

Paweł SOBCZAK
Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej
Wydział Nauk Stosowanych
Katedra Inżynierii Zarządzania
psobczak@wsb.edu.pl

ANALIZA STRUKTURALNA SIECI TRANSPORTOWEJ KOLEI MAZOWIECKICH

Streszczenie. Transport publiczny w obrębie aglomeracji oraz terenów do niej przylegających stanowi jeden z najistotniejszych elementów zrównoważonego transportu. Bardzo istotne jest prawidłowe zorganizowanie oraz zaplanowanie sprawnej i odpornej na zakłócenia sieci transportowej. W artykule dokonano analizy strukturalnej – z wykorzystaniem teorii grafów – sieci kolejowej Kolei Mazowieckich, celem oceny jej struktury pod kątem organizacyjnym i funkcjonalnym. Sieć ta wykorzystywana jest m.in. do współrealizacji transportu zbiorowego w obrębie aglomeracji warszawskiej oraz okolicznych terenów.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, transport kolejowy, sieci transportowe

STRUCTURAL ANALYSIS OF KOLEJE MAZOWIECKIE TRANSPORT NETWORK

Abstract. Public transport within the urban areas and areas adjacent to it is one of the most important elements of sustainable transportation. Accordingly, it is essential to properly organizing and planning efficient and noise-robust system transport (transport network). The article presents structural analysis with the use of graph theory for the Koleje Mazowieckie railway network to assess its structure in terms of organizational and functional. The network is used, among others, to co-realization of public transport within the Warsaw agglomeration and the surrounding areas.

Keywords: public transport, railway transport, transport networks

1. Wstęp

Zrównoważony transport stanowi jeden z głównych celów polityki transportowej Unii Europejskiej. Jest to szczególnie istotne w obszarze aglomeracji i okolicznych obszarów przyaglomeracyjnych. Różne względy, w tym społeczne i gospodarcze, w gospodarkach rozwijających się (w tym w Polsce) powodują, że społeczeństwo bardzo często celem realizacji codziennych podróży wykorzystuje transport indywidualny. Jest to bardzo niekorzystna sytuacja, niezgodna również z założeniami tzw. Białej Księgi, która zakłada zwiększenie udziału transportu zbiorowego (z głównym naciskiem na transport zbiorowy „ekologiczny”, czyli szynowy i trolejbusowy) w zamian za transport indywidualny¹. Na dodatek średnie napelnienie samochodu osobowego wynosi niestety tylko około 1,3 osoby². Jest to bardzo mała wartość wskaźnika ukazująca, że sieć transportu drogowego nie jest wykorzystywana w sposób optymalny. Jest to szczególnie istotne w dużych aglomeracjach i obszarach aglomeracyjnych, gdzie konieczne jest zapewnienie sprawnego, szybkiego, bezpiecznego i odpornego na zakłócenia układu transportowego, którego celem jest umożliwienie przemieszczania dużej liczbie osób w tym samym czasie. Układ taki powinien się charakteryzować również odpornością na różne występujące w nim zakłócenia losowe.

Celem zwiększenia odporności na zakłócenia oraz usprawnienia transportu w aglomeracjach powinno się dążyć do realizacji transportu osób w sposób zrównoważony, głównie poprzez wykorzystanie transportu zbiorowego. W Polsce najpopularniejszym rodzajem transportu zbiorowego jest transport drogowy (głównie autobusowy), którego główną wadą, oprócz negatywnego wpływu na środowisko naturalne, jest również fakt, że transport taki odbywa się po tych samych drogach co ruch indywidualny (który to głównie jest przyczyną powstawania kongestii transportowej w polskich miastach). Wprawdzie w coraz większej liczbie miast dla transportu publicznego wydzielane są oddzielne pasy ruchu (tzw. bus pasy), jednak jest to rozwiązanie, które bardzo często nie jest odporne na zakłócenia powstałe na danym odcinku drogi. Gałęzią transportu, której cechą charakterystyczną jest niska szkodliwość dla środowiska oraz bezpieczeństwo jazdy, jak również wysoki wskaźnik punktualności jest transport kolejowy. Po kilkudziesięciu latach zaniedbywania i zapaści tej gałęzi transportu w zakresie realizacji transportu aglomeracyjnego od kilku lat ponownie zaczyna się wykorzystywać ją do realizacji tego typu podróży. Sieci aglomeracyjne, czy też sieci miejskie, powstały w każdej największej aglomeracji i konurbacji na terenie Polski. Sieć tego typu na bazie infrastruktury kolejowej zarządzanej przez PKP PLK S.A. powstała również w aglomeracji Warszawskiej w postaci przewoźnika kolejowego Koleje Mazowieckie.

