

# Spójność sieci transportowych województwa łódzkiego w świetle analiz grafowych<sup>1</sup>

**SZYMON WIŚNIEWSKI**

dr, Katedra Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, 90-142 Łódź, ul. Kopcińskiego 31, Tel. 42 635 45 54, e-mail: szymon.wisniewski@geo.uni.lodz.pl

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia analizę spójności sieci drogowej, kolejowej oraz tramwajowej w województwie łódzkim. Daje odpowiedź, jak kształtują się lokalne i regionalne relacje transportowe pomiędzy miastami zlokalizowanymi na obszarze pełniącym rolę węzła o znaczeniu międzynarodowym, szczególnie w czasie, kiedy docelowa sieć dróg i linii kolejowych o znaczeniu międzynarodowym jest zrealizowana jedynie fragmentarycznie. Na tle krajowego i europejskiego systemu powiązań transportowych określono miary spójności w ujęciu wzajemnych relacji pomiędzy miastami-węzłami regionu. Do badania wykorzystano podejście grafowe, przyjmując, że wierzchołkami grafów są miasta województwa, a krawędziami łączące poszczególne miasta liniowe elementy sieci drogowej, kolejowej i tramwajowej. Bazując na danych udostępnionych przez Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad, Zarząd Dróg Wojewódzkich w Łodzi, PKP Polskie Linie Kolejowe SA oraz Zarząd Dróg i Transportu w Łodzi, przedstawiono system transportowy województwa łódzkiego, a następnie, dzięki odpowiedniej generalizacji, zbudowano na jego podstawie graf sieci geograficznych pozwalający na badanie spójności sieci. Wskazano ponadto możliwości podniesienia koherentności funkcjonujących struktur w nawiązaniu do polityk inwestycyjnych prowadzonych przez zarządców infrastruktury.

**Słowa kluczowe:** sieć transportowa, sieć TEN-T, graf, województwo łódzkie

## Wprowadzenie

W ujęciu fizycznym sieć transportową rozpatrywaną w dowolnym zakresie przestrzennym postrzegać można jako zbiór węzłów, które pozwalają na rozprzestrzenianie się strumieni ruchu. Dla bardziej efektywnego przemieszania się środków transportu węzły wyposażone są w różnorodne urządzenia techniczne takie jak: tunele, wiadukty, mosty, systemy sygnalizacji, stacje, urządzenia rozładunkowe, skrzyżowania wielopoziomowe, a przede wszystkim różnej klasy drogi, linie kolejowe czy tramwajowe. Tak ujmowana sieć transportowa może być przedstawiona jako graf<sup>2</sup> fizyczny, pełniący jednocześnie funkcję schematu technicznego sieci. W wyniku generalizacji do postaci, w której jako węzły występują wyłącznie stacje pasażerskie i towarowe, a jako krawędzie występują drogi lub linie kolejowe, tramwajowe je łączące, połączonej z umieszczeniem tak skonstruowanego grafu na mapie, powstaje graf geograficzny. Umożliwia on wykonywanie dalszych analiz skupiających się m.in. na wyborze położenia geograficznego

fizycznych węzłów sieci, wskazaniu położenia geograficznego łączących je dróg czy też maksymalnego obciążenia ruchem poszczególnych jej odcinków. Ponadto pozwala na charakterystykę sieci pod względem klasy dróg biegnących pomiędzy poszczególnymi miastami-węzłami, ich przepustowość czy średnie czasy przejazdów [1].

Ze względu na wysoką użyteczność poznawczą i metodologiczną analizy grafowe zostały wykorzystane w szeregu dyscyplin naukowych, m.in. geografii, na potrzeby analizy różnorodnych struktur. Na polu geografii metody grafowe znalazły również szerokie zastosowanie w analizach sieci transportowych (oraz powiązań w zakresie innych elementów infrastruktury technicznej i społecznej), powiązań ludnościowych, powiązań gospodarczych, czy też w charakterystyce struktury funkcjonalnej obszaru<sup>3</sup>. Na każdej z wymienionych płaszczyzn uwidacznia się najważniejsza zaleta analiz grafowych, a więc możliwość zgeneralizowania określonej struktury zjawiska do możliwie prostej postaci. Wyróżnione są jedynie najważniejsze elementy danej struktury, czyli węzły oraz powiązania między nimi. Taki sposób przedstawienia rzeczywistości, który eliminuje zbędne z punktu celu badania elementy, jest szczególnie użyteczny w niniejszym badaniu, pozwalając na równoczesną analizę poprzez zastosowanie różnorodnych miar spójności [1]

Badaniem zostały objęte sieci drogowa, kolejowa i tramwajowa województwa łódzkiego. Do analizy zostały włączone wszystkie 44 miasta województwa w ujęciu ich wzajemnych relacji transportowych, co ograniczyło zakres przestrzenny opracowania do jego granicy administracyjnej. Krawędzie poddanych analizie grafów zostały określone zgodnie z przebiegiem poszczególnych odcinków dróg i linii kolejowych zgodnie ze stanem na sierpień 2013 roku.

## Sieci transportowe województwa łódzkiego

Pomimo z góry przyjętego założenia, iż spójność sieci transportowych badania będzie w granicach województwa, konieczne jest zasygnalizowanie powiązań infrastrukturalnych w ujęciu krajowym i międzynarodowym. Pozwoli to uniknąć wrażenia, że sieci transportowe województwa łódzkiego funkcjonują w oderwaniu od szerszych struktur, a ponadto podkreśli rolę województwa jako obszaru węzłowego zarówno w polskim, jak i europejskim systemie powiązań transportowych. Położenie województwa łódzkiego

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2014.

<sup>2</sup> Graf – uporządkowana para  $(x, \Gamma)$  gdzie  $x$  jest nie pustym zbiorem a  $\Gamma$  jest odwzorowaniem  $x$  w  $X$ . Parą uporządkowaną  $\langle x, \Gamma \rangle$  utworzoną z elementów  $x, \Gamma$ , nazywamy taką parę, w której istotna jest kolejność elementów. Pierwszy z elementów pary  $x$  nazywa się poprzednikiem a  $\Gamma$  następnikiem. Odwzorowaniem nazywamy zasadę określającą przyporządkowanie między elementami zbiorów.

