Niezawodność i bezpieczeństwo 2018

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 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 nieparzyste			tygodnie parzyste		
1	28 luty	Wprowadzenie	1	7 marzec	Wprowadzenie
2	14 marzec	Ćwiczenie 1	2	21 marzec	Ćwiczenie 1
3	28 marzec	Ćwiczenie 2	3	4 kwiecień	Ćwiczenie 2
4	11 kwiecień	Ćwiczenie 3	4	18 kwiecień	Ćwiczenie 3
5	25 kwiecień	Ćwiczenie 4	5	2 maj	Ćwiczenie 4
6	9 maj	Ćwiczenie 5	6	16 maj	Ćwiczenie 5
7	23 maj	Ćwiczenie 6	7	30 maj	Ćwiczenie 6
8	6 czerwiec	termin zapasowy	8	13 czerwiec	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.

Def. 1. Sieć transportowa

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

Def. 2. Model ruchu

Model ruchu *M* składa się z:

- sieci transportowej *G(N,A)*,
- więźby ruchu Q_{ij}
- wyników rozkładu ruchu wyrażonych w postaci:
    a. potoków pojazdów na ścieżkach q_k, i/lub
    b. potoków pojazdów na każdym z odcinków q_a

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

Ćwiczenie 1. Odczytanie wskaźników sieciowych. Minimalne cięcie grafu.

Imię i nazwisko	Imię i nazwisko	Imię i nazwisko

A. 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 $k \in K$: $C = \sum_{k \in K} q_k \cdot c(k)$

  , gdzie $c(k)$ to koszt danej ścieżki, np. jej czas t_a, lub długość l_a, a q_k to potok pojazdów na tej ścieżce.
- jako suma kosztów wszystkich odcinków w sieci $a \in A$: $C = \sum_{a \in A} q_a \cdot c_a$,

  , gdzie c_a to koszt przejazdu danego odcinka, np. czas t_a, lub długość l_a, a q_a 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	D_{tot}	
pojazdogodziny	T_{tot}	
średnia prędkość	D_{tot}/T_{tot}	
średnia długość podróży	D_{tot}/N	
średni czas podróży	T_{tot}/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 k_{ij}. Cięciem, w tym ćwiczeniu, niech będzie taki podzbiór $c_{ij}=\{a: a \in A\}$ odcinków grafu, który ma niepuste przecięcie z każdą ścieżką $\underset{k \in k_{ij}}{\forall}\, c \cap k \neq \emptyset$. Innymi słowy należy znaleźć taki zbiór odcinków, który przetnie wszystkie ścieżki k_{ij}. Zbiór wszystkich cięć nazwijmy $C_{ij}=\{c_{ij}\}$, w tym zbiorze interesuje nas cięcie minimalne $c_{ij} \in C_{ij}$, czyli (w zależności od przyjętej heurystyki):

a) najmniej liczne (zawierające najmniej odcinków) $\min_{C_{ij}} |c_{ij}|$

b) o najmniejszej sumarycznej przepustowości $\min_{c_{ij} \in C_{ij}} \sum_{a \in c_{ij}} q_a^{\max}$

Dla zadanego modelu ruchu $q=M(G,Q)$, określ parę źródło-cel ij o największej liczbie podróży $Q_{ij}^{\max} = \max_{i,j \in Z} Q_{ij}$. Przeanalizuj możliwe ścieżki k_{ij} i na ich podstawie określ minimalne cięcie grafu ze względu na parę ij pod kątem kryterium (a) liczności i (b) przepustowości.

Cięcie grafu	
Odcinki	

Ćwiczenie 2. 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 $W = \{w\} \subseteq A$, czyli takie których niesprawność spowoduje znaczne zwiększenie kosztów przemieszczeń *C*. Odcinki *w* mogą być identyfikowane na podstawie następujących kryteriów (Tampere, 2007):