¹ Biała Księga – plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu – dokument elektroniczny http://europa.eu/documentation/official-docs/white-papers/index_pl.htm, 04.10.2013.

² Strona internetowa kampanii społecznej „Jedź właściwym pasem”, siskom.waw.pl/kp-buspas1.htm, 02.08.2016.

2. Koleje Mazowieckie

Koleje Mazowieckie to spółka, która została powołana przez samorząd województwa mazowieckiego (51% udziałów) oraz PKP Przewozy Regionalne Sp. z o.o. (49% udziałów) 29 lipca 2004, a swoją działalność przewozową rozpoczęła 1 stycznia 2005 roku. Od 8 stycznia 2008 roku jedynym udziałowcem Kolei Mazowieckich jest samorząd województwa mazowieckiego³.

Według danych udostępnionych przez spółkę w roku 2014 na 15 liniach kolejowych Koleje Mazowieckie uruchamiały średnio na dobę 800 pociągów. W 2014 roku Koleje Mazowieckie przewiozły 62,57 mln osób. Do przewozu pasażerów Koleje Mazowieckie wykorzystują m.in. następujący tabor (w sumie 284 pojazdy kolejowe)⁴:

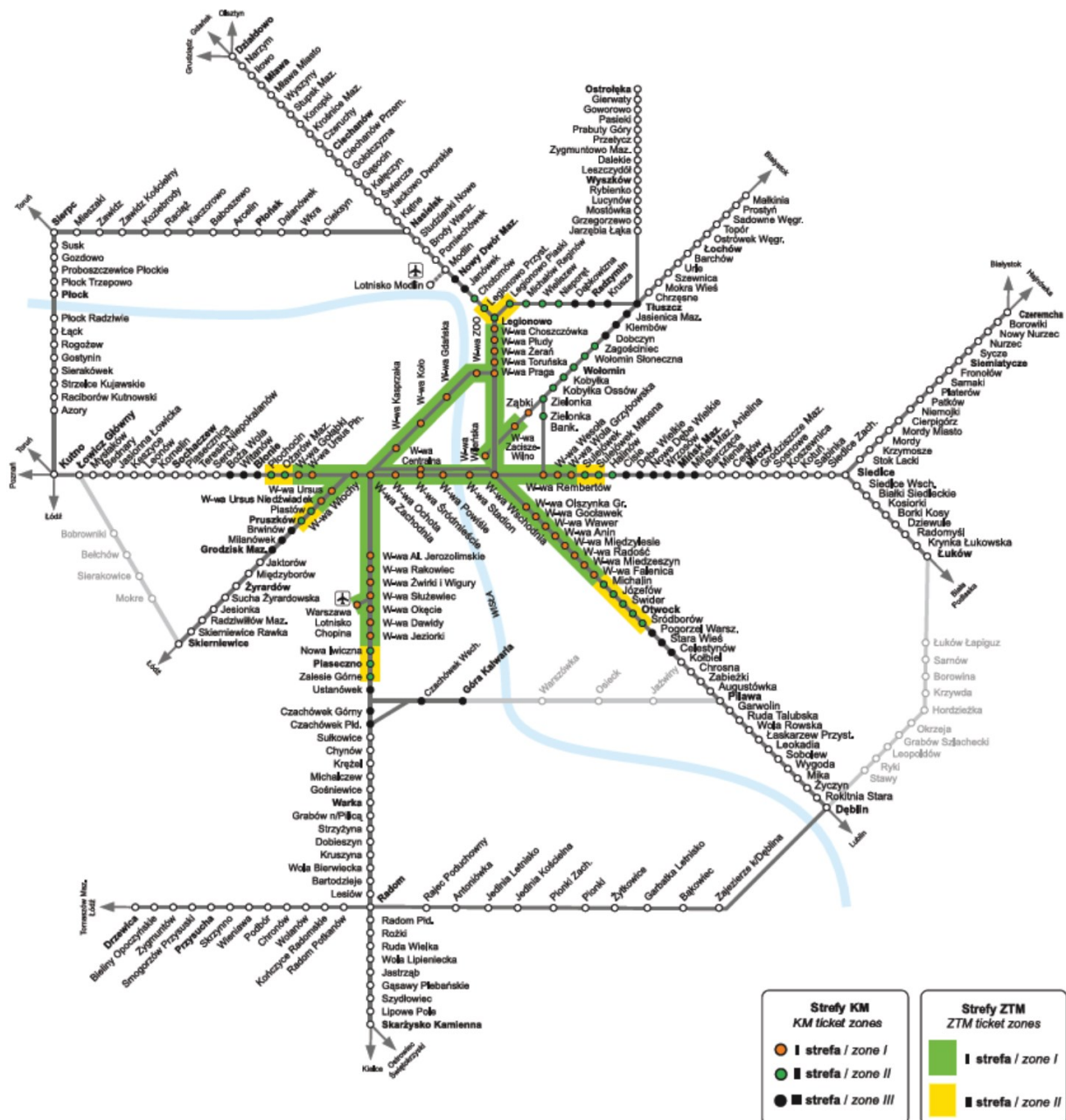
- Elektryczne zespoły trakcyjne EN57 (105 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne EN57AKM (72 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne EN57AL (9 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne EN71/En71KM (6 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne EW60 (2 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne ER75 (10 szt.);
- Elektryczne zespoły trakcyjne EN76 (16 szt.);
- Spalinowe autobusy szynowe VT627 (6 szt.);
- Spalinowe autobusy szynowe VT628 (3 szt.);
- Spalinowe autobusy szynowe SA135 (6 szt.);
- Spalinowy autobus szynowy SA222 (1 szt.);
- Wagony piętrowe (37 szt.);
- Lokomotywy elektryczne EU47 (11 szt.).