<sup>3</sup> Poza analizą struktur sieci transportowych, metody grafowe były szeroko stosowane również przy badaniach zmian morfologii siedlisk, w regionalizacji i hierarchizacji ośrodków czy przy analizach przepływów w sieciach [2].

w środku kraju (geograficzny środek Polski znajduje się 23 kilometry na północny wschód od Łodzi) jest niezwykle korzystnym uwarunkowaniem dla poziomu dostępności transportowej obszaru. Większość najważniejszych ośrodków miejskich w Polsce, w tym 9 miast wojewódzkich, znajduje się w ekwidystancji 200 kilometrów (odległość fizyczna) od stolicy województwa łódzkiego.

Charakteryzując położenie województwa łódzkiego w międzynarodowej sieci transportowej, należy podkreślić, że z wyznaczonych (na II Paneuropejskiej Konferencji Transportowej na Krecie w marcu 1994, a uzupełnionych na III Paneuropejskiej Konferencji Transportowej w Helsinkach trzy lata później) dziesięciu transeuropejskich korytarzy transportowych cztery przechodzą przez obszar Polski, a dwa z nich przebiegają przez obszar województwa. Pierwszy to korytarz nr II o przebiegu równoleżnikowym łączący Berlin, Warszawę, Mińsk i Moskwę. Korytarz obejmuje autostradę A2 oraz magistralę kolejową E20. Drugi z korytarzy (nr VI) biegnie z północy na południe, rozpoczynając się w Gdańsku, a następnie prowadzi przez Łódź/Warszawę do Żyliny (w wersji zachodniej przez Ostrawę do Brna). W granicach województwa łódzkiego korytarz tworzy autostrada A1 wraz z drogą ekspresową S8 (Piotrków Trybunalski–Warszawa), a w zakresie infrastruktury kolejowej – magistrala węglowa Śląsk–Porty oraz Centralna Magistrala Kolejowa. Priorytetowe inwestycje w zakresie infrastruktury (objętej wyżej wymienionymi korytarzami) są skierowane głównie na linie kolejowe na terenie województwa łódzkiego.

Kompetencje związane z kreowaniem polityki w zakresie transportu<sup>4</sup> i sieci transeuropejskich Unia Europejska współdzieli z państwami członkowskimi (art. 4 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej). Wynika to z konieczności zapewnienia swobodnego przepływu towarów, osób, usług i kapitału w ramach pozbawionego wewnątrznych granic rynku Unii Europejskiej (art. 3, pkt 2 Traktatu o Unii Europejskiej, art. 26, pkt 1–2 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej) oraz dążenia do spójności gospodarczej, społecznej i terytorialnej, a ponadto harmonijnego rozwoju całego obszaru Unii Europejskiej (art. 3, pkt 3 Traktatu o Unii Europejskiej, art. 174 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej). W decyzji Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 7 lipca 2010 r. (661/2010/UE) zdefiniowany został plan modernizacji i integracji infrastruktury sieci transportu lądowego, morskiego i lotniczego, wskazujący wytyczne dla projektów rozwoju TEN-T. Tworzone sieci muszą spełniać szereg założeń, m.in.: przyczyniać się do wzmocnienia spójności gospodarczej i społecznej, oferować użytkownikom wysokiej jakości infrastrukturę transportową oraz przyczyniać się do wzmocnie-

nia spójności terytorialnej, łącząc główne regiony i największe ośrodki miejskie Unii Europejskiej (art. 2, pkt 2 661/2010/UE).

6 lutego 2012 roku Komisja Europejska sporządziła ostateczną wersję projektu nowego rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej (COM/2011/650), które miało zastąpić rozporządzenie z dnia 7 lipca 2010 r. (661/2010/UE). Celem nowych wytycznych było ustanowienie kompletnej (obejmującej wszystkie państwa członkowskie oraz ich regiony) i zintegrowanej sieci transportowej. W projekcie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady, wskazany został podział sieci TEN-T na sieć kompleksową i bazową. Sieć kompleksowa zawiera wszystkie istniejące, modernizowane i planowane elementy sieci TEN-T. Sieć bazowa natomiast składać się będzie z tych elementów sieci kompleksowej, które mają znaczenie strategiczne dla realizacji celów funkcjonowania TEN-T.

W województwie łódzkim do sieci bazowej TEN-T zaliczono autostrady A1 i A2 oraz drogę ekspresową S8 w tzw. wariantcie łódzkim, na odcinku od granicy województwa do Rzgowa. Do sieci bazowej zaliczono również linie kolejowe transportu towarowego: linię 1 (wyłącznie na odcinku Warszawa – Skierniewice – Koluszki), linię 4 (Warszawa – Mszczonów – Opoczno – Zawiercie), linię 14 (wyłącznie na odcinku Koluszki – Łódź – Zduńska Wola Karsznice) oraz linię 131 (Tczew – Bydgoszcz – Inowrocław – Zduńska Wola (Karsznice) – Tarnowskie Góry). Z linii kolejowych transportu pasażerskiego w bazowej sieci TEN-T znalazły się: projektowana linia kolei dużych prędkości „Y” (Warszawa – Mszczonów – Łódź – Kalisz – Poznań, Wrocław), wspomniana wyżej linia 4 (Warszawa – Mszczonów – Opoczno – Zawiercie), linia 14 (wyłącznie na odcinku Łódź – Koluszki) oraz linia 25 (wyłącznie na odcinku Łódź – Opoczno).

W sieci kompleksowej TEN-T w województwie łódzkim uwzględniono dodatkowo odcinki dróg ekspresowych: S8 z Piotrkowa Trybunalskiego w kierunku Warszawy, S12 (wyłącznie na odcinku z Piotrkowa Trybunalskiego w kierunku Radomia) i S74. Linię kolejową 25 (Łódź – Opoczno – Skarżysko Kamienna – Tarnobrzeg – Mielec – Dębica) zakwalifikowano do sieci kompleksowej TEN-T kolejowego transportu towarowego [3].

