

Paweł Sobczak

Akademia WSB

e-mail: psobczak@wsb.edu.pl

**ANALIZA STRUKTURALNA SIECI TRANSPORTOWEJ
KOLEI ŚLĄSKICH JAKO ELEMENTU STRATEGII
LOGISTYCZNEJ PRZEDSIĘBIORSTWA**

**STRUCTURAL ANALYSIS OF KOLEJE ŚLĄSKIE
TRANSPORT NETWORK AS AN ELEMENT
OF ENTERPRISE LOGISTIC STRATEGY**

DOI: 10.15611/pn.2018.505.30

JEL Classification: L92

Streszczenie: Sieci transportowe stanowią jeden z najistotniejszych elementów sprawnego funkcjonowania gospodarki każdego państwa oraz jego społeczeństwa. Stanowią one również kluczowy element funkcjonowania przedsiębiorstw transportowych, w tym przedsiębiorstw realizujących transport zbiorowy na danym obszarze lub w regionie. W artykule dokonano analizy strukturalnej sieci kolejowej wykorzystywanej do realizacji usług transportowych przez spółkę Koleje Śląskie. Przeprowadzone analizy oraz ich wyniki umożliwiły uzyskanie informacji na temat aktualnej struktury sieci oraz pozwoliły na wyciągnięcie wniosków umożliwiających ewentualne usprawnienie analizowanej sieci transportowej przez spółkę, co powinno stanowić istotny element strategii logistycznej przedsiębiorstwa.

Słowa kluczowe: analiza strukturalna sieci, sieci transportowe, transport kolejowy, Koleje Śląskie.

Summary: Transport networks are one of the most important elements of the smooth functioning of the economy of every country and its society. They also represent a key element for the functioning of transport companies, including companies performing public transport in a given area or region. The article analyzes the structural rail network used to carry out transport services by the Koleje Śląskie company. The analysis conducted and their results made it possible to obtain information about the current network structure and allowed to draw conclusions enabling potentially to improve the transport network analyzed by the company, which should be an important part of logistics strategy of the company.

Keywords: structural analysis of networks, transport networks, rail transport, Koleje Śląskie.

1. Wstęp

Sieci transportowe, obok sieci telekomunikacyjnych, elektrycznych i zaopatrzenia w wodę, stanowią jeden z najistotniejszych elementów sprawnego funkcjonowania zarówno gospodarki każdego państwa, jak i jego społeczeństwa. Są one istotne pod względem gospodarczym, jak też w zakresie zapewnienia wygodnego i sprawnego funkcjonowania społeczeństwa, oraz kluczowe pod kątem zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa [Dunn, Wilkinson 2017]. Powiązane jest to także z koniecznością zapewnienia sprawnego i odpornego na zakłócenia układu transportowego. Sprawna sieć transportowa oraz jej struktura opracowana przez przedsiębiorstwo powinny również umożliwić przedsiębiorstwu uzyskanie przewagi konkurencyjnej nad innymi przedsiębiorstwami transportowymi działającymi na tym samym obszarze. Stanowi ona także kluczowy element strategii zarządzania logistycznego przedsiębiorstwa, chociażby w zakresie zapewnienia odpowiedniego poziomu obsługi klienta – zapewnienie tego poziomu jest wg [Witkowski 1995] jednym z głównych elementów strategii logistycznej przedsiębiorstwa. Nieprawidłowo zaprojektowany układ sieci transportowej będzie uniemożliwiał uzyskanie wymaganego poziomu obsługi klienta. Obecnie klient dokonuje wyboru środka transportu na podstawie wielu czynników, m.in. dostępności oraz odległości od miejsca docelowego, liczby przesiadek itp., tak więc odpowiednio opracowana sieć transportowa przewoźnika stanowi kluczowy element do uzyskania wymaganego poziomu obsługi.

Współczesne układy: transportowe, telekomunikacyjne, elektryczne itd., stanowią zbiór – sieć skomplikowanych połączeń, w których występują liczne wzajemne relacje i powiązania [Eusgeld i in. 2009; La Rovere, Vestrucci 2012], co powoduje, że ich analiza zarówno pod kątem organizacyjnym, jak i odporności na ewentualne zakłócenia jest zagadnieniem bardzo trudnym [*Infrastructure...* 2011]. Metody analizy sieci stosowane są już od kilku lat, głównie do analizy systemów społecznych [Amaral i in. 2000; Arenas i in. 2003; Newman i in. 2002], ale też sieci neuronowych [Bullmore, Sporns 2009; Sporns 2002; Stam, Reijneveld 2007], sieci biologicznych [Rual i in. 2005] oraz systemów komputerowych [Valverde, Solé 2003]. Spowodowało to znaczne matematyczne rozwinięcie tych metod. Możliwości analizy z wykorzystaniem teorii grafów opisanych wcześniej sieci przedstawiono również w [Newman 2010]. Jak zauważają [Dunn, Wilkinson 2017; Tarapata 2015; Newman 2010; Wilkinson i in. 2012; Li i in. 2014; Ouyang i in. 2015], do analizy sieci transportowych można skutecznie zastosować te same metody oraz współczynniki, które są stosowane przez socjologów do analizy sieci społecznych. W [Dunn, Wilkinson 2017] przedstawiona została analiza porównawcza trzech typów sieci, które swoimi parametrami odpowiadają sieciom rzeczywistym, oraz przeprowadzono analizę ich odporności na zakłócenia, natomiast w [Tarapata 2015] przedstawiona została analiza sieci transportowych w Polsce trzech różnych gałęzi: transportu lotniczego, transportu kolejowego oraz transportu samochodowego.

