

dr inż. Stanisław Młynarski

Politechnika Krakowska
31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37,
tel.: (012) 374 33 22,
email: mlynarski_st@poczta.onet.pl;

dr hab. inż. Robert Pilch

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: pilch@agh.edu.pl;

dr inż. Maksymilian Smolnik

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: smolnik@agh.edu.pl;

prof. Jan Szybka

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: szybja@agh.edu.pl

Metodyka szacowania niezawodności układów sieciowych na przykładzie komunikacji miejskiej

Słowa kluczowe: sieć komunikacyjna, niezawodność, algorytm faktoryzacji

Streszczenie: W artykule zaprezentowano opracowaną metodykę szacowania niezawodności układów sieciowych. Rozwiązanie to umożliwia dokonywanie oceny niezawodności oraz projektowanie modernizacji rozpatrywanej sieci przede wszystkim w aspekcie zapewnienia jej wymaganej niezawodności. Praktyczne wykorzystanie omawianej metodyki może mieć miejsce w odniesieniu do różnych układów sieciowych, np. sieci komputerowych, energetycznych, gazowych, wodociągowych, telekomunikacyjnych i transportowych. W artykule przedstawiono analizę niezawodności sieci komunikacyjnej w miejskim transporcie zbiorowym. Obliczenia przeprowadzono dla wybranych kryteriów zdatności sieci, które praktycznie warunkują jakość świadczonych usług transportowych. Podstawowe narzędzie obliczeniowe stanowił algorytm faktoryzacji, który umożliwia ocenę wpływu uszkodzeń poszczególnych połączeń (spowodowanych w szczególności czynnikami fizycznymi) na niezawodność całej sieci. W opracowaniu uwzględniono możliwość modernizacji analizowanej sieci, a uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach.

1. Wprowadzenie

Opracowanie dotyczy problematyki szacowania niezawodności układów sieciowych, której ocena, ze względu na specyfikę tych układów, nie może być przeprowadzana tradycyjnymi metodami stosowanymi w teorii niezawodności. W artykule scharakteryzowano

tego typu układy, opracowano metodykę postępowania przy przeprowadzaniu obliczeń niezawodnościowych układów sieciowych oraz na wybranym przykładzie komunikacji miejskiej wykazano użyteczność zastosowanej metody faktoryzacji.

Działalność miejskich przedsiębiorstw transportowych jest silnie związana z gospodarowaniem majątkiem trwałym, którego składnikami w znacznej mierze są środki transportowe oraz infrastruktura w postaci szlaków i sieci komunikacyjnych. Istotnym elementem eksploatacji środków transportu jest gospodarka konserwacyjno-remontowa, będąca nieodzownym warunkiem zapewnienia ciągłości funkcjonowania i wykorzystania posiadanego potencjału majątkowego [2, 6, 27].

Gospodarka ta obejmuje całokształt działań zmierzających do utrzymania zdolności eksploatacyjnej sieci komunikacyjnych. Działania te wiążą się z koniecznością czasowego wyłączenia z ruchu niektórych odcinków (linii) i wpływają negatywnie na wyniki działalności przedsiębiorstwa. Celem przedsiębiorstw jest takie kształtowanie struktury połączeń aby w sytuacji występujących awarii lub przeprowadzania planowych remontów linii trakcyjnych system komunikacji zapewnił użytkownikom osiągnięcie celu podróży, por. [10, 14, 31].

Sprostanie coraz wyższym wymaganiom w tym zakresie narzuca konieczność poszukiwania metod kształtowania i oceny systemów komunikacyjnych z uwzględnieniem sytuacji awaryjnych i kryteriów ekonomicznych. W tym zakresie wykorzystuje się rachunek prawdopodobieństwa (por. [11, 27, 33]). Na przykład analizuje się probabilistyczny wskaźnik nieregularności przejazdu zdefiniowany jako różnica (w minutach) między rzeczywistym a planowanym czasem w warunkach zapewnienia stabilnego i regularnego ruchu. Na wartość tego wskaźnika ma wpływ ukształtowanie sieci komunikacyjnej. Wyznaczenie jej korzystnej konfiguracji ma znaczenie dla wykonania zadania transportowego, por. [9, 18].

Do rozwiązania tego zadania można zastosować zaproponowany w pracy algorytm faktoryzacji [13, 24, 30]. Umożliwia on wyznaczenie wartości niezawodności dla złożonych układów sieciowych występujących w systemach transportu komunikacji miejskiej oraz stanowi alternatywę dla stosowanych w takich przypadkach mało dokładnych metod symulacyjnych [17, 19, 20].

2. Charakterystyka układów sieciowych

Do układów sieciowych zalicza się systemy: zaopatrzenia w energię, sieci teleinformatycznych, zaopatrzenia w wodę, transportowe, zapewniające ciągłość działania przedsiębiorstw produkcyjnych i dystrybucji produktów oraz inne, podobnego typu układy.

Wszystkie ww. należą do infrastruktury technicznej, która obejmuje urządzenia, sieci przesyłowe i związane z nimi obiekty techniczne realizujące zadania w zakresie dostarczania ciepła, gazu, wody, usuwania ścieków i odpadów, transportu i tym podobnych. Infrastruktura to podstawowe urządzenia i instytucje usługowe niezbędne do funkcjonowania gospodarki i społeczeństwa.

Infrastruktura liniowa w układzie sieciowym – charakteryzuje się liniowym połączeniem środków (elementów) technicznych realizujących określone funkcje.

Do oceny układów sieciowych można zastosować metody oparte o schematy blokowe. Stosowane mogą być do struktur niezawodnościowych sieciowych systemów o budowie modułowej i mogą mieć zastosowanie do dużych systemów transportowych w aglomeracjach

miejskich, które funkcjonują na znacznym obszarze oraz złożone są z wielu węzłów zawierających odwzorowane podsystemy wewnętrzne [12].