Siedemnaście spośród wszystkich 44 miast województwa łódzkiego jest zlokalizowanych w sieci dróg międzynarodowych. Połączenia multimodalne (sieć drogową i kolejową) na poziomie międzynarodowym ma jedynie Kutno i Łowicz. Region łódzki ma specyficzną sytuację w układzie krajowych linii kolejowych. Historyczne uwarunkowania rozwoju sieci kolejowej spowodowały, że najważniejsze linie o znaczeniu krajowym i międzynarodowym biegną w peryferyjnych obszarach województwa, omijając stolicę regionu [4]. Dotyczy to linii transeuropejskich: E-20 Warszawa – Kutno – Poznań oraz Centralnej Magistrali Kolejowej, która przebiega tranzytem przez województwo, łącząc Warszawę ze Śląskiem i Zagłębiem oraz Krakowem. Żadne z miast województwa nie leży na jej przebiegu – najbliższej

<sup>4</sup> Wspólna polityka transportowa krajów członkowskich Unii Europejskiej koncentruje się na ustaleniu reguł transportu międzynarodowego w krajach członkowskich, warunków tranzytu przez terytoria państw członkowskich oraz reguł dostępu przewoźników zagranicznych do transportu krajowego każdego z krajów członkowskich (art. 91, pkt 1 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej). Unia Europejska rezerwuje sobie również prawo do wspierania działań mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa transportu.

położonym ośrodkiem jest Opoczno. Zbliżony charakter ma magistrala węglowa Herby Nowe – Zduńska Wola (Karsznice) – Inowrocław – Gdynia ze stacją towarowo-rozrządową w Karsznicach (Zduńska Wola). Linie te nie mają znaczenia dla połączeń województwa w relacjach wewnątrzregionalnych ani międzyregionalnych, czy międzynarodowych. Dla krajowych powiązań województwa łódzkiego duże znaczenie ma stara linia kolei „Warszawsko-Wiedeńskiej” i kolej „Kaliska” oraz biegnąca z Łodzi linia kolejowa do Gdańska i Gdyni [5]. Współczynnik wydłużenia linii kolejowych w stosunku do powiązań prostoliniowych z Łodzi do innych miast wojewódzkich wynosi na ogół ponad 125. Łódź jest ważnym węzłem kolejowym na kierunku Warszawa–Wrocław i Poznań–Lublin. Następnym kolejowym węzłem są Kozłowski, poprzez które Łódź połączona jest z Warszawą, Lublinem, Katowicami i Krakowem. Mniejszymi węzłami kolejowymi są: Skierniewice, Łowicz oraz Tomaszów Mazowiecki [6].

Aktualnie funkcjonująca sieć linii kolejowych zapewnia jedynie podstawową obsługę regionu. Brakuje natomiast obsługi województwa, a właściwie Łodzi i jej aglomeracji, poprzez trasy przystosowane do kursowania pociągów o podwyższonej prędkości. Są to jedynie krótkie odcinki, takie jak Kozłowski – Skierniewice, Kozłowski – Piotrków Trybunalski, Kutno – północna granica województwa, które mogą prowadzić ruch pociągów z prędkością przekraczającą 120 km/h. Wobec restrukturyzacji prowadzonej przez zarządcę infrastruktury kolejowej sieć w województwie łódzkim pozostaje w zasadzie niezmienną i traktowana jest jako sieć linii magistralnych i pierwszorzędnych.

Województwo łódzkie, poprzez sieć dróg krajowych, ma połączenia z głównymi ośrodkami gospodarczymi i miejskimi Polski. Jest to droga nr 14 łącząca stolicę województwa z Wrocławiem, nr 72 prowadząca do Poznania i Warszawy, droga nr 74 łącząca z Kielcami oraz nr 12 z Kaliszem i Lublinem. Ukształtowany system powiązań drogowych powoduje, że stopień wydłużenia dróg jest stosunkowo wysoki, szczególnie do miast położonych w północno-zachodniej Polsce oraz do Krakowa i Kielc. Warto podkreślić, iż w sieci dróg krajowych znajdują się wszystkie miasta województwa łódzkiego z wyjątkiem Szadku, Żychlina, Kozłowski, Zelowa, Białej Rawskiej i Drzewicy. Najkorzystniejsze położenie wśród miast województwa łódzkiego w krajowej sieci drogowej mają: Łódź (skrzyżowanie dróg: nr 1, nr 14, nr 72, nr 91), Piotrków Trybunalski (nr 1, A1, nr 8, S8, nr 12, nr 91), Stryków (A1 i A2) oraz Sieradz (nr 12, nr 14, nr 83). Jako bardzo ważne skrzyżowania dróg krajowych wymienić należy Krośnice (drogi nr 91 oraz nr 92), poza tym Sulejów (drogi nr 12 oraz nr 74), Wieluń (nr 8, nr 43, nr 45), Kutno (nr 92, nr 60), Łowicz (nr 92, nr 14, nr 70a) oraz Radomsko (nr 1, nr 42, nr 91).

Uzupełnieniem regionalnego systemu transportowego jest sieć tramwajowa obejmująca jedynie pięć ośrodków: Łódź, Pabianice, Zgierz, Ozorków i Konstantynów Łódzki. Zgodnie z danymi udostępnionymi przez Zarządu Dróg i Transportu w Łodzi w 2013 roku łączna długość pojedynczych torów

tramwajowych w granicach rdzenia ŁOM wyniosła 208,7 kilometra. Pasuje to sieć w województwie łódzkim za siecią Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (332,2 kilometra) oraz Warszawy (243,5 kilometra). Linie tramwajowe biegnące poza Łódź mają długość: do Ozorkowa – 34 kilometry, do Lutomska – 24 kilometry i do Pabianic – 9 kilometrów. Na terenie Łodzi oraz fragmentarycznie w Zgierzu, Pabianicach i Ksawerowie linie tramwajowe mają dwa torowiska [7].

### Spójność sieci – wyniki badań

Podstawowym wymogiem analiz topologicznych jest prezentacja rzeczywistej sieci transportowej w formie abstrakcyjnego zbioru punktów (węzłów, wierzchołków<sup>5</sup>) połączonych zbiorem linii (odcinków, krawędzi<sup>6</sup>, łuków<sup>7</sup>). Podejście grafowe podkreśla układ połączeń pomiędzy węzłami, pomijając informacje na temat odległości metrycznych. Sieć transportową (drogową, kolejową i tramwajową) obszaru województwa łódzkiego przedstawiono w postaci skończonego<sup>8</sup> grafu płaskiego<sup>9</sup> nieskierowanego<sup>10</sup>.