W niniejszym artykule dokonano analizy strukturalnej kolejowej sieci transportowej Kolei Śląskich. Celem przeprowadzonej analizy oraz artykułu jest określenie jakości sieci transportowej Kolei Śląskiej pod kątem jej odporności na ewentualne zakłócenia oraz możliwości wprowadzenia usprawnień, które zapewnią lub umożliwią podniesienie poziomu obsługi klienta. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano metody znane z tzw. teorii grafów.

2. Metody analizy sieci

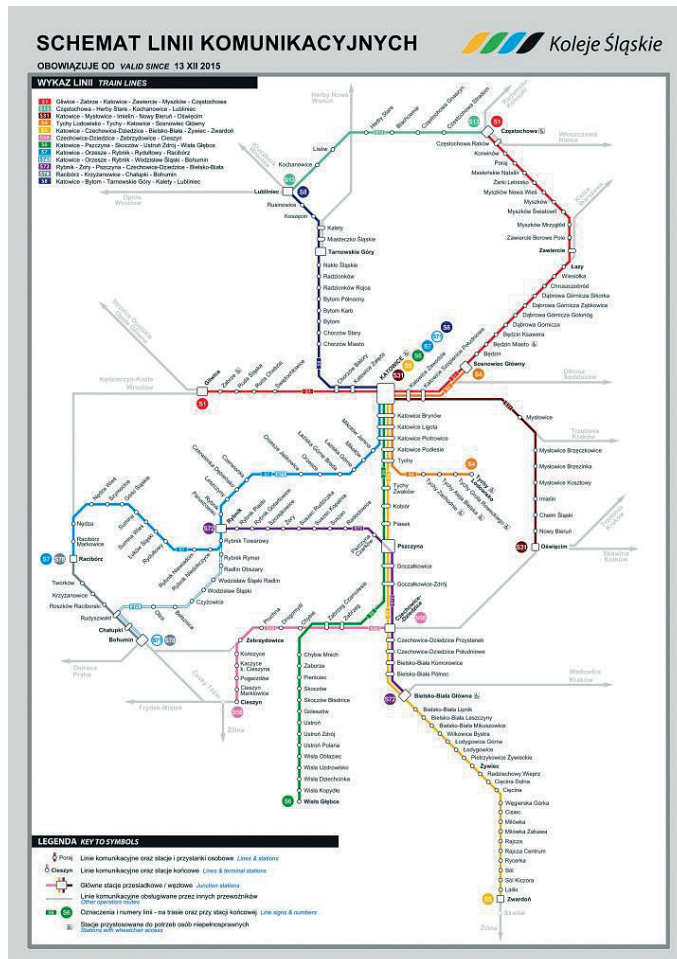
Zgodnie z informacjami podanymi w [Dunn, Wilkinson 2017; Tarapata 2015; Amaral i in. 2000; Arenas i in. 2003; Newman i in. 2002; Bullmore, Sporns 2009; Sporns 2002; Stam, Reijneveld 2007; Valverde, Solé 2003; Rual i in. 2005; Newman 2010; Wilkinson i in. 2012; Li i in. 2014; Ouyang i in. 2015] sieci (społeczne, transportowe itp.) mogą być analizowane z wykorzystaniem kilku mierników, które pozwalają określić ich cechy charakterystyczne oraz „jakość” całej sieci. Większość ze stosowanych mierników oraz obliczeń pozwala uzyskać informację, który z punktów sieci pełni funkcję „lidera” lub jest swoistym centrum analizowanej sieci.

Praktycznie nie występują w sieciach sytuacje, aby wszystkie węzły miały ten sam stopień „ważności”. W każdej sieci występują węzły kluczowe, które bardziej niż inne są odpowiedzialne za prawidłowe funkcjonowanie całej sieci. Określenie tych węzłów oraz ich lokalizacji umożliwia wyciągnięcie wniosków na temat aktualnego stanu sieci i możliwości jej usprawnienia.