Modelowanie struktur sieciowych prowadzone jest często z użyciem grafów składających się z węzłów oraz odcinków łączących węzły. Obliczenia wartości niezawodności dla struktur odwzorowanych w postaci grafów mogą być efektywnie realizowane z zastosowaniem metod faktoryzacji [17, 19, 23]. W systemach transportu komunikacji miejskiej struktury niezawodnościowe cały czas mogą ewoluować. Przyczyną takiego stanu może być zmiana obszaru objętego działaniem, albo np. zmieniający się stan zapotrzebowania na usługi transportowe. Poprawna identyfikacja struktur rzeczywistych systemów technicznych oraz metoda wyliczenia wartości wskaźników niezawodności jest zabiegiem kluczowym do prawidłowej analizy niezawodności i oceny zagrożenia dla efektywnego funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej.

Trudności w ocenie niezawodności układów sieciowych wynikają z faktu, że nie posiadają uznanej za klasyczną struktury niezawodnościowej, mogą występować zależności uszkodzeń między fragmentami układu oraz ograniczone jest zastosowanie typowych wskaźników i charakterystyk niezawodnościowych. Z tego względu do oceny niezawodności tego typu układów można zastosować algorytm faktoryzacji, wykorzystujący teorię grafów i metody redukcji sieci [4, 23, 24]. Istotnym aspektem zapewnienia niezawodności eksploatacyjnej układu o strukturze sieci jest kształtowanie i optymalizowanie jego struktury połączeń już na etapie projektowania [5, 13, 26]. Poprawa wiarygodności dokonywanej oceny niezawodności sieci możliwa jest natomiast poprzez uwzględnienie uszkodzania się i odnawiania w procesie eksploatacji wszystkich jej elementów [25].

3. Metodyka badań niezawodnościowych układów sieciowych

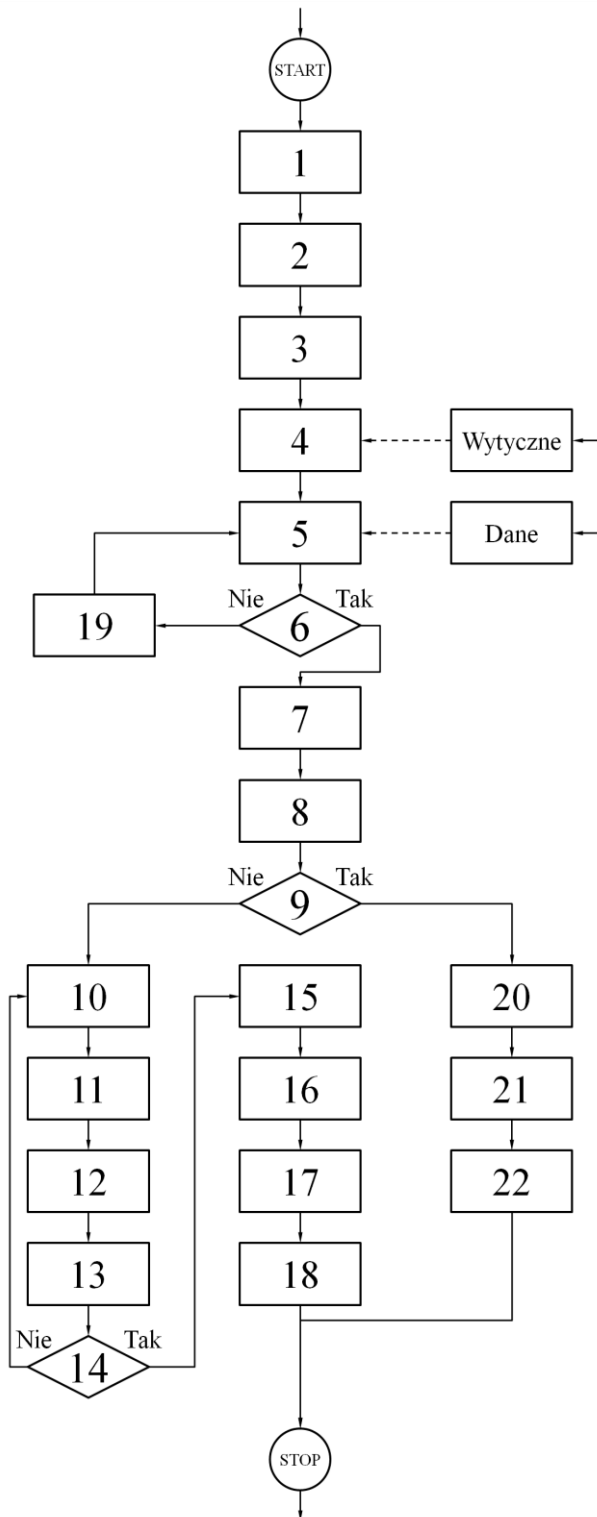
Ocena niezawodności układów sieciowych wymaga zastosowania określonych modeli matematycznych oraz metod związanych z ich wykorzystaniem. Działanie takie wymaga jednak wcześniejszego przeprowadzenia odpowiednich prac przygotowawczych oraz późniejszego stosownego opracowania uzyskanych wyników [30]. Ogół działań, które towarzyszyć mogą ocenie niezawodności układu sieciowego, został zestawiony i uporządkowany w ramach opracowanej metody oceny i modernizacji sieci. Jej schemat przedstawiono na rysunku 1.

Doraźnym celem analizy układu sieciowego może być wyznaczenie wskaźników charakteryzujących jego niezawodność, jednak takie działanie powinno jedynie wspomagać inne, bardziej złożone działania o donioślejszych skutkach. Należą do nich zwłaszcza: planowanie odnawiania profilaktycznego rozpatrywanej sieci oraz przygotowanie modernizacji sieci (szczególnie na drodze zmiany jej struktury niezawodnościowej).