Stopień, w jakim graf jest uproszczeniem rzeczywistych sieci transportowych, możliwy jest do zaobserwowania na rysunku 1 dla sieci drogowej i na rysunku 2 dla sieci kolejowej. Główna różnica polega na zastąpieniu rzeczywistego przebiegu połączeń liniami prostymi. Natomiast wzajemne położenie węzłów pozostaje bez zmian. Przy budowie grafu przyjęto pewne założenia wstępne. Krawędzie grafu odwzorowują jedynie drogi wojewódzkie i krajowe w województwie łódzkim. W przypadku dróg alternatywnych – substytucyjnych – pomiędzy miastami odrzucono te, które w rzeczywistości przekraczają 120% długości trasy najkrótszej lub są niższej kategorii. W przypadku kiedy krawędzie grafu krzyżowałyby się, wybrano drogę o wyższej kategorii (jeśli drogi są takich samych kategorii, krawędzie poprowadzono zgodnie z przebiegiem dróg, które są bliższe odległości fizycznej pomiędzy miastami), aby możliwe było utworzenie grafu płaskiego.

W przypadku grafu obrazującego sieć kolejową włączono pięć wierzchołków (miast) pozostających poza granicami województwa łódzkiego: Kalisz, Ostrów Wielkopolski, Ostrzeszów, Kępno oraz Częstochowę (rys. 2). Poszerzenie grafu o powyższe wierzchołki wynikało z konieczności włączenia do analizy Wieruszowa i Wielunia. Połączenie tych miast, zarówno od strony Częstochowy, jak i Ostrowa Mazowieckiego, wynika z analizy rzeczywistych regularnych połączeń pasażerskich do Wielunia i Wieruszowa z pozostałych miast województwa łódzkiego.

<sup>5</sup> Każdy element niepustego zbioru  $X$  nazywamy punktem lub wierzchołkiem grafu [8].

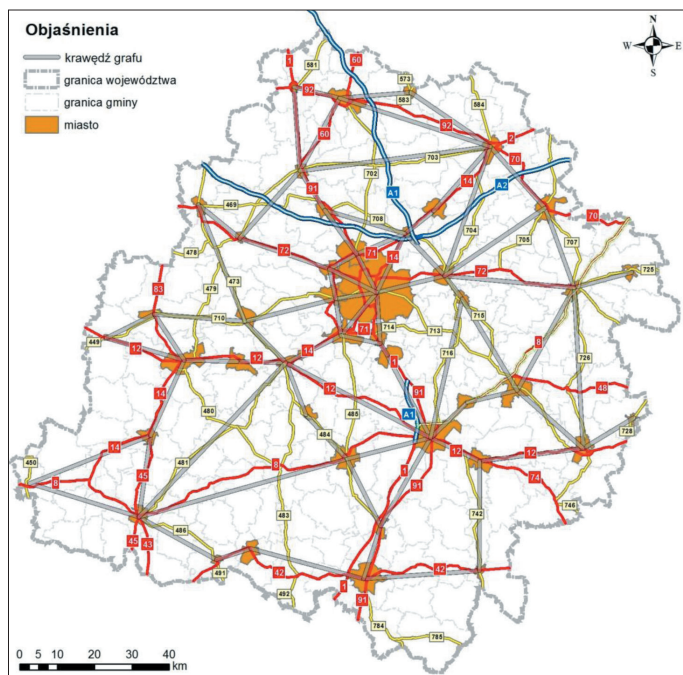
<sup>6</sup> Nieuporządkowaną parę wierzchołków  $\{x, y\}$  taką, że  $(x, y)$  należy do  $U$  albo  $(y, x)$  należy do  $U$ , nazywamy krawędzią. Zatem krawędź różni się od łuku tym, że w przypadku pierwszym skierowanie nie jest istotne, podczas gdy w ostatnim jest ono podane [9].

<sup>7</sup> Uporządkowaną parę elementów  $(x, y)$  taką, że  $y$  należy do  $\Gamma x$ , nazywamy łukiem. Zbiór wszystkich łuków grafu oznaczamy  $U$  [8].

<sup>8</sup> Zbiór wierzchołków – miast – jest skończony.

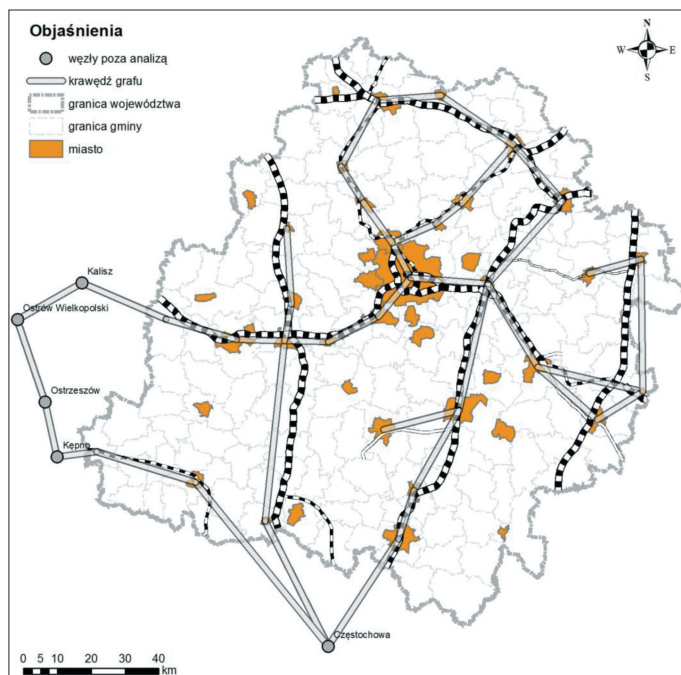
<sup>9</sup> Graf płaski to taki, którego łuki lub krawędzie nie mają punktów wspólnych prócz wierzchołków.

<sup>10</sup> Krawędzie nie wyrażają kierunku oddziaływania.



Rys. 1. Graf na tle sieci drogowej województwa łódzkiego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Graf na tle sieci kolejowej województwa łódzkiego

Źródło: opracowanie własne

Graf ilustrujący sieć tramwajową składa się z czterech krawędzi (łączyjących Pabianice z Łodzią, Konstantynów Łódzki z Łodzią, Zgierz z Łodzią oraz Ozorków ze Zgierzem) oraz pięciu wierzchołków.