3. Sieć kolejowa w województwie śląskim

Realizacja transportu lokalnego z wykorzystaniem sieci kolejowej w województwie śląskim została powierzona w 2010 roku przez władze województwa spółce Koleje Śląskie Sp. z o.o. Spółka swoją działalność transportową rozpoczęła w 2011 roku, a pod koniec 2012 roku przejęła od przedsiębiorstwa Przewozy Regionalne obsługę niemal wszystkich regionalnych połączeń kolejowych w województwie śląskim. Od tego czasu większość przewozów pasażerskich z wykorzystaniem transportu kolejowego realizowana jest przez tego przewoźnika. Co istotne, świadczy on swoje usługi nie tylko w centrum województwa, ale umożliwia przemieszczanie pasażerów praktycznie w obrębie całego województwa. Spółka Koleje Śląskie podzieliła swoją sieć transportową na 12 linii kolejowych. Schemat linii kolejowych Kolei Śląskich przedstawiono na rys. 1.

Jak wspomniano wyżej, sieć Kolei Śląskich rozciągnięta jest na obszarze całego województwa śląskiego, rozpoczyna się ona na północy województwa (Częstochowa) i kończy na południu województwa (Wisła, Cieszyn, Zwardoń). Co istotne, południowy kraniec województwa to również granica Polski, więc sieć swoim zasięgiem obejmuje w jakimś stopniu nie tylko ruch lokalny wojewódzki, ale też umożliwia ruch międzynarodowy (szczególnie w strefie przygranicznej).

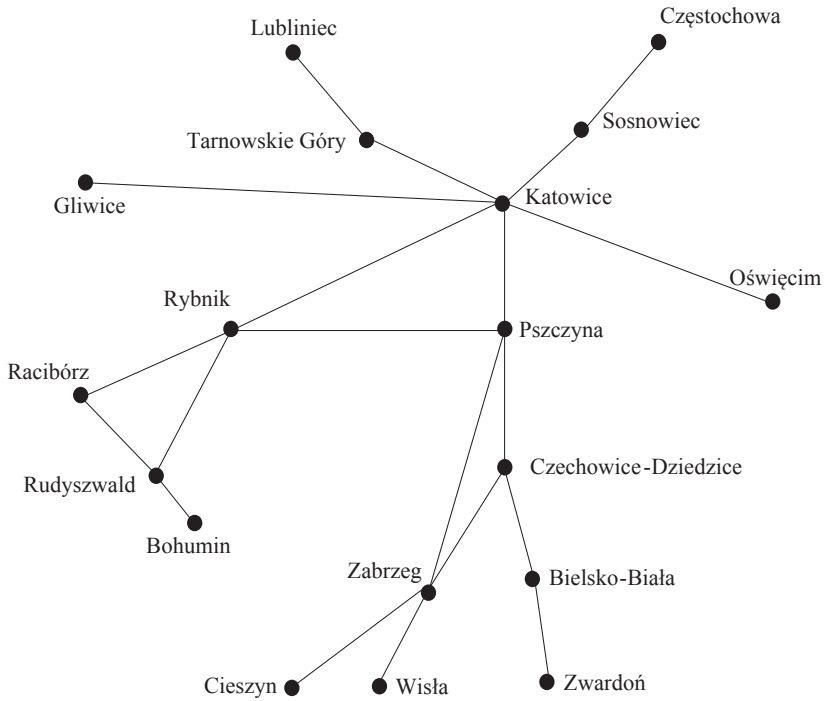


Rys. 1. Schemat linii kolejowej Kolei Śląskich

Źródło: strona internetowa Spółki Kolei Śląskie Sp. z o.o.

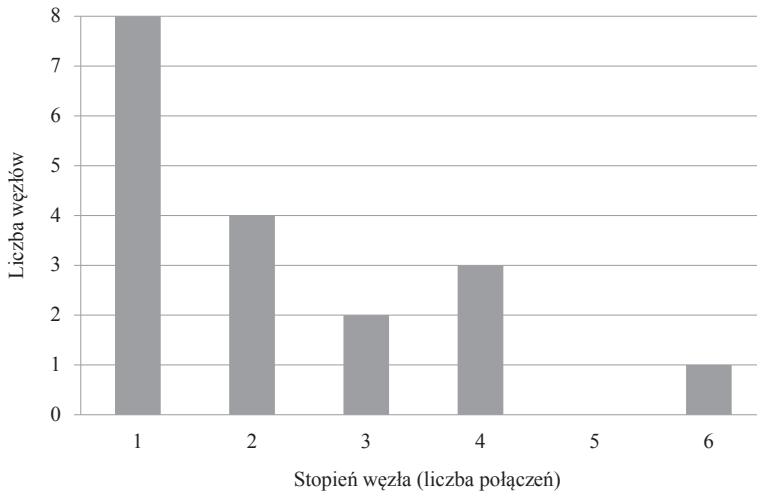
Na podstawie schematu linii Kolei Śląskich opracowano schemat węzłowy tej sieci i przedstawiono go na rys. 2.