Oprócz wymienionego taboru wykorzystywane są również pojazdy pomocnicze itp.

Schemat linii kolejowych Kolei Mazowieckich przedstawiono na rys. 1.

³ Strona internetowa Kolei Mazowieckich, www.mazowieckie.com.pl, 02.08.2016.

⁴ Koleje Mazowieckie. Raport Roczny 2014.



Rys. 1. Schemat Linii Kolejowej Kolei Mazowieckich

Źródło: Koleje Mazowieckie. Raport Roczny 2014 (dokument elektroniczny).

Jak przedstawiono na rys. 1, Koleje Mazowieckie swoją działalnością obejmują nie tylko teren aglomeracji warszawskiej, ale praktycznie obszar całego województwa. Jest to bardzo istotne, gdyż umożliwia to przemieszczanie po terenie województwa z wykorzystaniem analizowanej gałęzi transportu (transportu kolejowego) w zamian za chociażby transport indywidualny czy też zbiorowy samochodowy (głównie autobusowy). Jednak aby Koleje Mazowieckie dobrze realizowały swoje zadania, ich działalność oprócz oferty częstych przejazdów na poszczególnych trasach oraz dbałości o atrakcyjność oferty cenowej za świadczone usługi, musi również charakteryzować się dobrze zorganizowaną siecią transportową, która będzie zaprojektowana „pod pasażera” (krótki czas przejazdu, krótkie

odcinki tras – możliwość dojazdu z każdej i -tej stacji do każdej j -tej bez konieczności licznych przesiadek czy też „objazdów” po sieci wydłużających całą podróż) oraz odporna na ewentualne zakłócenia (niezamierzone w postaci awarii, zdarzeń losowych czy też zdarzenia zaplanowane – sabotaż, ataki terrorystyczne itp.).

Celem oceny struktury sieci Kolei Mazowieckich w aspekcie organizacyjnym i funkcjonalnym dokonano analizy strukturalnej sieci przedstawionej na rys. 1, pod kątem jej parametrów, jako sieci transportowej z wykorzystaniem teorii grafów. Przeprowadzona analiza miała na celu, oprócz oceny ogólnej sieci, wykazanie jej ewentualnych słabych punktów, zarówno pod kątem aspektów organizacyjnych, jak i odporności na ewentualne zakłócenia (wynikające np. z awarii sprzętu lub zamierzonych ataków na sieć – np. terrorystycznych).