1. kryterium największego potoku:
   $w_1 = \max_{a \in A} q_a$;
2. kryterium największego zatłoczenia:
   $w_2 = \max_{a \in A} \left(q_a / q_a^{\max} \right)$, gdzie $q_a^{\max}$ to przepustowość odcinka *a*;
3. kryterium największej liczby ścieżek:
   $w_3 = \max_{a \in A} \left| k(a) \right|$, gdzie $|k(a)|$ to liczba ścieżek o dodatnim potoku q_k przebiegająca przez dany odcinek;
4. kryterium minimalnego cięcia grafu. Odcinek należący do minimalnego cięcia grafu $a \in c_{ij}$ (0) o największym potoku:
   $w_4 = \max_{a \in c_{ij}} q_a$
5. kryterium minimalnego cięcia grafu. Odcinek należący do minimalnego cięcia grafu $a \in c_{ij}$ (Ćwiczenie 2) o największym zatłoczeniu:
   $w_5 = \max_{a \in c_{ij}} \left(q_a / q_a^{\max} \right)$
6. kryterium największego wydłużenia czasu:
   $w_6 = \max_{a \in A} t_a$
7. kryterium najszybszego zapełnienia się odcinka. Odcinek z którego najszybciej *rozleje się* kolejka pojazdów gdy będzie zablokowany:
   $w_7 = \min_{a \in A} \left(\left(l_a / q_a \right) \left(J_{\max} \cdot p_a - q_a / v_a \right) \right)$
   , gdzie l_a to długość odcinka, a J_{max} to średnia gęstość pojazdów stojących w korku (zob. 0).
8. kryterium wydłużenia czasu z uwzględnieniem prawdopodobieństwem wydarzenia. Jest to modyfikacja kryterium największego wydłużenia czasu (6) uwzględniająca prawdopodobieństwo zdarzenia π_a (w najprostszym przypadku można założyć, że $\pi_a = q_a \cdot l_a$, czyli p-wo zdarzenia jest funkcją pojazdo-kilometrów):
   $w_8 = \max_{a \in A} \left(\pi_a \right)$
9. 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:
   $$w_9^a = \max_{a \in A} \left(\sum_{b \in a^-} w_i^b \right)$$
   , gdzie a^- to zbiór poprzedników odcinka *a*, wszystkie odcinki połączone bezpośrednio z odcinkiem *a* (za pomocą węzła).

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 C^w 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 $w \in W$ określmy modyfikacje sieci $G(N,A) \rightarrow G^w = G(N, A \setminus \{w\})$, czyli usunięcie odcinka wrażliwego *w*. Z siecią tą związany jest nowy model $q=M(G^w,Q)$, oraz nowe koszty $C^w(q=M(G^w,Q))$, które należy obliczyć (obliczając na nowo rozkład ruchu).
Dla każdego ze zidentyfikowanych odcinków wrażliwych $w \in W$ określ:

a) koszty C^w wyrażone w pojazdo-godzinach i pojazdo-kilometrach związane z zamknięciem tego odcinka
b) wrażliwość sieci na zamknięcie odcinka *w:* $\Delta C^w = C^w \big/ C$

Określ odcinek najbardziej wrażliwy $w_{\max} = \max\limits_{w \in W} \Delta C^w$.

kryterium (nr)	odcinek (nr)	D_{tot}^{w}	T_{tot}^{w}	ΔD	ΔT

Pomocnicze: Obliczanie krytycznej gęstości ruchu J_{max} z obserwacji kolejek.

Dla wybranych 5 kolejek o długości co najmniej 10 pojazdów odnalezionych na zdjęciach satelitarnych Krakowa określ średnią długość przypadającą na pojazd $J_{\max} = \frac{n}{l}$ wyrażoną jako iloraz liczby pojazdów w kolejce *n* i długości kolejki *l*.

Ćwiczenie 3. Zmniejszenie wrażliwości sieci

Imię i nazwisko	Imię i nazwisko	Imię i nazwisko

Dla najbardziej wrażliwego odcinka sieci $w_{\max}$ znalezionego w poprzednim ćwiczeniu zmodyfikuj sieć transportową $G \rightarrow G'$ dodając węzły, lub odcinki tak, żeby zminimalizować wrażliwość sieci ΔC^{w}. Należy określić wrażliwość sieci G' na zamknięcie odcinka w ($\Delta C^{w}(G')$) oraz porównać z wrażliwością sieci bazowej G na zamknięcie tego odcinka $\Delta C^{w}(G)$. Należy zaproponować 3 rozwiązania (3 modyfikacje sieci G) i wybrać to, dla którego wrażliwość jest najmniejsza.

Zmiana wrażliwości sieci (mierzona poprzez zmianę pojazdogodzin T_{tot})			
modyfikacja	sieć pełna	sieć bez odcinka *w*	ΔT
G			
G`			
G``			
G```			

Ćwiczenie 4. 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 D_{tot} i pojazdo-godzinach T_{tot}. Narysuj funkcję zmiany tych prac przewozowych od zmian w więźbie $\Delta C(Q)$. Dla każdej pary źródło cel w więźbie q_{od} zwiększ/zmniejsz ją odpowiednio $q_{od} \rightarrow k \bullet q_{od}$. Określ przebieg zmienności dla przedziałów:

a) $k \in (0.8, 1.2)$ – małe wahania systematyczne

k	D_{tot}	T_{tot}
0.8		
0.9		
1		
1.1		
1.2		

b) $k \in (0.1, 1)$ – wrażliwość kosztów na znaczny spadek potoków

k	D_{tot}	T_{tot}
0.1		
0.2		
0.3		
0.5		
1		

c) $k \in (1, 5)$ – wrażliwość kosztów na znaczny wzrost potoków

k	D_{tot}	T_{tot}
1		
2		
3		
4		
5		

Wyniki przedstaw na wykresach: $C(Q)$, $\Delta C(Q)$, lub $\Delta C(k)$

Ćwiczenie 5. 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 q_a staje się funkcją czasu $q_a(\tau)$. 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 $t_a(\tau)$;
- liczba pojazdów na odcinku $N_a(\tau)$;
- długość kolejki, w pojazdach $Q_a(\tau)$;
- liczba pojazdów wjeżdżających $e_a(\tau)$ i wyjeżdzających $f_a(\tau)$ z odcinka.