Na schemacie przedstawionym na rys. 2 umieszczono stacje końcowe oraz stacje, które przez przewoźnika są traktowane jako główne stacje przesiadkowe i węzłowe. Oprócz tych stacji (węzłów) na schemacie i w analizie uwzględniono również dwie stacje, które przez przewoźnika nie są traktowane jako węzłowe. Są to stacje Zabrzeg i Rudyszwałd. Stacje te obecnie w sieci przewoźnika nie pełnią roli stacji przesiadkowych, ale rzeczywisty układ sieci umożliwi im pełnienie takiej funkcji w analizowanej sieci, więc zostały one również uwzględnione w przeprowadzonych pomiarach i analizach.



Rys. 2. Schemat węzłowy sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne na podstawie rys. 1.



Rys. 3. Rozkład stopnia węzłów (połączeń) w sieci

Źródło: opracowanie własne na podstawie rys. 2.

Zbudowany schemat węzłowy składa się z 18 stacji (węzłów) i kształtem przypomina sieć typu Wolnej Skali (*Scale Free*). W sieci zarysowana jest wyraźnie jedna stacja pełniąca rolę centralną. Jest to stacja Katowice, która umożliwia połączenie północnej części sieci z południową, posiada ona także największą liczbę połączeń węzłowych – $k = 6$).

Na rys. 3 przedstawiono rozkład stopnia węzłów (połączeń) w analizowanej sieci.

Jak przedstawiono na rys. 3, w analizowanej sieci największa liczba węzłów to węzły końcowe, które posiadają jedno połączenie z innymi węzłami.

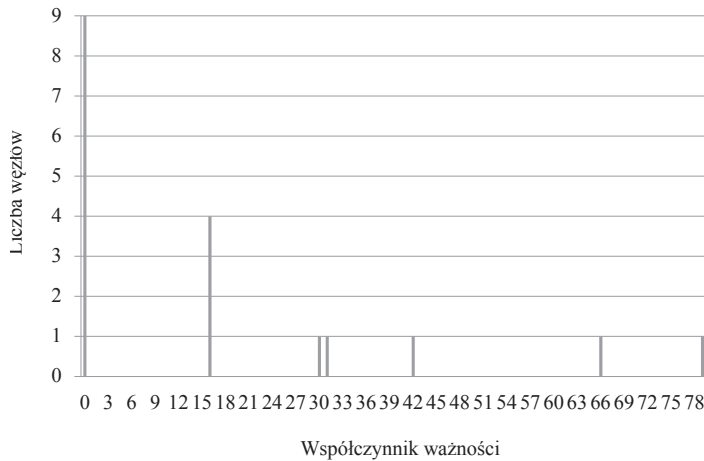
Następnie dla analizowanej sieci obliczono wskaźniki opisane m.in. w [Sobczak 2017; Tarapata 2015] celem określenia parametrów poszczególnych węzłów. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wskaźniki poszczególnych węzłów sieci

Miasto	Stopień węzła k_i	Stopień normalizacji d_i	Mimosrodowość e_i	Promień zasięgu r_i	Wsp. bliskości c_i	Wsp. ważności b_i	Wsp. klasteryzacji g_i	Wsp. bliskości harmonicznej h_i	Wsp. centralności własnej v_i
Bielsko	2	0,117647	5	0,2	0,298246	16	0	0,378431373	0,209919369
Bohumin	1	0,058824	6	0,166667	0,257576	0	0	0,31372549	0,146624386
Cieszyn	1	0,058824	5	0,2	0,288136	0	0	0,344117647	0,193682509
Czechowice-Dziedzice	3	0,176471	4	0,25	0,395349	30	0,333333	0,485294118	0,565515042
Częstochowa	1	0,058824	6	0,166667	0,265625	0	0	0,316666667	0,114319058
Gliwice	1	0,058824	5	0,2	0,34	0	0	0,394117647	0,312651675
Katowice	6	0,352941	4	0,25	0,5	79	0,066667	0,62254902	1
Lubliniec	1	0,058824	6	0,166667	0,265625	0	0	0,316666667	0,114319058
Oświęcim	1	0,058824	5	0,2	0,34	0	0	0,394117647	0,312651675
Pszczyna	4	0,235294	3	0,333333	0,5	66	0,333333	0,578431373	0,962698121
Racibórz	2	0,117647	5	0,2	0,333333	0	1	0,408823529	0,422896835
Rudyszwałd	4	0,176471	5	0,2	0,34	16	0,333333	0,553921569	0,459453188
Rybnik	3	0,235294	4	0,25	0,459459	42	0,333333	0,438235294	0,890979245
Sosnowiec	2	0,117647	5	0,2	0,354167	16	0	0,433333333	0,353242101
Tarnowskie Góry	2	0,117647	5	0,2	0,354167	16	0	0,433333333	0,353242101
Wiśla	1	0,058824	5	0,2	0,288136	0	0	0,344117647	0,193682509
Zabrzeg	4	0,235294	4	0,25	0,395349	31	0,166667	0,504901961	0,607178016
Zwardoń	1	0,058824	6	0,166667	0,232877	0	0	0,28627451	0,073178988