3. Metodologia przeprowadzonych badań

Teoria grafów bardzo często wykorzystywana jest do analizy różnego rodzaju sieci, głównie społecznych⁵, ale również sieci neuronowych⁶, sieci biologicznych⁷ oraz sieci komputerowych⁸. Możliwości analizy z wykorzystaniem teorii grafów opisanych wcześniej sieci przedstawiono również w pracy Newmana⁹. Zgodnie z informacjami zawartymi m.in. w tej i innych pracach¹⁰ powyższe metody teorii grafów można wykorzystać również do analizy sieci transportowych, głównie pod kątem organizacyjnym i funkcjonalnym, ale analiza

⁵ Amaral L.A.N., Scala A., Barthelemy M., Stanley H.E.: Classes of small-world networks. “Proc. Natl. Acad. Sci.”, No. 97(21), 2000, p. 11149-11152; Arenas A., Danon L., Diaz-Guilera A., Gleiser P.M., Guimera R.: Community analysis in social networks. “Eur. Phys. J. B.”, No. 38(2), 2003, p. 373-380; Newman M.E.J., Watts D.J., Strogatz S.H.: Random graph models of social networks. “Proc. Natl. Acad. Sci.”, No. 99, 2002, p. 2566-2572.

⁶ Bullmore E., Sporns O.: Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. “Nat. Rev. Neurosci.”, No. 10(3), 2009; Sporns O.: Network analysis, complexity, and brain function. “Complexity”, No. 8(1), 2002; Stam C.J., Reijneveld J.C.: Graph theoretical analysis of complex networks in the brain. “Nonlinear Biomed. Phys.”, No. 1(3), 2007.

⁷ Rual J.-F., Venkatesan K., Hao T., Hirozane-Kishikawa T., Dricot A., Li N., Berriz G.F., Gibbons F.D., Dreze M., Ayivi-Guedehoussou N., Klitgord N., Simon C., Boxem M., Milstein S., Rosenberg J., Goldberg D.S., Zhang L.V., Wong S.L., Franklin G., Li S., Albalá J.S., Lim J., Fraughton C., Llamas E., Cevik S., Bex C., Lamesch P., Sikorski R.S., Vandenhoute J., Zoghbi H.Y., Smolyar A., Bosak S., Sequerra R., Doucette-Stamm L., Cusick M.E., Hill D.E., Roth F.P., Vidal M.: Towards a proteome-scale map of the human protein-protein interaction network. “Nature”, No. 437(7062), 2005.

⁸ Valverde S., Solé R.V.: Hierarchical small worlds in software architecture. “Arxiv. Prepr. Cond.-Mat.”, No. 0307278 2003.

⁹ Newman M.E.J.: Networks: An Introduction. Oxford University Press Inc., New York 2010.

¹⁰ Newman M.E.J.: op.cit.; Tarapata Z.: Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study. “The Archives of Transport”, Vol. 36, Iss. 4, 2015; Wilkinson S., Dunn S., Ma S.: The vulnerability of the European air traffic network to spatial hazards. “Nat. Hazards”, No. 60(3), 2012, p. 1027-1036; Li H., Guo X.M., Xu Z., Hu X.B.: A study on the spatial vulnerability of the civil aviation network system in China. Proceedings of the IEEE 17th international conference on intelligent transportation systems. Qingdao, China 2014; Ouyang M., Pan Z., Hong L., He Y.: Vulnerability analysis of complementary transportation systems with applications to railway and airline systems in China. “Reliab. Eng. Syst. Saf.”, No. 142, 2015, p. 248.

ta, połączona z analizą przestrzenną sieci, umożliwia również wyciągnięcie wstępnych wniosków o odporności sieci na zakłócenia lub zagrożenia. Uzyskane z analizy informacje o typie sieci czy też o roli poszczególnych węzłów w sieci pozwalają wstępnie oszacować, które z punktów są szczególnie wrażliwe na potencjalne zagrożenia lub ataki¹¹. Większość ze stosowanych mierników oraz obliczeń pozwala uzyskać informację, który z punktów (lub punkty) sieci pełni główną rolę lub są swoistym centrum analizowanej sieci. Każda sieć może zostać opisana jako zbiór węzłów i powiązań pomiędzy nimi:

$$G = \langle V, E \rangle \quad (1)$$

gdzie:

V – zbiór węzłów,

E – zbiór powiązań pomiędzy węzłami.

Oczywiście dla każdej analizowanej sieci istnieje zależność, że:

$$|V| = N, |E| = M \quad (2)$$

Do najczęściej wykorzystywanych wskaźników należą, opisane szczegółowo w ww. pracach¹², wskaźniki:

1) Stopień normalizacji (ang. *normalized degree*) dc_i i -tego węzła sieci:

$$dc_i = \frac{k_i}{N - 1} \quad (3)$$

gdzie:

k_i – stopień i -tego węzła w sieci (liczba połączeń węzła sieci z innymi węzłami),

N – liczba węzłów w sieci.

Im większa jest wartość wskaźnika dc_i dla i -tego węzła tym ten węzeł pełni ważniejszą funkcję w sieci lub jest położony bliżej jej centrum.