W analizie grafowej szczególne znaczenie mają miary odnoszące się do spójności grafu oraz dostępności poszczególnych węzłów. Najpowszechniej stosowane wskaźniki obliczane są w oparciu o dwie podstawowe informacje. Pierwsze dotyczą danych o liczbie wierzchołków ( $v$ ), krawędzi ( $e$ ) oraz podgrafów<sup>11</sup> ( $p$ ). Są to wskaźniki charakteryzujące spójność sieci. Druga grupa bazuje na informacjach dotyczących długości<sup>12</sup> drogi<sup>13</sup> lub łańcucha<sup>14</sup> w grafie. Wskaźniki uzyskane na tej podstawie umożliwiają charakterystykę dostępności i ustalenie hierarchii węzłów w sieci.

Zakładając, że maksymalna możliwa liczba połączeń w grafie o  $v$  węzłach wynosi  $v(v-1)/2$ , Prihar [10] przedstawił miarę stopnia spójności ( $C_{st}$ ) w postaci:

$$C_{st} = v(v-1)/2e$$

Jest to stosunek maksymalnie możliwej liczby połączeń (krawędzi) w sieci o  $v$  wierzchołkach do obserwowanej liczby krawędzi. Stopień spójności waha się od jedności (spójność maksymalna) do  $v/2$  (spójność minimalna). W przypadku sieci drogowej stopień spójności wynosi 12,61 przy spójności minimalnej na poziomie 22. W wartościach względnych

sieć jest spójna w 44,7%<sup>15</sup>. Graf obrazujący sieć kolejową ma stopień spójności wynoszący 15,26 przy spójności minimalnej 17,5, co wskazuje na procent spójności na poziomie 13,6. W przypadku sieci tramwajowej spójność minimalna i stopień spójności są sobie równe i wynoszą 2,5, co skutkuje 0% stopniem spójności.

Często stosowaną miarą spójności jest również liczba cykloematyczna ( $\mu$ ), zwana pierwszą liczbą Bettiego, którą oblicza się następująco:

$$\mu = e - v + p$$

Wartości zero przyjmują grafy niespójne oraz tzw. drzewa, czyli najprostsze grafy, w których liczba krawędzi jest mniejsza niż liczba wierzchołków. Im wartość wyższa tym graf jest bardziej spójny<sup>16</sup>. Dla sieci drogowej liczba cykloematyczna wynosi 32. W przypadku sieci kolejowej jedynie 5. Graf ilustrujący sieć tramwajową jest drzewem, bowiem jego liczba cykloematyczna jest równa 0.

Pozostałe wskaźniki spójności (w większości stworzone przez K.J. Kansky'ego [11]) związane są jedynie z właściwościami grafów, a nie jak przedstawione wcześniej, które wywodziły się wprost z teorii grafów. Kansky wprowadził poprawioną postać liczby cykloematycznej w formie wskaźnika  $\alpha$ , który (dla grafów płaskich) ma postać:

$$\alpha = \mu / (2v-5)$$

<sup>11</sup> Część grafu obejmującego określone wierzchołki i krawędzie.

<sup>12</sup> Długość drogi jest to liczba łuków w ciągu.

<sup>13</sup> Droga (ścieżka) jest to skończony lub nieskończony ciąg łuków takich, że koniec każdego przedniego łuku jest początkiem następnego. Droga jest elementarna, jeśli każdy wierzchołek należący do niej występuje tylko jeden raz.

<sup>14</sup> Łańcuch jest to skończony lub nieskończony ciąg krawędzi, w którym koniec każdej poprzedniej krawędzi jest początkiem następnnej.

<sup>15</sup> spójność minimalna – spójność maksymalna =  $22 - 1 = 21$ ; spójność minimalna – obserwowany stopień spójności =  $22 - 12,61 = 9,39$ . Z proporcji  $21:9,39 = 100:x$ , stąd  $x = 44,7\%$

<sup>16</sup> Graf spójny – sytuacja, w której każdy wierzchołek grafu ma połączenia z pozostałymi za pomocą łuku. Łuk zaś jest trasą wzdłuż krawędzi grafu, nieprzechodzącą dwa razy przez ten sam wierzchołek.

Wskaźnik  $\alpha$  określa stosunek faktycznej do maksymalnej liczby obwodów<sup>17</sup> (cykli). Dla grafów z małą liczbą krawędzi ma on wartości bliskie zeru. W przypadku kiedy liczba krawędzi rośnie (spójność wzrasta), wskaźnik  $\alpha$  zbliża się do jedności. Wartość zerowa jest charakterystyczna dla wszystkich sieci, których liczba cyklicznych również jest równa zeru, a więc grafów niespójnych i drzew. Sytuacja taka dotyczy grafu obrazującego sieć tramwajową województwa łódzkiego. Określenie wartości wskaźnika  $\alpha$  pozwala porównać analizowaną sieć z grafem pełnym (w którym każda para wierzchołków jest połączona krawędzią) o tej samej liczbie wierzchołków. Dzięki ujęciu wskaźnika w wartościach procentowych możliwe jest wskazanie odsetka spójności maksymalnej. Dla grafu obrazującego sieć drogową województwa łódzkiego wskaźnik wynosi 0,39, co oznacza, że stanowi niecałe 40% grafu pełnego dla 44 wierzchołków. Wskaźnik  $\alpha$  dla sieci kolejowej jest znacznie niższy i wynosi 0,08, a więc stanowi jedynie niecałe 10% grafu pełnego.

Kolejną miarą wprowadzoną przez Kansky'ego, jest wskaźnik  $\beta$ , będący ilorazem liczby krawędzi do liczby wierzchołków w grafie i odnoszący się do jego struktury:

$$\beta = e/v$$

Opiera się na podstawie podobnej do liczby cyklicznej i wskaźnika  $\alpha$ . Sieci transportowe o bardziej złożonej strukturze odznaczają się wyższymi wartościami  $\beta$ , natomiast sieci o prostej strukturze będą miały wartości niższe. Dla sieci drogowej wskaźnik  $\beta$  wynosi 1,7 i jest znacznie wyższy niż dla sieci kolejowej (1,1) oraz tramwajowej (0,8).