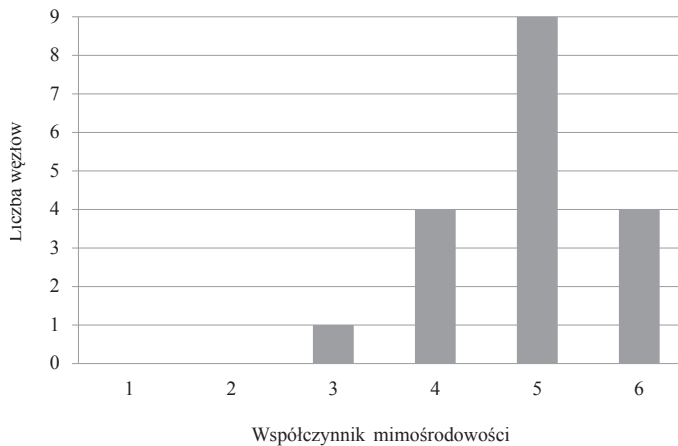
Źródło: opracowanie własne na podstawie rys. 2, z wykorzystaniem [Program...].

Na rys. 4 przedstawiono rozkład stopnia ważności, a na rys. 5 rozkład współczynnika mimośrodowości dla analizowanej sieci.



Rys. 4. Rozkład współczynnika ważności dla sieci Kolei Śląskich

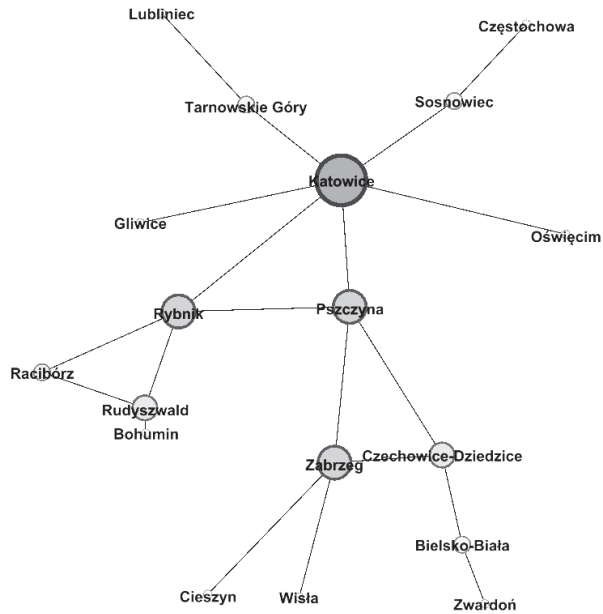
Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 1.



Rys. 5. Rozkład współczynnika mimośrodowości dla sieci Kolei Śląskich

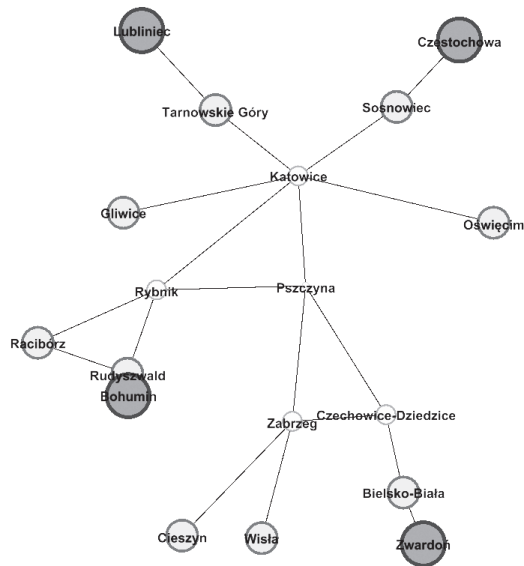
Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 1.

Na rys. 6–11 na podstawie danych z tabeli 1 przedstawiono graficznie rozkład przykładowych, obliczonych współczynników sieci – im większa średnica okręgu oraz ciemniejszy kolor, tym wartość współczynnika dla danego węzła jest większa. Wizualizację danych przeprowadzono z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego [Program...].



