresach: , *,*lub **

## Konsekwencje chwilowego zakłócenia (np. wypadku) na odcinku w dynamicznym modelu ruchu.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

W ćwiczeniu tym określimy konsekwencje zakłócenia – chwilowej niesprawności odcinka sieci drogowej. Opis taki możliwy jest w modelu dynamicznym, gdzie charakterystyki modelu *M* są wyrażone jako funkcja czasu *τ*, np. potok na odcinku *qa* staje się funkcją czasu *qa(τ).* Pozwala to na bardziej realistyczny opis przepływu pojazdów, oraz pokazanie dodatkowych charakterystyk w formie wykresu zmienności w czasie:

* czas przejazdu dla pojazdów wjeżdżających w danym momencie ;
* liczba pojazdów na odcinku ;
* długość kolejki, w pojazdach ;
* liczba pojazdów wjeżdżających i wyjeżdzających z odcinka.

W tym ćwiczeniu w dynamicznym modelu ruchu *M(τ)* zamodelujemy zakłócenie (np. wypadek, awarię, blokadę) jako zmianę w sieci . Sieć jest funkcją czasu, bo parametry odcinków zmieniają się w czasie. Zakłócenie zamodelujemy poprzez zmianę parametrów odcinka *a* na pewien czas, co pozwoli zasymulować zakłócenie (np. wypadek, zwężenie, awarię) i jego konsekwencje na przepływ pojazdów. W szczególności dla zadanego okresu  spadnie (1) przepustowość , lub (2) prędkość . Dla takiej zmodyfikowanej sieci symulujemy przepływ pojazdów na z góry przypisanych ścieżkach (procedura: *Dynamic Network Loading)* w wyniku czego otrzymujemy opis przepływu pojazdów przez sieć z zakodowanym zdarzeniem (wypadkiem) i warunki tego przepływu (np. czasy przejazdu)*.*

Należy opisać efekty zdarzenia podając:

|  |  |
| --- | --- |
| charakterystyka | wartość |
| okres awarii; |  |
| moment w którym kolejka jest najdłuższa, ile pojazdów obejmuje |  |
| moment w którym kolejka znika i stan wraca do normy |  |
| jeśli kolejka rozlała się na inne elementy w sieci podać maksymalny zasięg zakłócenia; |  |
| liczbę pojazdów które odczują zakłócenia |  |
| maksymalny czas przejazdu odcinka z zakłóceniem |  |

# Zawodność i niezawodność elementów

Zdefiniujmy zawodność odcinka *Fa* jako prawdopodobieństwo wystąpienia awarii, czyli zdarzenia (np. zatoru drogowego), które powoduje nieprzejezdność (niesprawność). Założymy tu, że p-wo awarii na jeden pojazdokilometr jest stałe i wynosi*[[1]](#footnote-1)*, niezależnie od odcinka *a*. Pozwala to wyrazić zawodność odcinka formułą *.*

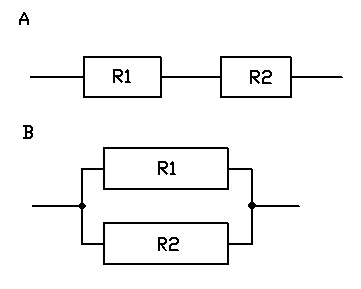
Z kolei niezawodność odcinka R*a* to p-wo, że na danym odcinku nie będzie miało miejsce zdarzenie powodujące nieprzejezdność/niesprawność. Zakładamy dwa możliwe stany odcinka: sprawność *Ra* i niesprawność *Fa*, co pozwala zastosować jedynkę prawdopodobieństwa: **, a więc **.

### Odcinek o największym prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia

Znajdź odcinek o największym prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia ** i sprawdź jak jego awaria wpłynie na koszty.

# Zawodność i niezawodność układów

Wzory powyższe (**) zachodzą dla pojedynczych elementów, zazwyczaj jednak systemy, których niezawodność badamy są złożone. Wyróżniamy dwa podstawowe układy: szeregowy (A) i równoległy (B) (rys. 1).



Rysunek 1 Układ szeregowy (A) i równoległy (B)

W ogólności:

* układ szeregowy (oznaczony we wzorach *U|* ) jest:
  1. niesprawny jeśli niesprawny jest co najmniej jeden element
  2. sprawny tylko jeśli sprawne są wszystkie elementy
* układ równoległy (oznaczony we wzorach *U||* )*,* jest:
  1. niesprawny tylko jeśli niesprawne są wszystkie elementy
  2. sprawny jeśli sprawny jest co najmniej jeden element

Dla obliczenia zawodności i niezawodności układów użyjemy prawdopodobieństwa następujących zdarzeń.

Układ szeregowy *U|* jest sprawny (*R*) tylko wtedy, gdy sprawne są wszystkie jego elementy. Co można przedstawić w formie iloczynu wyrażającego niezawodność układu szeregowego. Stosując jedynkę prawdopodobieństwa ** możemy określić p-wo niesprawności układu jako .

Układ równoległy *U*||, z kolei, jest niesprawny (*F)* wtedy gdy niesprawne są wszystkie jego elementy, co można wyrazić w formie iloczynu: . Stosując jedynkę prawdopodobieństwa ** możemy określić p-wo niesprawności układu jako 

Dla dowolnego układu zachodzi jedynka prawdopodobieństwa, czyli *.*

## Niezawodność układu szeregowego i równoległego przy zadanym stałym prawdopodobieństwie zdarzenia na pojazdokilometr.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko | Imię i nazwisko | Imię i nazwisko |
|  |  |  |

### Układ szeregowy (ścieżka)

Dla pary źródło-cel *ij* o największym potoku w więźbie *Qij* określ ścieżkę najkrótszą *kij*. Przedstaw ją w formie układu szeregowego *U|* i określ zawodność *Fa* i niezawodność każdego z elementów *Ra* na podstawie pojazdo-kilometrów na każdym odcinku *qala* i zadanego p-wa zdarzenia ** (np. 0.00005). Określ zawodność *FU|* i niezawodność układu *RU|.*

|  |  |
| --- | --- |
| Układ szeregowy | |
| Zawodność *F* | Niezawodność *R* |
|  |  |

### Układ równoległy (ekran)

Przedstaw minimalne cięcie grafu (określone w Ćwiczeniu 1) w formie połączenia równoległego *U||* i określ prawdopodobieństwo, że dwa podgrafy na które dzielona jest sieć będą niepołączone, czyli zawodność *FU||* i niezawodność *RU||* układu równoległego.

|  |  |
| --- | --- |
| Układ szeregowy | |
| Zawodność *F* | Niezawodność *R* |
|  |  |

1. rzeczywisty wskaźnik wypadkowości jest zależny od wielu czynników wpływających na bezpieczeństwo i powinien być obliczony osobno na podstawie odrębnej analizy. [↑](#footnote-ref-1)