Wskaźnik  $\gamma$ , autorstwa Kansky'ego wyraża stosunek istniejącej liczby krawędzi do maksymalnie możliwej liczby krawędzi i dla grafów płaskich przybiera postać:

$$\gamma = e/3(v-2)$$

Daje on pojęcie o rozmiarach potrzebnych uzupełnień w sieci. Waha się od zera (brak spójności) do jedności (spójność maksymalna). Podobnie jak w przypadku wskaźnika  $\alpha$  można go wyrazić w odsetkach. Jego wartość nie zależy od liczby wierzchołków w sieci transportowej. Istniejące 75 krawędzi w grafie obrazującym sieć drogową województwa łódzkiego stanowi jedynie 59,5% liczebności, która pozwoliłaby na uzyskanie grafu pełnego. Graf obrazujący sieć kolejową jest spójny w jeszcze mniejszym zakresie – 39,4%. Wskaźnik  $\gamma$  dla sieci tramwajowej wskazuje, że jej cztery krawędzie stanowią 44,4% liczby krawędzi koniecznych do powstania grafu pełnego.

Liczba podobnych wskaźników, opartych na zbliżonych zasadach jest znacznie większa. Zagożdżon [12, 13] wprowadził wskaźnik mówiący o stopniu rozwinięcia grafu ( $G_p$ ):

$$G_p = \frac{v^2 - v - e}{v}$$

<sup>17</sup> Obwód jest skończoną drogą, w której początkowy wierzchołek pierwszego łuku jest końcowym wierzchołkiem ostatniego łuku drogi.

Wskaźnik mówi o liczbie krawędzi brakujących do grafu pełnego, przypadających na jeden wierzchołek, tym samym określa pożądane uzupełnienia w sieci. W przypadku sieci drogowej województwa łódzkiego takie uzupełnienia powinny wynosić 20 krawędzi. Dla grafu obrazującego sieć kolejową z mniejszą liczbą wierzchołków liczba brakujących krawędzi wynosi 16. Po jednej krawędzi należy dodać do każdego wierzchołka w grafie przedstawiającym sieć tramwajową, aby graf był pełny.

Wykorzystane dotychczas wskaźniki mają szereg zalet, z których najważniejszą jest prostota. Nie są jednak pozbawione wad, m.in. niejednoznacznie różnicując grafy o odmiennej strukturze, bowiem parametry grafów mogą być identyczne, ale układ krawędzi łączących poszczególne węzły jest inny.

Odpowiedzią na występujące niejasności jest wprowadzenie wskaźnika S-I, opracowanego przez Orda [14], opierającego się na trzech pierwszych momentach centralnych<sup>18</sup>. Dla grafu o określonej liczbie wierzchołków konieczne jest w pierwszej kolejności opracowanie macierzy zero-jedynkowej połączeń (1 – istnienie bezpośredniego połączenia pomiędzy parą miast; 0 – brak połączenia). W kolejnym etapie konieczne jest opracowanie macierzy oddaleń<sup>19</sup>. Po skonstruowaniu macierzy<sup>20</sup> odpowiadającej rozważanemu grafowi należy skonstruować rozkład liczebności ( $f_l$ ) oddaleń ( $l$ ). Przedstawiono je w tabelach 1a, b i c.

Tabela 1

#### Rozkład liczebności oddaleń dla grafu przedstawiającego sieć (a) drogową, (b) kolejową i (c) tramwajową

(a)

l	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_l$	44	150	310	422	430	336	186	52	6

(b)

l	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_l$	30	60	88	122	138	142	116	94	66	32	12

(c)

l	0	1	2	3
$f_l$	5	5	5	3

Źródło: opracowanie własne

<sup>18</sup> Momenty są średnimi arytmetycznymi z odchyleń wartości zmiennej  $x_i$  od dowolnej liczby  $x_0$  podniesionej do  $r$ -tej potęgi. Momenty pozwalają wyznaczyć poziom średni badanej cechy zmiennej, poziom zróżnicowania poszczególnych jednostek zbiorowości w stosunku do średniej arytmetycznej  $x$ , stopień asymetrii czy też stopień koncentracji. W zależności od tego, czy wielkością dowolną  $x_0$  jest zero, czy też średnia arytmetyczna  $x$ , możliwe jest obliczenie odpowiednio momentów zwykłych lub centralnych. Moment centralny pierwszego stopnia jest równy średniej arytmetycznej, moment drugiego stopnia jest wariancją, trzeciego stopnia miarą asymetrii, a moment centralny czwartego stopnia jest miarą skupienia danych.

<sup>19</sup> Oddaleniem  $d_{xy}$  wierzchołka  $x$  do  $y$  nazywamy długość najkrótszej drogi od  $x$  do  $y$ .

<sup>20</sup> Macierz oddaleń można otrzymać, zastępując w macierzy zero-jedynkowej zera – z wyjątkiem leżących na głównej przekątnej – liczbą krawędzi liczonych wzdłuż najkrótszej drogi między każdą parą węzłów.

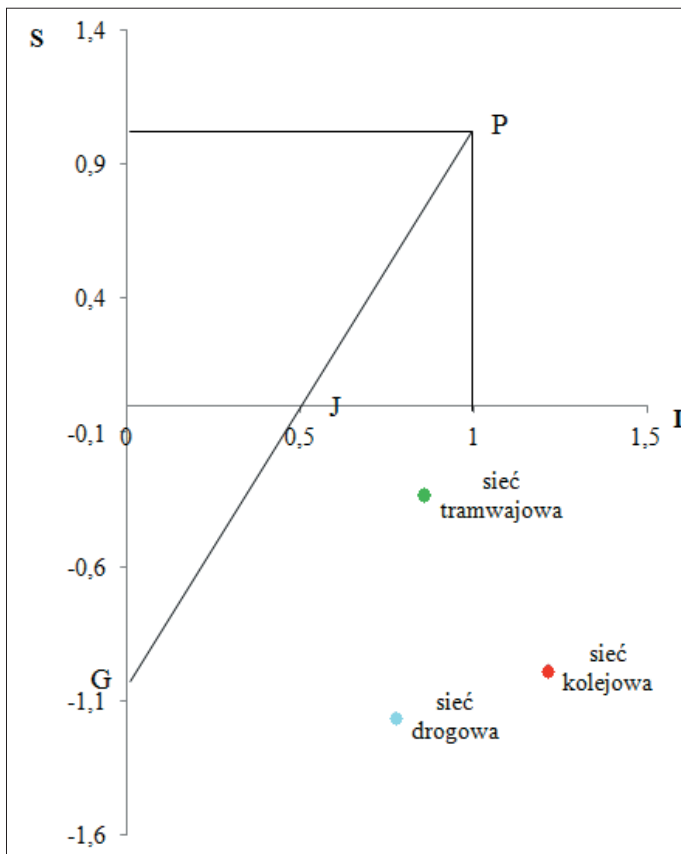
Oznaczając  $N$  jako sumę liczebności oddaleń ( $N_{\text{drogowy}} = 1936$ ;  $N_{\text{kolejowy}} = 900$ ;  $N_{\text{tramwajowy}} = 18$ ), możliwe jest określenie rozkładu częstości. Kolejny etap analizy obejmuje obliczenie 3 pierwszych momentów centralnych rozkładu częstości oddaleń badanych grafów. Największa wartość w macierzy oddaleń to średnica grafu ( $\delta$ ) (dla sieci drogowej – 8, kolejowej – 10, tramwajowej – 3). Warto zauważyć, że taką samą wartość średnicy mogą mieć sieci znacznie różniące się bezwzględными rozmiarami. Bowiernie obliczane są tutaj oddalenia w sensie topologicznym, a nie odległości w sensie fizycznym.