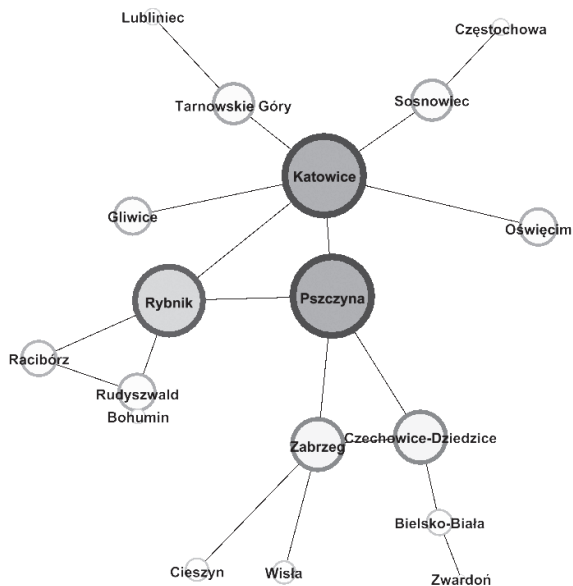
Rys. 6. Wizualizacja stopnia normalizacji d_c węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.



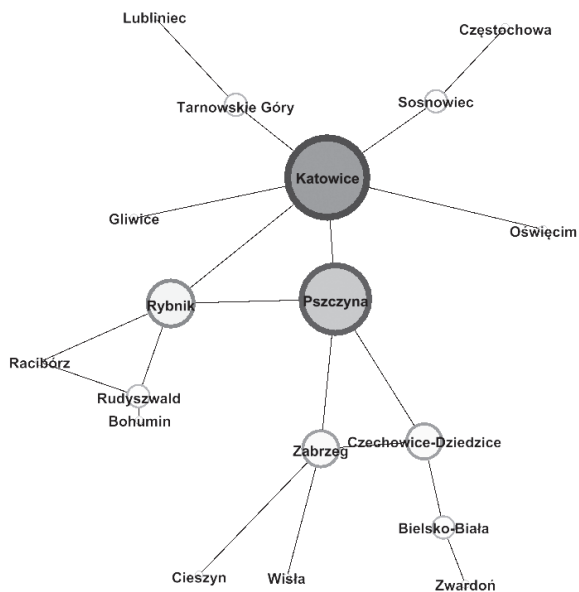
Rys. 7. Wizualizacja mimośrodkowości e_c węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.



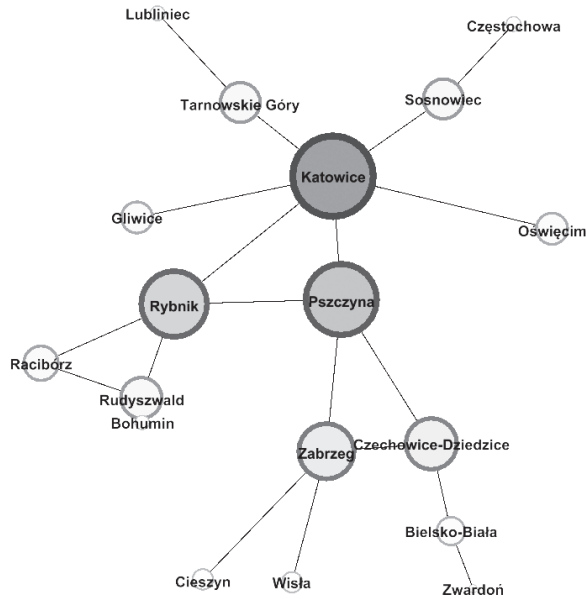
Rys. 8. Wizualizacja współczynnika bliskości cc_i węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.



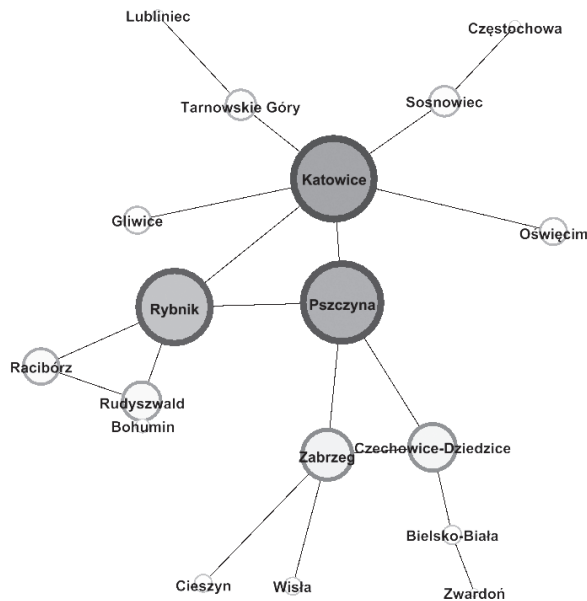
Rys. 9. Wizualizacja współczynnika ważności bc_i węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.