W tym ćwiczeniu w dynamicznym modelu ruchu $M(\tau)$ zamodelujemy zakłócenie (np. wypadek, awarię, blokadę) jako zmianę w sieci $G(\tau) \rightarrow G'(\tau)$. 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 $\tau_{awarii} = [\tau_-; \tau_+]$ spadnie (1) przepustowość $q_a^{\max}(\tau_{awarii}) < q_a^{\max}$, lub (2) prędkość $v0_a(\tau_{awarii}) < v0_a$. 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

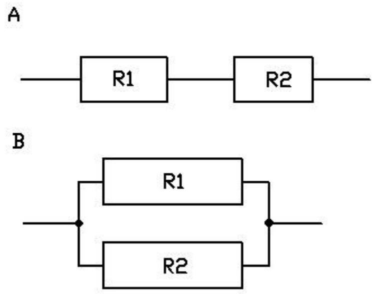
Zdefiniujmy zawodność odcinka F_a jako prawdopodobieństwo wystąpienia awarii, czyli zdarzenia (np. zatoru drogowego), które powoduje nieprzejezdność (niesprawność). Założymy tu, że p-wo awarii na jeden pojazdokilometr jest stałe i wynosi π [1], niezależnie od odcinka a. Pozwala to wyrazić zawodność odcinka formułą $F_a(q_a) = \pi \cdot q_a \cdot l_a$.
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 R_a i niesprawność F_a, co pozwala zastosować jedynkę prawdopodobieństwa: $F_a + R_a = 1$, a więc $R_a(q_a) = 1 - \pi \cdot q_a \cdot l_a$.

Odcinek o największym prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia

Znajdź odcinek o największym prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia $F_a(q_a) = \pi \cdot q_a \cdot l_a$ i sprawdź jak jego awaria wpłynie na koszty.

Zawodność i niezawodność układów

Wzory powyższe (F_a, R_a) 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:
    a. niesprawny jeśli niesprawny jest co najmniej jeden element
    b. sprawny tylko jeśli sprawne są wszystkie elementy
- układ równoległy (oznaczony we wzorach $U||$), jest:
    a. niesprawny tylko jeśli niesprawne są wszystkie elementy
    b. 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 $R_{U|} = \prod_{a \in U|} R_a = \prod_{a \in U|} (1 - F_a) = \prod_{a \in U|} \left(1 - \pi \cdot q_a \cdot l_a\right)$ wyrażającego niezawodność układu szeregowego. Stosując jedynkę prawdopodobieństwa $F_a + R_a = 1$ możemy określić p-wo niesprawności układu jako $F_{U|} = 1 - \prod_{a \in U|} \left(1 - \pi \cdot q_a \cdot l_a\right)$.
Układ równoległy $U||$, z kolei, jest niesprawny (F) wtedy gdy niesprawne są wszystkie jego elementy, co można wyrazić w formie iloczynu: $F_{U||} = \prod_{a \in U||} F_a = \prod_{a \in U||} \left(\pi \cdot q_a \cdot l_a\right)$. Stosując jedynkę prawdopodobieństwa $F_a + R_a = 1$ możemy określić p-wo niesprawności układu jako $R_{U|} = 1 - \prod_{a \in U||} \left(\pi \cdot q_a \cdot l_a\right)$
Dla dowolnego układu zachodzi jedynka prawdopodobieństwa, czyli $F_a + R_a = 1$.

[1] rzeczywisty wskaźnik wypadkowości jest zależny od wielu czynników wpływających na bezpieczeństwo i powinien być obliczony osobno na podstawie odrębnej analizy.

Ćwiczenie 6. 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 Q_{ij} określ ścieżkę najkrótszą k_{ij}. Przedstaw ją w formie układu szeregowego $U|$ i określ zawodność F_a i niezawodność każdego z elementów R_a na podstawie pojazdo-kilometrów na każdym odcinku $q_a l_a$ i zadanego p-wa zdarzenia π (np. 0.00005). Określ zawodność $F_{U|}$ i niezawodność układu $R_{U|}$.

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 $F_{U||}$ i niezawodność $R_{U||}$ układu równoległego.

Układ szeregowy	
Zawodność F	Niezawodność R