- pierwszy moment centralny:  $\mu_1 = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{\delta} f_l \cdot l$
- drugi moment centralny:  $\mu_2 = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{\delta} f_l \cdot (l - \bar{l})^2$
- trzeci moment centralny:  $\mu_3 = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{\delta} f_l \cdot (l - \bar{l})^3$

Współrzędne  $S$  oraz  $I$  wskaźnika  $S$ - $I$  określono następująco:

$$S = \frac{\mu_3}{\mu_2}; I = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

Po obliczeniu wskaźnik  $S$ - $I$  należy nanieść go na odpowiedni wykres (rys. 3.) i znając lokalizację wskaźnika dla grafów charakterystycznych, możliwym jest określenie jego struktury [9]. Położenie punktów odpowiadających sieci drogowej i kolejowej jest najbliższe lokalizacji charakterystycznej dla grafu z dwoma wierzchołkami silnie spójnymi,



Rys. 3. Wykres  $S$ - $I$  z naniesionymi współzrędnymi dla sieci drogowej, kolejowej i tramwajowej województwa łódzkiego

Źródło: opracowanie własne

jednakże znajdują się dalej od osi  $S$  niżeli jest to w przypadku rozkładu wzorcowego. Wskaźnik  $S$ - $I$  dla sieci tramwajowej ma położenie wskazujące, iż jest to graf gwiazdzisty, jednakże przy jego liczbie wierzchołków, lokalizacja punktu jest zbyt daleka od osi  $S$  [15].

W rzeczywistości sprawa nie jest tak prosta, gdyż struktura istniejących sieci pod wpływem oddziaływania różnorodnych czynników: topograficznych, gospodarczych, politycznych i innych, jest bardzo złożona.

### Zakończenie

Podsumowując wyniki powyższych wskaźników, należy podkreślić, iż wyraźnie najbardziej spójnym i złożonym jest graf przedstawiający sieć drogową województwa. Jednak ze względu na dużą liczbę wierzchołków (miast) wymaga największej liczby uzupełnień. Mniejszą spójnością i złożonością odznacza się graf prezentujący sieć kolejową. Natomiast graf przedstawiający sieć tramwajową jest grafem niespójnym o zdecydowanie najniższym poziomie złożoności.

Wprowadzenie nowych inwestycji w każdej z analizowanych sieci zapewne podniosłoby poziom jej spójności, natomiast istotniejsze są rozwiązania skupiające się na już istniejącej infrastrukturze. Przedstawiona analiza nie różnicowała bowiem sieci pod względem np. stanu technicznego czy maksymalnych dozwolonych prędkości przejazdu na danym odcinku. Zapewne zabiegi mające na celu podniesienie tych parametrów pozytywnie wpłynęłyby na funkcjonowanie połączeń wewnątrzregionalnych województwa. Dlatego też wzrostu spójności upatrywać należy bardziej w podnoszeniu warunków technicznych i modernizacji istniejących dróg niż we wprowadzaniu nowych odcinków. Oczywiście inwestycje Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, które w czasie niniejszego badania są w fazie przygotowania, przetargu lub realizacji, w pewnym stopniu również wpłyną na poziom spójności. Zarówno w przypadku kiedy prowadzone są po starym śladzie, jak i w sytuacji implementacji zupełnie nowych odcinków. W sieci kolejowej aktualne powiązania wskazują na niską koherencję funkcjonującej sieci i duże możliwości jej wzrostu przy ewentualnych inwestycjach. Rozpatrując plany inwestycyjne Polskich Linii Kolejowych SA, należy oczekiwać wzrostu efektywności połączeń kolejowych w wyniku modernizacji istniejącej sieci i taboru oraz wdrażania bardziej efektywnych systemów zarządzania ruchem, a nie inwestycje w nowe odcinki poza realizacją „Y” Warszawa – Łódź – Poznań/Wrocław, który jednak dla wojewódzkiej sieci ma znaczenie marginalne. Analogicznie do sieci kolejowej prezentuje się sytuacja połączeń tramwajowych. Poza zmianami towarzyszącymi budowie Nowego Centrum Łodzi oraz przebudowie Trasy W-Z wraz z centrum przesiadkowym organizacja ruchu tramwajowego nie ulegnie zmianom. Ponadto wpływ wskazanych inwestycji nie wykróczy poza granice Łodzi, tym samym pozostawiając bez zmian efektywność połączeń z pozostałymi czterem ośrodkami połączonymi siecią. Biorąc pod uwagę, iż sieć tramwajowa nie będzie rozwijała się pod względem ilościowym, jedynym

rozwiązaniem są zabiegi w kierunku usprawnienia funkcjonującej obecnie infrastruktury.

Biorąc powyższe pod uwagę dużą wagę należy przywiązać do dróg wojewódzkich, a w szczególności do ich stanu technicznego. Konieczne jest wybranie tychże dróg o kluczowym znaczeniu dla regionu. Modernizacja tych elementów infrastruktury, pomijana na rzecz priorytetowych odcinków dróg ekspresowych i autostrad, może przyczynić się do wzrostu efektywności transportu w skali regionalnej, stanowiąc uzupełnienie dla głównych osi wschód-zachód i północ-południe, przechodzących przez centrum regionu. Szczególnej uwagi wymagają ponadto odcinki przechodzące przez miasta. Wprowadzanie ruchu do centrum miasta przede wszystkim znacznie zaburza jego płynność. Ponadto wzmożony ruch wewnątrz miasta w połączeniu z ruchem tranzytowym wpływa negatywnie na stan nawierzchni i zmusza do częstszych napraw, co z kolei stanowi utrudnienie w ruchu. Inwestycje w drogi wojewódzkie czy też powiatowe wprawdzie nie pociągają za sobą fundamentalnych zmian w dostępności, to przyczyniać się mogą do niwelowania bariery psychologicznej, towarzyszącej podróży drogami niższych kategorii poprzez wzrost bezpieczeństwa jazdy, jej komfortu i ograniczenie kongestii.