Rys. 10. Wizualizacja współczynnika bliskości harmonicznej hc_i węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.



Rys. 11. Wizualizacja współczynnika centralności własnej vc_i węzłów sieci Kolei Śląskich

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Gephi.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz danych zawartych w tabeli 1 i wizualizacjach przedstawionych na rysunkach powyżej widać wyraźnie, że analizowana sieć Kolei Śląskich posiada dwa główne punkty centralne i jeden pomocniczy. Stopień normalizacji jest największy dla Katowic, natomiast promień zasięgu (oddziaływania) jest największy dla Pszczyny. Te dwa parametry wyraźnie pokazują, że wymienione dwie miejscowości pełnią kluczową rolę w analizowanej sieci. Jest to również widoczne dla kolejnego wskaźnika, współczynnik bliskości dla obydwu miejscowości jest najwyższy ze wszystkich analizowanych węzłów (miast) i wynosi 0,5. Współczynnik ważności także przyjmuje największą wartość dla tych miast i wynosi odpowiednio 79 (Katowice) i 66 (Pszczyna). Kolejnym równie istotnym miastem jest Rybnik. Współczynnik centralności własnej dla tych miast wynosi odpowiednio: 1 dla Katowic, 0,96 dla Pszczyny i 0,89 dla Rybnika. Wymienione trzy węzły sieci stanowią jej główny element i utrzymanie ich w sprawności technicznej powinno stanowić jeden z priorytetowych elementów działań realizowanych przez spółkę (np. poprzez ścisłą współpracę w tym zakresie z zarządcą infrastruktury).

Powyższe wskaźniki informują o wzajemnych zależnościach pomiędzy węzłami (stacjami) analizowanej sieci. Kolejnym bardzo istotnym elementem w ocenie sieci jest określenie jej jakości jako całej sieci. Obliczone całościowe parametry sieci przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry sieci

Średnia długość najkrótszej ścieżki L	Współczynnik klasteryzacji C	Średnica sieci D	Promień zasięgu sieci R	Średni stopień węzłów sieci \bar{k}
3.039216	0,142593	6	3	2,222222

Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 1.

Zgodnie z informacjami podanymi w tabeli 2, sieć Kolei Śląskich jako całość nie uzyskała zbyt poprawnych wartości współczynników, co świadczy, że nie jest ona zbyt dobrze opracowana. Przykładowo, wartość współczynnika klasteryzacji jest bardzo mała dla analizowanej sieci.

4. Podsumowanie

Analizowana sieć transportowa stanowi istotny element sieci transportowej województwa śląskiego. Jej układ ma bardzo istotne znaczenie dla funkcjonowania całego systemu transportowego województwa, w związku z powyższym powinna ona być odporna na ewentualne zakłócenia w funkcjonowaniu (np. nieprzewidziane awarie, lokalne klęski żywiołowe) czy też zamierzone negatywne działania (np. ataki terrorystyczne). Układ sieci, jak wspomniano wyżej, przypomina sieć typu Wolnej Skali. Sieci takie charakteryzują się dobrą odpornością na zdarzenia losowe.

we, ale nie są odporne na zaplanowane ataki [Tarapata 2015]. Jest to dosyć istotna pozytywna informacja w odniesieniu do analizowanej sieci, jednak jak weźmie się pod uwagę wyniki obliczeń przedstawione w tabeli 2, to okazuje się, że sieć swoimi parametrami jest również bardzo zbliżona do sieci typu Mały Świat (*Small World*). Istotnym zagrożeniem dla powstałej sieci jest fakt, że ewentualne zakłócenie na węzle Katowice może skutkować całkowitym sparaliżowaniem sieci (szczególnie na jej głównych obszarach). W związku z powyższym przewoźnik powinien prowadzić stałe i bieżące rozmowy z zarządcą infrastruktury kolejowej (PKP PLK S.A.), celem posiadania aktualnych informacji o stanie infrastruktury w węzle Katowice, planowanych pracach remontowych, awariach itp.