Opracowana metoda nie uwzględnia działań związanych z planowaniem odnawiania profilaktycznego (co nie stanowi przedmiotu zainteresowania w ramach niniejszego opracowania), jednak pokazuje ona, że działania o charakterze modernizacji powinny zostać poprzedzone rzetelną oceną niezawodności rozpatrywanego układu sieciowego.

Dokonywana ocena niezawodności wymaga wcześniejszych działań przygotowawczych (co widoczne jest na schemacie pokazanym na rysunku 1) jak również dostarczenia precyzyjnie sformułowanych wymagań odnośnie do poprawnego

funkcjonowania analizowanego układu sieciowego oraz danych na temat przebiegu jego dotychczasowej eksploatacji. W sytuacji, gdy jakość dostępnych danych nie jest zadowalająca, wykorzystywane mogą być zastępcze źródła danych nt. przebiegu procesu eksploatacji, w postaci: zapisów księgowych, zapisów ewidencji wykorzystania części wymiennych oraz materiałów, itp. (por. [30]).



1. Sformułować cel prowadzonej analizy.
2. Zamodelować rozpatrywaną sieć jako układ węzłów i połączeń.
3. Nazwać poszczególne węzły i połączenia.
4. Określić funkcję badanej sieci i kryterium jej zdatności.
5. Zweryfikować dane nt. niezawodności sieci.
6. Czy jakość dostępnych danych nt. niezawodności sieci jest dostateczna?
7. Opracować dane nt. poszczególnych węzłów i połączeń.
8. Ocenić niezawodność sieci zgodnie z kryterium (por. pkt. 4), z zastosowaniem modeli matematycznych.
9. Czy celem prowadzonej analizy (por. pkt 1) jest wyłącznie ocena niezawodności sieci?
10. Wytypować „słabe ogniwa” badanej sieci.
11. Opracować wariant modernizacji rozpatrywanej sieci.
12. Przyjąć prognozowaną niezawodność nowych odcinków sieci.
13. Oszacować niezawodność $R_P(t)$ zmodernizowanej sieci.
14. Czy $R_P(t) \geq R_W(t)$?
15. Sprawdzić całość rozwiązania.
16. Opracować stosowną dokumentację techniczną.
17. Zweryfikować poprawność dokumentacji.
18. Zatwierdzić całość rozwiązania i dokumentacji.
19. Zaplanować i przeprowadzić stosowne badania eksploatacyjne lub wykorzystać zastępcze źródła danych.
20. Opracować wyniki analizy.
21. Zweryfikować poprawność przeprowadzonej analizy.
22. Zapisać wnioski z przeprowadzonej analizy.

Rys. 1. Schemat metody oceny niezawodności i modernizacji układu sieciowego

Poszczególne działania i zapytania przedstawione na schemacie za pomocą bloków z odpowiednimi liczbami (kroki od 1 do 22) zostały opisane na rysunku. Przedstawiony schemat blokowy opisuje procedurę postępowania, w nawiązaniu do której realizowano analizę niezawodnościową sieci tramwajowej scharakteryzowanej w rozdziale 4. Opisy w poszczególnych blokach pokazanych na rysunku 1 mają charakter ogólny, co jest konsekwencją uniwersalności opracowanej metody, która może być wykorzystywana podczas różnego rodzaju analiz i prac projektowych dotyczących niezawodności układów sieciowych.

W opracowanej metodzie przyjęto, że modernizacja sieci dokonywana będzie na drodze wprowadzania kolejnych zmian w jej strukturze niezawodnościowej do chwili, gdy jej szacowana niezawodność $R_P(t)$ stanie się niemniejsza od wymaganej $R_W(t)$ – dokonywane to jest w pętli iteracyjnej obejmującej kroki od 10 do 14. Tego rodzaju metoda kształtowania niezawodności została przedstawiona (w odniesieniu do obiektów technicznych innej klasy) w opracowaniach [7, 8], por. [29].

4. Przykład przeprowadzenia analizy niezawodnościowej sieci komunikacyjnej w miejskim transporcie zbiorowym

Wymagania dotyczące jakości usług w komunikacji miejskiej w wysokim stopniu uzależnione są od systemu organizacji, od technicznych środków transportu oraz struktury połączeń sieci transportowej i możliwości jej wykorzystania. Decydujące o jakości i niezawodności w miejskim transporcie zbiorowym są kryteria, mające istotne znaczenie dla użytkownika transportu zbiorowego oraz eksploatatora sieci, który uwzględniać musi również czynniki związane z ekonomiką eksploatacji.

Poddając analizie różne kryteria jakościowe i ekonomiczne w komunikacji miejskiej, do strategicznych zaliczyć można te, które związane są z infrastrukturą sieci połączeń oraz pojazdami realizującymi zadania przewozowe. Do najważniejszych z tych kryteriów zaliczyć można [1, 3, 16, 22]:

- dostępność linii wynikająca z liczby i rozmieszczenia przystanków,
- integrację przestrzenną i funkcjonalną z innymi środkami transportu zbiorowego (krajowego, regionalnego i lokalnego, *Park and Ride*, *Bike and Ride*, itp.),
- bezpośredniość połączeń i elastyczność funkcjonowania rozumianą jako możliwość wyboru połączenia alternatywnego,
- niezawodność funkcjonowania, której kryteriami są: punktualność, regularność, prawdopodobieństwo dojazdu do celu, prawdopodobieństwo osiągnięcia celu podróży w spodziewanym czasie lub osiągnięcie celu końcowego trasy.