W odniesieniu do transportu zbiorowego podniesienie poziomu spójności możliwe jest poprzez jak najszerszą integrację poszczególnych systemów, włączając w nią poszczególne szczeble administracji samorządowej oraz przewoźników oferujących przejazdy samochodowe, kolejowe i tramwajowe. Ze względu na rozległość koniecznych zmian realne wydaje się ograniczenie do głównych połączeń – w pierwszej kolejności umożliwiających wielogłęziowy transport do ośrodka regionalnego na zasadach biletu aglomeracyjnego, który objąłby kolej, transport lokalny i przedsiębiorstwa komunikacji samochodowej.

Znacznym ułatwieniem dla podróżnych oraz jednoczesnym podniesieniem efektywności funkcjonowania transportu zbiorowego byłoby również zobligowanie przewoźników realizujących przewozy pomiędzy miastami do rozpoczynania trasy lub przejeżdżania przez wspólny przystanek. Negatywnie w stosunku do systemu transportowego oddziałuje bowiem sytuacja, w której aby kontynuować podróż pomiędzy miastami, które nie są obsługiwane przez połączenie bezpośrednie, konieczne jest przejście piesze znacznej odległości pomiędzy przystankiem końcowym i początkowym tras przejazdu lub też zaangażowanie w tym celu kolejnego środka transportu.

Uzupełnieniem dla integracji systemów transportu zbiorowego powinien być obligatoryjnie współtworzony przez samorządy i przewoźników wszystkich typów serwis internetowy zbierający informacje dotyczące aktualnych tras, rozkładów jazdy oraz cennik transportu zbiorowego, działającego w województwie łódzkim. Funkcjonujące aktualnie serwisy poświęcone transportowi zbiorowemu posiadają wiele braków, szczególnie w zakresie przewoźników typu bus. Taka forma ułatwienia dostępu do danych podniosłaby konkurencyjność oferty transportu zbioro-

wego wobec indywidualnego. Bowiem transport zbiorowy i indywidualny nie powinny być uznawane za konkurencyjne względem siebie, lecz komplementarne.

## Literatura

1. Ratajczak W., *Analiza i modele wpływu czynników społeczno-gospodarczych na kształtowanie się sieci transportowej*, PWN, Warszawa – Poznań 1980.
2. Taylor Z., *Zastosowanie metod grafowych w badaniach przestrzenno-ekonomicznych*, Czasopismo Geograficzne, t. XLV, Warszawa 1974.
3. Napierała T., Adamiak M., Wiśniewski S., *Regionalna sieć drogowa determinantą lokalizacji centrów logistycznych w województwie łódzkim*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2013, nr 9.
4. Taylor Z., *Rozwój i regres sieci kolejowej w Polsce*, IGiPZ PAN Monografie, 7, Warszawa 2007.
5. Schiele M., *Sieć transportowa regionu środkowej Polski*, [w:] A. Werwicki (red.) *Transformacja społeczno-ekonomiczna środkowej Polski*, Wyd. UŁ, Łódź 1998.
6. *Diagnoza województwa łódzkiego*, Tom III, *Sfera funkcjonalno-przestrzenna*, Łódź, 2005 [online] [http://www.lodzkie.pl/wps/wcm/connect/bip/bip/urządzmarszalkowski/programy/strategiawojewodztwalodzkiego/tom\\_iii\\_sfera\\_funkcjonalno\\_przestrzenna.zip](http://www.lodzkie.pl/wps/wcm/connect/bip/bip/urządzmarszalkowski/programy/strategiawojewodztwalodzkiego/tom_iii_sfera_funkcjonalno_przestrzenna.zip).
7. Bartosiewicz B., Pielesiak I., *Powiązania transportowe w Łódzkiej Obszarze Metropolitalnym*, Studia KPZK PAN, *Spójność terytorialna Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego*, t. 147, (red. Bartosiewicz B., Marszał T., Pielesiak I.), Warszawa 2012.
8. Taylor Z., *O społecznej geografii transportu*, Przegląd Geograficzny, 1980, 52, 1.
9. Runge J., *Metody badań w geografii społeczno-ekonomicznej – elementy metodologii, wybrane narzędzia badawcze*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2007.
10. Prihar Z., *Topological properties of telecommunications networks*, Proceeding of Institute of Radio Engineering, 44, 1965.
11. Kansky K. J., *Structure of transport network: Relationships between network geometry and regional characteristics*, Research Papers, No. 84, University of Chicago, Department of Geography, 1963.
12. Zagożdżon A., *Metody grafowe w badaniach osadnictwa*, Przegląd Geograficzny, 1970, t. 42, z. 2.
13. Zagożdżon A., *Analiza układów przestrzennych osiedli rejonu uprzemysłowionego z wykorzystaniem technik z zakresu teorii grafów*, [w:] *Rejony uprzemysłowione, Problematyka i badania*, KiZBRU PAN, Warszawa 1971.
14. Ord J.K., *On a system of discrete distribution*, *Biometrika*, 1967, Vol. 54, No. 3–4.
15. Potrykowski M., Taylor Z., *Geografia transportu. Zarys problemów, modeli i metod badawczych*, PWN, Warszawa 1982.
16. Decyzja Parlamentu Europejskiej i Rady Nr 661/2010/UE z dnia 7 lipca 2010 r. w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju Transeuropejskiej Sieci Transportowej, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej Nr L 204 z 5 sierpnia 2010 r.
17. *Wersje skonsolidowane Traktatu o Unii Europejskiej i Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej*, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej Nr C 326 z 26 października 2012 r.
18. Wniosek COM/2011/650 Komisji z dnia 6 lutego 2012 r. *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju Transeuropejskiej Sieci Transportowej*, Numer procedury COD/2011/0294.