Analiza uzyskanych parametrów poszczególnych węzłów wyraźnie wykazała, że oprócz węzła Katowice, kluczową rolę w sieci pełni również węzeł Pszczyzna oraz Rybnik. Co istotne, z obserwacji autora (m.in. jako osoby korzystającej na co dzień z infrastruktury przewoźnika oraz obserwującej jako mieszkaniec analizowanego obszaru podejmowane działania i ich efekty) wynika, że przewoźnik do tych stacji (szczególnie do stacji Rybnik) niestety nie przykłada zbyt dużej uwagi, co może przynieść bardzo negatywne skutki w razie wystąpienia tam jakichś nieprzewidzianych zdarzeń (skutki będą szczególnie dotkliwe dla południowej lub południowo-zachodniej części sieci). Autor, oprócz zwrócenia większej uwagi na te dwa węzły sieci, sugerowałby rozważenie możliwości – w razie awaryjnej sytuacji – poprowadzenia alternatywnych połączeń pomiędzy Oświęcimiem a Czechowicami-Dziedzicami oraz pomiędzy Bohuminem a Cieszynem lub Zebrzydowicami (nieujęte w analizowanym schemacie) i Raciborzem a Gliwicami (połączenia na tych relacjach oferowane są przez innych przewoźników). Wprowadzenie takich połączeń umożliwiłoby kontynuowanie obsługi południowej części sieci w razie wystąpienia zakłóceń na węzle Pszczyzna lub Rybnik.

Powyższe sugestie mogą również znacznie przyczynić się do zwiększenia prawdopodobieństwa zapewnienia wymaganego poziomu obsługi klienta w razie wystąpienia sytuacji nadzwyczajnej, czy też podniesienia tego poziomu, a jak wspomniano we wstępie, odpowiedni poziom obsługi klienta stanowi jeden z kluczowych elementów zarządzania strategicznego przedsiębiorstwem.

Literatura

- Amaral L.A.N., Scala A., Barthelemy M., Stanley H.E., 2000, *Classes of small-world net-works*, Proc Natl Acad Sci USA, vol. 97(21), s. 11149–11152.
- Arenas A., Danon L., Diaz-Guilera A., Gleiser P.M., Guimera R., 2003, *Community analysis in social networks*, Eur Phys JB, vol. 38(2), s. 373–380.
- Barczak B., Cabała P., 2014, *Identyfikacja i pomiar pozycji podmiotów w sieciach organizacyjnych*, Kwartalnik Naukowy Organizacja i Zarządzanie, nr 3(27), Gliwice.
- Bullmore E., Sporns O., 2009, *Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems*, Nat Rev Neuro Sci, vol. 10(3), s. 186–198.
- Dane statystyczne Eurostat (14.07.2016).

- Dunn S., Wilkinson S., 2017, *Hazard tolerance of spatially distributed complex networks*, Reliability Engineering and System Safety, no. 157, s. 1–12, Elsevier.
- Eusgeld I., Kroger W., Sansavini G., Schlapfer M., Zio E., 2009, *The role of network theory and object-orientated modeling within a frame work for the vulnerability analysis of critical infrastructures*, Reliability Engineering and System Safety, vol. 92(5), s. 954–963.
- Infrastructure engineering and climate change adaptation – ensuring services in an uncertain future*, Royal Academy of Engineering, London 2011.
- La Rovere S., Vestrucci P., 2012, *Investigation of the structure of a networked system*, Reliability Engineering and System Safety, no. 107, s. 214–223.
- Li H., Guo X.M., Xu Z., Hu X.B., 2014, *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.
- Newman M.E.J., 2010, *Networks: An Introduction*, Oxford University Press Inc., New York.
- Newman M.E.J., Watts D.J., Strogatz S.H., 2002, *Random graph models of social networks*, Proc Natl Acad Sci USA, no. 99, s. 2566–2572.
- Ouyang M., Pan Z., Hong L., He Y., 2015, *Vulnerability analysis of complementary transportation systems with applications to railway and airline systems in China*, Reliab Eng Syst Saf, no. 142, s. 248.
- Program do wizualizacji danych Gephi (Freeware).
- 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., Llamas 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., 2005, *Towards a proteome-scale map of the human protein – protein interaction network*, Nature, vol. 437 (7062).
- Sobczak P., 2017, *Analiza strukturalna sieci transportowej Kolei Mazowieckich*, Kwartalnik Naukowy Organizacja i Zarządzanie, Gliwice (w druku).
- Sporns O., 2002, *Network analysis, complexity, and brain function*, Complexity, vol. 8(1), s. 56–60.
- Stam C.J., Reijneveld J.C., 2007, *Graph theoretical analysis of complex networks in the brain*, Nonlinear Biomed Phys, vol. 1(3), s. 1–19.
- Strona internetowa Spółki Koleje Śląskie Sp. z o.o. (11.07.2016).
- Tarapata Z., 2015, *Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study*, The Archives of Transport, vol. 36, issue 4, Warszawa.
- Valverde S., Solé R.V., 2003, *Hierarchical small worlds in software architecture*, Arxiv Prepr Cond-Mat/0307278.
- Wilkinson S., Dunn S., Ma S., 2012, *The vulnerability of the European air traffic network to spatial hazards*, Nat Hazards, vol. 60(3), s. 1027–1036.
- Witkowski J., 1995, *Strategia logistyczna przedsiębiorstw przemysłowych*, Wyd. AE, Wrocław.