2) Mimośrodowość (ang. *eccentricity*) ec_i i -tego węzła sieci:

$$ec_i = \max_{j \in V} d_{ij} \quad (4)$$

gdzie: d_{ij} – liczba powiązań pomiędzy węzłami, która występuje na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem i oraz j .

Im wartość współczynnika ec_i jest mniejsza dla i -tego węzła, tym ten węzeł pełni ważniejszą funkcję w sieci lub jest położony bliżej jej centrum.

¹¹ Newman M.E.J.: op.cit.; Tarapata Z.: op.cit.

¹² Ibidem.

3) Promień zasięgu (ang. *radius*) rc_i i -tego węzła sieci:

$$rc_i = \frac{1}{\max_{j \in V} d_{ij}} = \frac{1}{ec_i} \quad (5)$$

gdzie:

d_{ij} – liczba powiązań pomiędzy węzłami występująca na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem i oraz j ,

ec_i – mimośrodowość i -tego węzła sieci.

Im wartość współczynnika rc_i jest większa dla i -tego węzła tym węzeł ten pełni ważniejszą funkcję w sieci lub jest położony bliżej jej centrum.

4) Współczynnik bliskości (ang. *closeness*) cc_i :

$$cc_i = \frac{N - 1}{\sum_{j \in V} d_{ij}} \quad (6)$$

gdzie:

N – liczba węzłów w sieci,

d_{ij} – liczba powiązań pomiędzy węzłami występująca na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem i oraz j .

5) Współczynnik ważności/wagi (ang. *betweenness*) bc_i i -tego węzła:

$$bc_i = \sum_{l \in V} \sum_{k \neq l \in V} \frac{p_{l,i,k}}{p_{l,k}} \quad (7)$$

gdzie:

$p_{l,i,k}$ – liczba połączeń o najkrótszej liczbie węzłów pomiędzy węzłami l i k (zawierających węzeł i),

$p_{l,k}$ – liczba połączeń o najkrótszej liczbie węzłów pomiędzy węzłami l i k (niezawierających węzła i).

Im wartość współczynnika bc_i jest większa dla i -tego węzła, tym węzeł ten pełni ważniejszą funkcję w sieci lub jest położony bliżej jej centrum.

6) Współczynnik klasteryzacji/grupowości (ang. *clusterization*) gc_i i -tego węzła:

$$gc_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}, k_i > 1 \quad (8)$$

gdzie:

E_i – liczba wiązań pomiędzy węzłami, które są najbliżej (sąsiadami) i -tego węzła,

k_i – stopień i -tego węzła w sieci (liczba połączeń węzła sieci z innymi węzłami).

Im wartość współczynnika gc_i jest większa dla i -tego węzła, tym węzeł ten pełni ważniejszą funkcję w sieci lub jest położony bliżej jej centrum.

Wzory (2)-(8) opisują parametry poszczególnych węzłów sieci, ale oprócz nich często stosowane są współczynniki umożliwiające określenie parametrów całej analizowanej sieci. Są to¹³:

7) Średnia długość najkrótszej ścieżki (ang. *average shortest paths length*) L :

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} d_{ij} \quad (9)$$

gdzie:

N – liczba węzłów w sieci,

d_{ij} – liczba powiązań pomiędzy węzłami występująca na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem i oraz j .

Im wartość średniej długości najkrótszej ścieżki jest niższa, tym analizowana sieć jest lepsza.

8) Współczynnik klasteryzacji/grupowości (ang. *clusterization coefficient*) C :

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in V} gc_i \quad (10)$$

gdzie:

N – liczba węzłów w sieci,

gc_i – współczynnik klasteryzacji/grupowości.

Im wartość współczynnika klasteryzacji/grupowości większa, tym analizowana sieć jest lepsza.

9) Średnica sieci (ang. *diameter*) D :

$$D = \max_{i \in V} ec_i \quad (11)$$

gdzie: ec_i – mimośrodowość i -tego węzła sieci.

Im wartość średnicy sieci mniejsza, tym sieć jest lepsza.

10) Promień zasięgu sieci (ang. *radius of a network*) R :

$$R = \min_{i \in V} ec_i \quad (12)$$

gdzie: ec_i – mimośrodowość i -tego węzła sieci.

Im promień zasięgu sieci mniejszy, tym sieć jest lepsza.

¹³ Ibidem.