Struktura sieci komunikacyjnej determinuje możliwości połączeń między węzłami, a te wpływają bezpośrednio na możliwości transportowe całego układu i na kształtowanie opinii użytkowników o jakości systemu komunikacji. Pod pojęciem węzła w strukturze sieci komunikacyjnej przyjęto miejsca skrzyżowania i rozjazdów torów oraz przystanki umożliwiające przesiadkę na inny rodzaj środka transportu, a także przystanki początkowe i końcowe. Racjonalnie ukształtowana infrastruktura w postaci efektywnej lokalizacji strategicznych węzłów komunikacyjnych daje możliwości optymalizacji sieci połączeń i

związanej z tym wysokiej niezawodności systemu. Natomiast istotne znaczenie dla efektywności i jakości całego systemu ma również poziom niezawodności węzłów i odcinków komunikacyjnych ze szczególnym wskazaniem na węzły o znaczeniu strategicznym.

Strukturę połączeń komunikacyjnych aglomeracji przedstawić można w postaci grafu wyrażającego zależności funkcjonalne pomiędzy elementami tego systemu i analizować je w ujęciu niezawodnościowym. Można go interpretować jako sieć połączeń w systemach transportu szynowego komunikacji miejskiej między węzłami infrastruktury. Realizacja procesu transportowego odbywa się między węzłami początkowymi (zajezdnie) i węzłami końcowymi (pętle końcowe), kolejne elementy są węzłami systemu jako cząstkowe realizacje zadań (przystanki), natomiast linie są infrastrukturą szynową między węzłami. Przy takiej interpretacji, zdatność lub niezdatność odcinka odpowiada za wykonanie zadania przewozowego przez jedną lub więcej linii albo niewykonanie zadania przewozowego przez przyporządkowaną (którąkolwiek) linię od początku do końca. Założono, że zdatności systemu odpowiada wykonanie zadania przez wszystkie linie, natomiast niezdatność jest interpretowana jako brak wykonania zadania przewozowego już przez jedną linię [12, 19].

W pracy zaproponowano zastosowanie algorytmu faktoryzacji w analizie strukturalnej sieci do oceny niezawodności połączeń komunikacyjnych w miejskim transporcie zbiorowym.

Metoda faktoryzacji oparta jest na następujących założeniach [4, 21, 25, 32]:

- analizowaną sieć reprezentuje graf nieskierowany $G=(V, E)$, w którym $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ reprezentuje zbiór wierzchołków grafu (węzły w sieci) a $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ reprezentuje zbiór krawędzi grafu (połączenia w sieci),
- wszystkie połączenia e_i w sieci ulegają wzajemnie niezależnym uszkodzeniom ze znanym prawdopodobieństwem,
- niezawodność sieci R_s jest przyjmowana jako prawdopodobieństwo połączenia między wybranym w sieci zbiorem węzłów K , którego liczność może wynosić: $2 \leq |K| \leq |V|$,
- wybór zbioru węzłów K określa wyznaczaną miarę niezawodności sieci (K – terminal reliability network)
- proces wyznaczania zależności do obliczenia niezawodności sieci oparty jest na zasadzie ściągania i wycinania połączeń, którą stosuje się cyklicznie do wszystkich krawędzi grafu reprezentującego sieć, co zapisuje się w postaci formuły:

$$R_s = R(G_K) = R_{e_i} \cdot R(G_{K'} * e_i) + (1 - R_{e_i}) \cdot R(G_K - e_i) \quad (1)$$

gdzie:

e_i – i -te połączenie w sieci reprezentowanej przez graf G ,

R_{e_i} – prawdopodobieństwo, że połączenie e_i jest zdatne,

$$G_{K'} * e_i = (V - v_k - v_l + v_{kl}, E - e_i), \quad v_{kl} = v_k \cup v_l,$$

$$K' = \begin{cases} K & \text{if } v_k \text{ or } v_l \notin K, \\ K - v_k - v_l + v_{kl} & \text{if } v_k \in K \text{ and } v_l \in K, \end{cases}$$

$$G_K - e_i = (V, E - e_i),$$

- po zredukowaniu wszystkich połączeń otrzymuje się zależność będącą analitycznym zapisem struktury niezawodnościowej, umożliwiającym obliczenie wybranej miary niezawodności sieci.

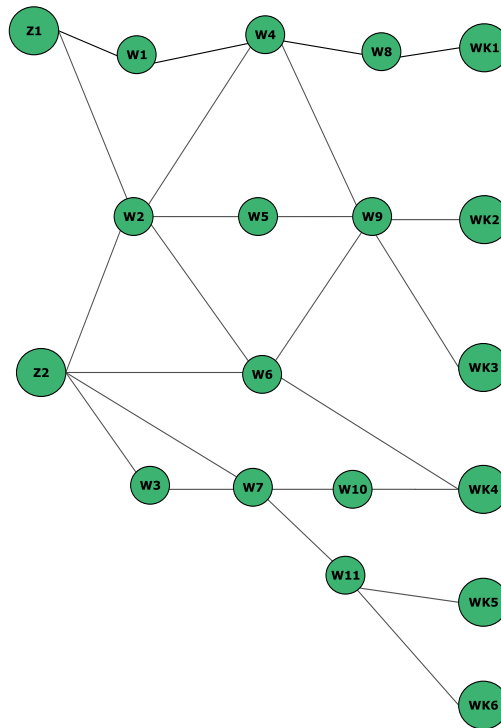
Metoda faktoryzacji umożliwia obliczenia niezawodności układów sieciowych, co nie jest możliwe do zrealizowania z zastosowaniem klasycznych metod oceny niezawodności. Efektem tych obliczeń jest oczywiście uzyskanie typowych charakterystyk niezawodności całego układu, jednak droga prowadząca do ich wyznaczenia nie mieści się w ramach standardowego postępowania przy klasycznym podejściu do szacowania niezawodności obiektów technicznych.

Systemy komunikacji miejskiej mogą być odwzorowywane jako struktury sieciowe dla których trzeba wyróżnić wiele wejść z i wyjść w_k natomiast w ich opisie grafowym mamy wtedy do czynienia z grafami lub sieciami takimi jak przedstawiona na rysunku 1. Jako warunek zdatności takiego grafu zazwyczaj przyjmuje się istnienie połączenia od każdego węzła początkowego (wejściowego) $z \in Z$ do dowolnego węzła końcowego (wyjściowego) $w \in W_k$, przy czym pewne węzły grafu, mogą być zarówno węzłami wejściowymi, jak i wyjściowymi (tzn. $Z \cap W_k \neq \emptyset$). W analizowanym w pracy przypadku podjęto założenia, że wykonanie zadania będzie zrealizowane w przypadku gdy z wyznaczonego węzła z_1 pojazdy dojadą do wyznaczonych odpowiednich węzłów od w_{k1} do w_{k4} i podobnie z z_2 do odpowiednich od w_{k2} do w_{k6} .

Dla potrzeb badań i przedstawienia możliwości obliczeniowych w opracowaniu zaproponowano model struktury połączeń sieci w postaci grafu nieskierowanego, co przedstawiono na rysunku 2. Do analizy przyjęte zostały szacunkowe wartości wskaźników niezawodności połączeń tej struktury przy założeniu zachowania zdatności węzłów.

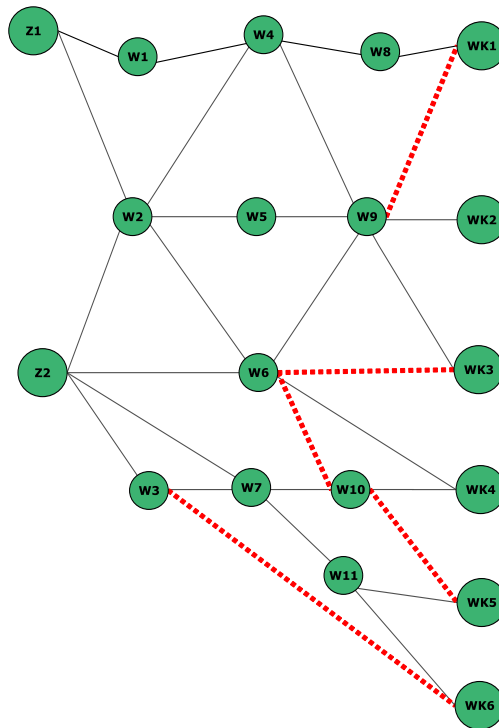
Wartości tych charakterystyk niezawodnościowych odzwierciedlają skutki wszelkiego rodzaju oddziaływań zewnętrznych na badany układ. Czynniki zewnętrzne mogą mieć charakter losowy (przypadkowy) albo mogą podlegać sterowaniu przez eksploatatorów układów. Ocena wartości charakterystyk ma charakter statystyczny i jest wynikiem obserwacji rzeczywistych systemów eksploatacji. W związku z tym, w artykule nie systematyzowano utrudnień występujących w obrębie sieci transportowej w obszarze miejskim, traktując przyjęte charakterystyki jako kompleksową reprezentację wszystkich zewnętrznych oddziaływań.

Następnie wprowadzono zmiany w strukturze sieci przez zwiększenie liczby połączeń między węzłami zaznaczone liniami kropkowymi. Schemat struktury po modyfikacji przedstawiono na rysunku 3.



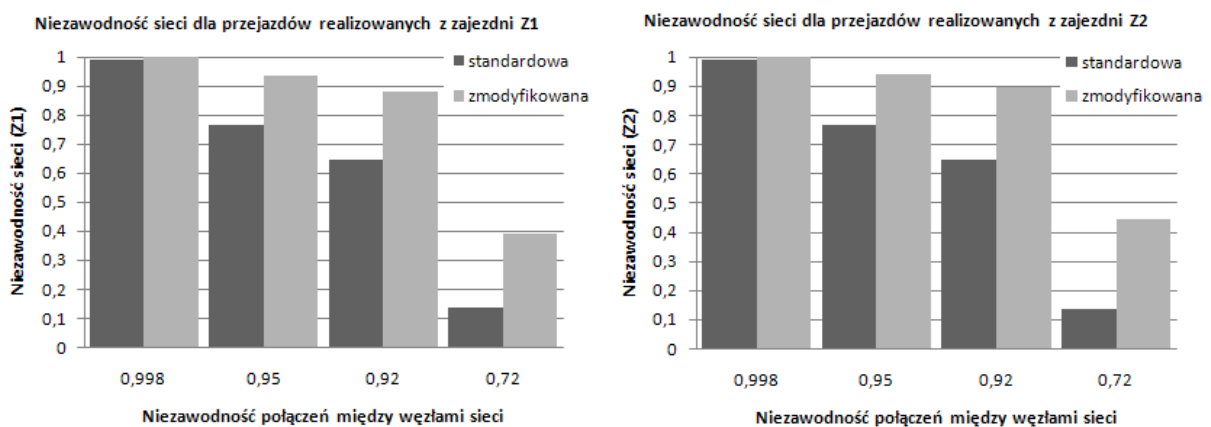
Rys. 2. Schemat struktury sieci komunikacji miejskiej

Dla zmodyfikowanej struktury ponownie przeprowadzono obliczenia i określono, powstałe w jej efekcie, zmiany niezawodności sieci. W przeprowadzonej analizie przyjęto, że miarą niezawodności sieci, wynikającą z algorytmu faktoryzacji, jest prawdopodobieństwo istnienia (występowania) połączenia między wybraną stacją (Z1 lub Z2) a wszystkimi punktami końcowymi tras wychodzących z danej stacji (dla stacji Z1 węzłami końcowymi są WK1-WK4, a dla stacji Z2 węzły końcowe to WK2-WK6). Jest to inaczej prawdopodobieństwo realizacji (dotarcia do punktu docelowego) wszystkich planowanych przejazdów z danej stacji.