11) Średni stopień węzłów sieci (ang. *average nodes degree*) \bar{k} :

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i \in V} k_i \quad (13)$$

gdzie:

N – liczba węzłów w sieci,

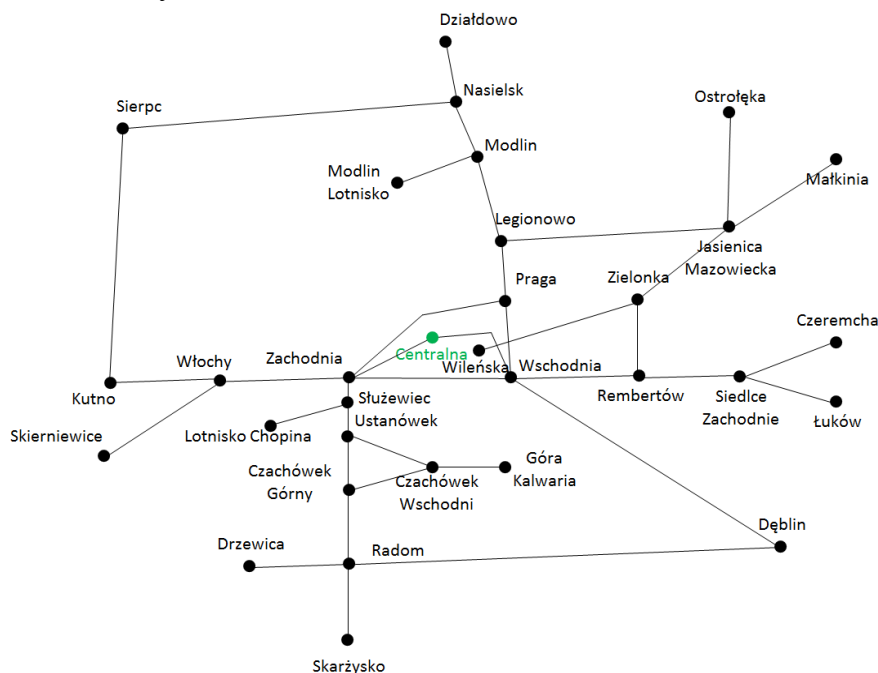
k_i – stopień i -tego węzła w sieci (liczba połączeń węzła sieci z innymi węzłami).

Im średni stopień węzłów sieci większy, tym sieć jest lepsza.

Obliczenie wartości powyższych wskaźników umożliwia ocenę zależności pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci, jak również pozwala określić, z jakim typem sieci mamy do czynienia, a także który lub które węzły w sieci pełnią dominującą rolę. Praktycznie nie występują w sieciach sytuacje, aby wszystkie węzły miały ten sam stopień „ważności”. W każdej sieci występują węzły kluczowe, bardziej niż inne odpowiedzialne za prawidłowe funkcjonowanie całej sieci. Określenie tych węzłów oraz ich lokalizacji umożliwia wyciągnięcie wniosków na temat aktualnego stanu sieci, jej odporności na ewentualne zakłócenia oraz możliwości jej usprawnienia.

4. Wyniki przeprowadzonych analiz

Na podstawie rys. 1 opracowano schemat sieci transportowej Kolei Mazowieckich, który przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Układ sieci Kolei Mazowieckich

Źródło: Opracowanie własne na podstawie rys. 1.

Jak przedstawiono na rys. 2, uzyskany układ sieci zbudowany jest z 32 węzłów powiązanych ze sobą odpowiednimi relacjami odpowiadającymi układowi sieci Kolei Mazowieckich. Na rysunku 2, celem lepszego zobrazowania i przeanalizowania parametrów sieci, przedstawiono tylko węzły końcowe oraz „pośrednie”, pełniące rolę łączników lub umożliwiające zmianę kierunku. Oprócz tych węzłów na opracowanym układzie umieszczono również węzły, które nie są łącznikami dla sieci Kolei Mazowieckich, ale stanowią węzeł przesiadkowy na środki transportu kolejowego innych przewoźników (są to węzły Dęblin, Kutno i Sierpc).