Rys. 3. Schemat struktury sieci komunikacji miejskiej po modyfikacji

Na rysunku 4 przedstawiono ww. miary niezawodności sieci obliczone dla sieci standardowej (Rys. 2) oraz zmodyfikowanej (Rys. 3), przy różnych wartościach niezawodności połączeń między węzłami: $R=0,998$; $R=0,95$; $R=0,92$ oraz $R=0,72$. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program komputerowy, napisany w języku C, który realizuje obliczenia zgodnie z przedstawioną procedurą algorytmu faktoryzacji.



Rys. 4. Niezawodność sieci dla przejazdów realizowanych z zajezdni Z1 i Z2

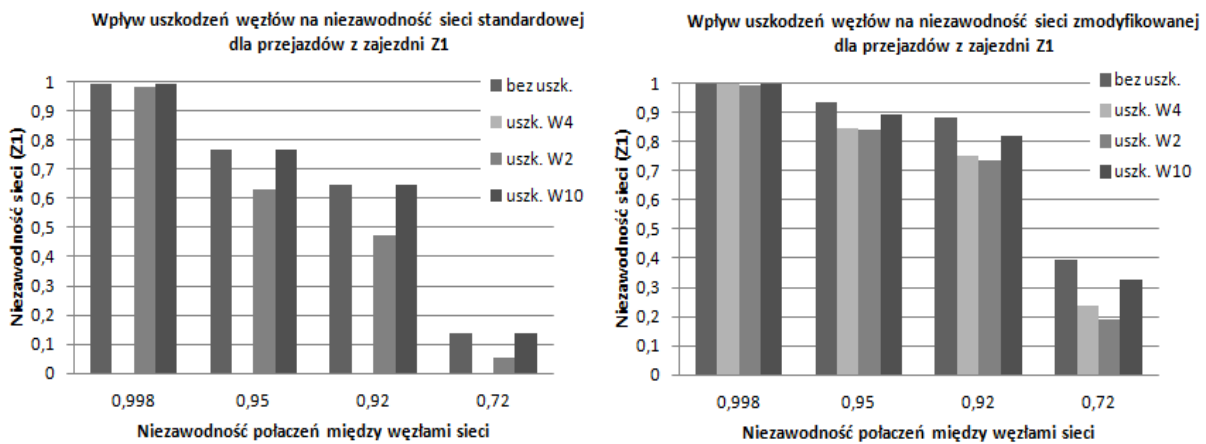
Można zauważyć, że tylko przy dużych wartościach niezawodności połączeń między węzłami ($R=0,998$) wprowadzone modyfikacje nie zmieniają znacząco niezawodności sieci (względna zmiana dla Z1 to 0,8% i dla Z2 to również 0,8%). W pozostałych przypadkach im mniejsza jest niezawodność połączeń tym większa jest zmiana niezawodności sieci w efekcie

jej modyfikacji. W przypadku skrajnym ($R=0,72$) względne zmiany wynoszą odpowiednio: dla Z1 65,2% a dla Z2 69,8%.

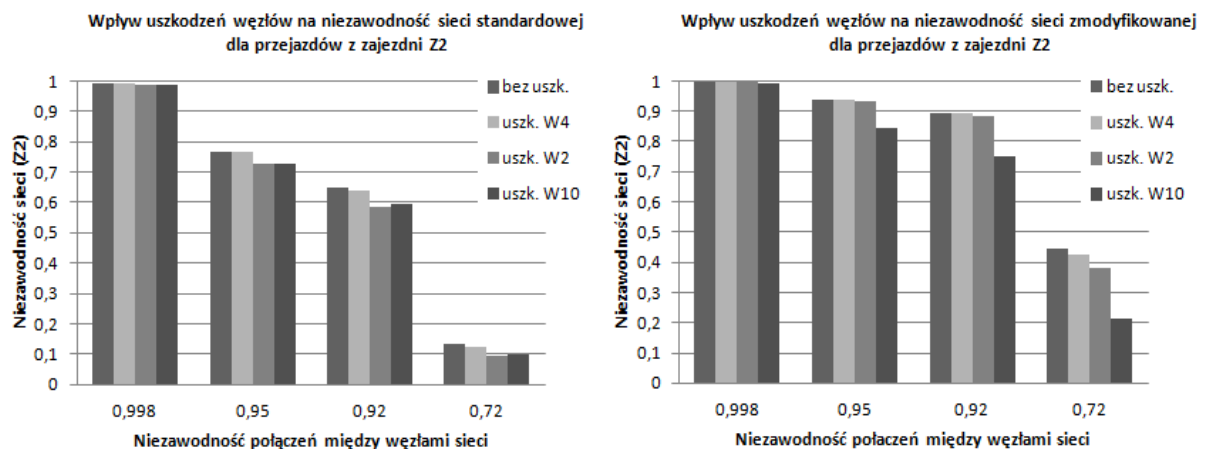
Dodatkowo przeprowadzono analizę niezawodności sieci z uwzględnieniem uszkodzeń węzłów. Uszkodzenie węzła traktowane jest jako uszkodzenie wszystkich połączeń skojarzonych z danym węzłem.

W związku z powyższym wyróżnić można tzw. węzły krytyczne, czyli węzły, których uszkodzenie powoduje brak możliwości realizacji przynajmniej jednego z planowanych przejazdów z danej zajezdni do punktów końcowych tras. W przypadku sieci standardowej (Rys. 2) są to węzły: W4, W8, W9, W6, W7 i W11. W przypadku sieci zmodyfikowanej (Rys. 3) znacznie zmniejsza się liczba węzłów krytycznych, którymi pozostają tylko węzły W8 i W6.

Biorąc pod uwagę uszkodzenia wybranych węzłów (W4, W2, W10), które oprócz W4 w analizowanej sieci nie są węzłami krytycznymi, dla przypadku sieci standardowej otrzymano wyniki przedstawione w postaci histogramów (Rys. 5 i 6).



Rys. 5. Wpływ uszkodzeń węzłów na niezawodność sieci dla przejazdów realizowanych z zajezdni Z1



Rys. 6. Wpływ uszkodzeń węzłów na niezawodność sieci dla przejazdów realizowanych z zajezdni Z2

Skrajne wartości w formie względnych różnic procentowych przedstawiają się następująco:

- dla Z1 uszkodzenie węzła W4 zmniejsza niezawodność o 100% we wszystkich przypadkach (jest to węzeł krytyczny),
- dla Z2 uszkodzenie węzła W4 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o $\approx 0\%$ dla $R=0,998$ oraz o 7,7% dla $R=0,72$,
- dla Z1 uszkodzenie węzła W2 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,8% dla $R=0,998$ oraz o 61,9% dla $R=0,72$,
- dla Z2 uszkodzenie węzła W2 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,2% dla $R=0,998$ oraz o 30,7% dla $R=0,72$,
- dla Z1 uszkodzenie węzła W10 nie zmienia niezawodności,
- dla Z2 uszkodzenie węzła W10 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,2% dla $R=0,998$ oraz o 25,5% dla $R=0,72$.

W sposób analogiczny przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci zmodyfikowanej (Rys. 4 i 5):

- dla Z1 uszkodzenie węzła W4 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,4% dla $R=0,998$ oraz o 38,9% dla $R=0,72$,
- dla Z2 uszkodzenie węzła W4 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o $\approx 0\%$ dla $R=0,998$ oraz o 3,7% dla $R=0,72$,
- dla Z1 uszkodzenie węzła W2 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,4% dla $R=0,998$ oraz o 51,6% dla $R=0,72$,
- dla Z2 uszkodzenie węzła W2 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o $\approx 0\%$ dla $R=0,998$ oraz o 14,5% dla $R=0,72$,
- dla Z1 uszkodzenie węzła W10 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,2% dla $R=0,998$ oraz o 16,8% dla $R=0,72$,
- dla Z2 uszkodzenie węzła W10 zmniejsza niezawodność w skrajnych przypadkach o 0,4% dla $R=0,998$ oraz o 51,5% dla $R=0,72$.

5. Podsumowanie

Ocena niezawodności układów sieciowych wymaga zastosowania wyspecjalizowanych metod obliczeniowych, które nie są prezentowane w klasycznej teorii niezawodności.

Do tych metod można zaliczyć algorytm faktoryzacji, który nadaje się do szybkiej oceny zmian efektywności rezerwowania w zależności od liczby i lokalizacji punktów zasilania, do doboru optymalnej liczby źródeł zasilania i ich usytuowania ze względu na zapewnienie wysokiej niezawodności zasilania badanego fragmentu sieci, do projektowania sieci z uwzględnieniem niezawodności i opłacalności (efektywności) rezerwowania. Zastosowanie jej pozwala na obserwację zmian niezawodności sieci przy wprowadzanych modyfikacjach tej struktury (przez np.: dodawanie kolejnych połączeń), co będzie użyteczne w praktyce dla projektantów nowych sieci oraz przy planowanych modernizacjach i rozbudowie istniejących sieci. Wykorzystany w powyższej analizie algorytm faktoryzacji umożliwi wyznaczenie niezawodności sieci o dowolnej konfiguracji.

W miejsce klasycznych wskaźników i charakterystyk niezawodnościowych proponowane jest zastosowanie parametru strumienia uszkodzeń do oceny niezawodności, co nie tylko nie ogranicza możliwości modernizacji badanych układów, ale zwiększa użyteczny charakter przeprowadzanych analiz niezawodnościowych.

Wielokrotne i szybkie powtarzanie obliczeń dla różnych wariantów modyfikacji sieci wymaga zapisania algorytmu w postaci programu komputerowego.

Ocena niezawodności sieci rozbudowana o analizę ekonomiczną oraz ryzyka związanego z eksploatacją może być użyteczna dla projektantów sieci komunikacyjnych, przy planowanych modernizacjach oraz rozbudowie istniejących sieci.

W artykule przedstawiono oceny niezawodności wybranych fragmentów sieci komunikacyjnej przyjmując, że możliwości zrealizowania przejazdów między wybranymi węzłami sieci stanowi istotne kryterium dla użytkowników (pasażerów) środków komunikacji miejskiej. Możliwości występowania awarii między połączeniami w węzłach sieci są obserwowane w rzeczywistych warunkach eksploatacji i stanowią poważne utrudnienie w realizacji zadań transportu szynowego komunikacji miejskiej. Z tego też względu przedstawiona analiza niezawodnościowa powinna być użyteczna dla miejskich przedsiębiorstw komunikacyjnych w planowaniu i rozbudowie układów trakcyjnych.

Metoda faktoryzacji jest przedstawiona w prezentowanej poniżej literaturze i nie charakteryzowano jej szczegółowo prezentując jedynie wyniki obliczeń ponieważ spowodowałoby to znaczne zwiększenie objętości artykułu, którego celem jest prezentacja metodyki szacowania niezawodności układów sieciowych, a nie metody faktoryzacji.