Dla uzyskanej sieci dokonano obliczeń parametrów opisanych w rozdziale 3, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wskaźniki poszczególnych węzłów sieci

Miasto	stopień węzła k_i	stopień normalizacji dc_i	mimo- środkowość ec_i	promień zasięgu rc_i	wsp. bliskości cc_i	wsp. ważności bc_i	wsp. klasteryzacji gc_i
Czachówek Górny	3	0.097	8	0.125	0.230	25.000	0.333
Czachówek Wschodni	3	0.097	8	0.125	0.214	30.000	0.333
Czeremcha	1	0.032	8	0.125	0.197	0	0
Dęblin	2	0.065	6	0.167	0.298	85.167	0
Drzewica	1	0.032	8	0.125	0.207	0	0
Działdowo	1	0.032	9	0.111	0.181	0	0
Góra Kalwaria	1	0.032	9	0.111	0.177	0	0
Jasienica Mazowiecka	4	0.129	7	0.143	0.270	82	0
Kutno	2	0.065	6	0.167	0.242	32.833	0
Legionowo	3	0.097	6	0.167	0.307	134.667	0
Łuków	1	0.032	8	0.125	0.197	0	0
Małkinia	1	0.032	8	0.125	0.214	0	0
Modlin	3	0.097	7	0.143	0.256	79.167	0
Modlin Lotnisko	1	0.032	8	0.125	0.205	0	0
Nasielsk	3	0.097	8	0.125	0.220	44.500	0
Ostrołęka	1	0.032	8	0.125	0.214	0	0
Radom	4	0.129	7	0.143	0.258	82.167	0
Siedlce Zachodnie	3	0.097	7	0.143	0.244	59	0
Sierpc	2	0.065	7	0.143	0.221	19.333	0
Skarżysko Kamienna	1	0.032	8	0.125	0.207	0	0
Skiernewice	1	0.032	6	0.167	0.225	0	0
Ustanówek	3	0.097	7	0.143	0.254	58.833	0.333
Warszawa Centralna	2	0.065	6	0.167	0.290	0	1
Warszawa Lotnisko Chopina	1	0.032	7	0.143	0.230	0	0
Warszawa Praga	3	0.097	5	0.200	0.341	109.167	0.333
Warszawa Rembertów	3	0.097	6	0.167	0.307	126.500	0
Warszawa Służewiec	3	0.097	6	0.167	0.295	98.833	0
Warszawa Wileńska	1	0.032	8	0.125	0.218	0	0
Warszawa Włochy	3	0.097	5	0.200	0.287	76.833	0
Warszawa Wschodnia	5	0.161	5	0.200	0.356	180.833	0.200
Warszawa Zachodnia	5	0.161	5	0.200	0.352	174.667	0.200
Zielonka	3	0.097	7	0.143	0.277	61.500	0

Źródło: Opracowanie własne na podstawie rys. 2.

że w analizowanym układzie pominięto stacje leżące na poszczególnych szlakach, przy ich uwzględnieniu parametr uzyskałby znacznie większą wartość).

5. Podsumowanie

Sieci transportu kolejowego stanowią bardzo istotny element układu transportowego aglomeracji oraz terenów przyaglomeracyjnych. Jak przedstawiono w artykule, sieć Kolei Mazowieckich pozwala na dotarcie do znacznej liczby miejsc w województwie mazowieckim. Umożliwia ona wsparcie funkcjonowania nie tylko transportu w aglomeracji, ale również w jej okolicy, co może stanowić istotny element podczas jeszcze większej popularyzacji tego środka transportu w zamian za np. transport indywidualny.

Sieć Kolei Mazowieckich charakteryzuje się niestety dość dużą wartością średniej długości ścieżki (liczby węzłów, przez które musimy przejechać, aby dotrzeć do celu – mała liczba bezpośrednich połączeń pomiędzy poszczególnymi węzłami), ale jest to dość charakterystyczne dla większości sieci transportu kolejowego (wynika to z ich cech infrastrukturalnych).

Co istotne, sieć Kolei Mazowieckich nie ma jednego węzła centralnego, ale funkcję tę pełni kilka z nich, a 3 z nich (Warszawa Zachodnia, Warszawa Wschodnia, Warszawa Praga) stanowią swoisty trójkąt centralny. Taki układ sieci zwiększa jej odporność na ewentualne zakłócenia, które mogłyby się pojawić na jednym z węzłów – połączenie z pozostałymi węzłami umożliwia doraźne ominięcie newralgicznego węzła bez całkowitego paraliżu całej sieci. Jest to bardzo istotny element analizowanej sieci, z uwagi na jej zwiększoną odporność na zagrożenia w centralnej części, które mogą ewentualnie wystąpić (zamierzone w postaci ataków terrorystycznych lub niezamierzone w postaci awarii lub zdarzeń losowych).

Celem polepszenia struktury sieci autor sugeruje, aby w jej strukturę włączyć istniejącą sieć kolejową, pomiędzy węzłami:

- Łuków – Dęblin,
- Skierniewice – Łowicz Główny.