Literatura

1. Borowiecki R, Kaczmarek J, Magiera J, Młynarski S. Eksploatacja taboru szynowego komunikacji miejskiej. Niezawodność, jakość, ekonomika. Kraków: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, 2004.
2. Brons M, Nijkamp P, Pels E, Rietveld R. Efficiency of urban public transit: A meta analysis. *Transportation* 2005; 32: 1–21.
3. Bryniarska Z. Ocena satysfakcji pasażerów z innowacyjnego rozwiązania w miejskim transporcie zbiorowym w Krakowie. *Transport miejski i regionalny* 2017; 11: 5–9.
4. Carlier J, Lucet C. A decomposition algorithm for network reliability evaluation. *Discrete Applied Mathematics* 1996; 65: 141–156.
5. Cats O, Koppenol GJ, Warnier M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems. *Reliability Engineering and System Safety* 2017; 167; DOI: 10.1016/j.ress.2017.07.009.
6. Crainic TG, Ricciardi N, Storchi G. Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science* 2009; 43(4): 432–454.
7. Heinrich M, Lenkiewicz W. Erhöhung und Auswertung des Zuverlässigkeitsniveaus von tribologischen Paarungen im Zeitraum der Anfangsnutzung eines einzelnen Objekts. *Tribologie und Schmierungstechnik* 2002, 3.
8. Heinrich M. Badania eksploatacyjne jednostkowych złożonych obiektów technicznych w celu podniesienia ich niezawodności konstrukcyjnej. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1993; 1-2 (93-94): 125–133.
9. Holmgren J. The efficiency of public transport operations – An evaluation using stochastic frontier analysis. *Research in Transportation Economics* 2013; 39 (1): 50–57.

10. Jan R-H. Design of reliable networks. *Computers & Operations Research* 1993; 20: 25–34.
11. Jong GDe, Cheung F. Stochastic frontier models for public transport. Meersman H, van de Voorde E, Winkelmanns W eds. *World Transport Research: Selected Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research. Transport Modes and Systems*. New York: Pergamon, 1999; 1: 373–386.
12. Karpiński J, Korczak E. *Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych*. Omnitech Press, 1990.
13. Koide T, Shinmori S, Ishii H. Topological optimization with a network reliability constraint. *Discrete Applied Mathematics* 2001; 115: 135–149.
14. Levaggi R. Parametric and non-parametric approach to efficiency: The case of urban transport in Italy. *Studi Economici* 1994; 49: 67–88.
15. Lucet C, Manouvrier J-F. Exact methods to compute network reliability, in *Statistical and Probabilistic Models in Reliability*. Ionescu DC and Limnios N eds. Boston: Birkhauser, 1999: 279–294.
16. Malasek J. Metoda oceny dostępności i atrakcyjności przystanków miejskiego transportu zbiorowego. *Transport miejski i regionalny* 2017; 9: 26–32.
17. Młynarski S. Niezawodność strukturalna w systemach logistycznych ratownictwa. *Logistyka [CD]* 2014; 4: 871–880.
18. Nolan JF. Determinants of productive efficiency in urban transit. *Logistics and Transportation Review* 1996; 32: 319–342.
19. Oprzędkiewicz J, Młynarski S. Problems of economic safety and intelligence system and reliability of global systems. In *Enterprises in the face of 21st century challenges. Development – management – entrepreneurship*. Borowiecki R & Jaki A eds. Cracow: Cracow University of Economics, 2008: 307–315.
20. Oprzędkiewicz J. *Komputerowa metoda oceny niezawodności systemów technicznych*. Lublin: LTN, 1997.
21. Page LB, Perry JE. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability. *IEEE Transactions on Reliability* 1988; 37: 259–267.
22. Paszkowski J, Kucharski R. Paradoksy przepustowości miejskiej sieci drogowej i sposoby ich odwzorowania w modelu czterostadiowym. *Transport miejski i regionalny* 2017; 10: 5–11.
23. Pilch R, Szybka J. Koncepcja zastosowania algorytmu faktoryzacji do oceny niezawodności ciągów komunikacyjnych – Application of factoring algorithms for estimation of road network reliability. *Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems* 2007; 2: 129–136.
24. Pilch R. Factorisation algorithm-based method used for the calculation of network system's reliability – Metodyka wyznaczania niezawodności układów sieciowych w oparciu o algorytm faktoryzacji. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn – Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance* 2011; 4 (168): 45–57.
25. Pilch R. Reliability evaluation of networks with imperfect and repairable links and nodes. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (1): 19–25.
26. Ramirez-Marquez JE, Rocco CM. All-terminal network reliability optimization via probabilistic solution discovery. *Reliability Engineering and System Safety* 2008; 93: 1689–1697.
27. Rymarz J, Niewczas A, Krzyżak A. Comparison of operational availability of public city buses by analysis of variance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 373–378, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.3.8>.
28. Smalko Z. *Modelowanie eksploatacyjnych systemów transportowych*. Radom: ITE, 1996.

29. Smolnik M. A conception of modernising LEMACH designing methods using TRIZ instruments. Souchkov V, Kässi T. eds. TRIZfest-2014. Theories and applications. The 10th international conference: September 4–6, 2014, Prague, Czech Republic. Conference proceedings. Knoxville: International TRIZ Association – MATRIZ, 2014.
30. Smolnik M. Koncepcja systemu informacyjnego wspomagającego kierowanie eksploatacją złożonych odnawialnych obiektów technicznych. *Logistyka* 2015; 5: 1307–1312.
31. Wiśniewski P. Projekt i implementacja systemu wspomaganie decyzji dla zarządzania kryzysowego transportem miejskim. *Transport miejski i regionalny* 2017; 11: 10–16.
32. Wood RK. Factoring algorithms for computing K-terminal network reliability. *IEEE Transactions on Reliability* 1986; 35 (3): 269–278.
33. Zamojski W. *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Wrocław: Politechnika Wrocławska, 1981.