Zaproponowany zabieg umożliwiłby utworzenie ewentualnych połączeń pomiędzy peryferyjnymi węzłami sieci, nie tylko przez jej centrum, ale również po obwodzie sieci, co również mogłoby się przyczynić do polepszenia jej struktury funkcjonalnej (oczywiście musiałoby to zostać poprzedzone analizami prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji nadzwyczajnej i jej potencjalnych skutków oraz analizami opłacalności ekonomicznej takich działań).

Bardzo istotną cechą analizowanej sieci jest wdrożony wspólny bilet z innymi środkami transportu (głównie samochodowego) w jej centralnej części (rys. 1). Umożliwia to swobodną zmianę środka transportu oraz dodatkowo zabezpiecza sieć przed skutkami ewentualnych zakłóceń (doraźnie pasażerów można skierować na współpracującą gałąź transportu). Stanowi

to również pozytywny przykład wspólnej polityki transportowej kilku przewoźników, która może zachęcać pasażerów do korzystania z transportu zbiorowego zamiast indywidualnego. Brak takiego rozwiązania i jego negatywne skutki są widoczne dosyć dobrze np. w województwie śląskim i jego centralnej części (konurbacja górnośląska).

Bibliografia

1. Amaral L.A.N., Scala A., Barthelemy M., Stanley H.E.: Classes of small-world networks. "Proc. Natl. Acad. Sci.", No. 97(21), 2000.
2. Arenas A., Danon L., Diaz-Guilera A., Gleiser P.M., Guimera R.: Community analysis in social networks. "Eur. Phys. J. B.", No. 38(2), 2003.
3. Bullmore E., Sporns O.: Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. "Nat. Rev. Neurosci.", No. 10(3), 2009.
4. Li H., Guo X.M., Xu Z., Hu X.B.: A study on the spaital vulnerability of the civil aviation network system in China. Proceedings of the IEEE 17th international conference on intelligent transportation systems. Qingdao, China 2014.
5. Newman M.E.J.: Networks: An Introduction. Oxford University Press Inc., New York 2010.
6. Newman M.E.J., Watts D.J., Strogatz S.H.: Random graph models of social networks. "Proc. Natl. Acad. Sci.", No. 99, 2002.
7. Ouyang M., Pan Z., Hong L., He Y.: Vulnerability analysis of complementary transportation systems with applications to railway and airline systems in China. "Reliab. Eng. Syst. Saf.", No. 142, 2015.
8. Rual J.-F., Venkatesan K., Hao T., Hirozane-Kishikawa T., Dricot A., Li N., Berriz G.F., Gibbons F.D., Dreze M., Ayivi-Guedehoussou N., Klitgord N., Simon C., Boxem M., Milstein S., Rosenberg J., Goldberg D.S., Zhang L.V., Wong S.L., Franklin G., Li S., Albala J.S., Lim J., Fraughton C., Llamosas E., Cevik S., Bex C., Lamesch P., Sikorski R.S., Vandenhaute J., Zoghbi H.Y., Smolyar A., Bosak S., Sequerra R., Doucette-Stamm L., Cusick M.E., Hill D.E., Roth F.P., Vidal M.: Towards a proteome-scale map of the human protein–protein interaction network. "Nature", No. 437(7062), 2005.
9. Sporns O.: Network analysis, complexity, and brain function. "Complexity", No. 8(1), 2002.
10. Stam C.J., Reijneveld J.C.: Graph theoretical analysis of complex networks in the brain. "Nonlinear Biomed. Phys.", No. 1(3), 2007.
11. Tarapata Z.: Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study. "The Archives of Transport", Vol. 36, Iss. 4, 2015.

12. Valverde S., Solé R.V.: Hierarchical small worlds in software architecture. "Arxiv. Prepr. Cond.-Mat.", No. 0307278 2003.
13. Wilkinson S., Dunn S., Ma S.: The vulnerability of the European air traffic network to spatial hazards. "Nat. Hazards", No. 60(3), 2012.
14. Biała Księga – Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu", http://europa.eu/documentation/official-docs/white-papers/index_pl.htm, 04.10.2013.
15. Koleje Mazowieckie. Raport Roczny 2014 (dokument elektroniczny).
16. Strona internetowa kampanii społecznej „Jedź właściwym pasem”, siskom.waw.pl/kp-buspas1.htm, 02.08.2016.
17. Strona internetowa Kolei Mazowieckich: www.mazowieckie.com.pl, 02.08.2016.