

ANDRZEJ KRYCH

dr inż., Politechnika Poznańska,
Instytut Inżynierii Lądowej, Piotrowo 5,
60-965 Poznań, tel. 48 61 6652408,
e-mail: a.krych@bit-poznan.com.pl

JEREMI RYCHLEWSKI

dr inż., Politechnika Poznańska,
Instytut Inżynierii Lądowej, Piotrowo
5, 60-965 Poznań, tel. 48 61
6475816, e-mail: jeremi.rychlew-
ski@put.poznan.pl

Sieć buchananowska a teorie optymalizacji miejskiej sieci drogowej^{1,2}

Streszczenie. Artykułem objęto podstawowe tezy sformułowane w drugiej części referatu „Raport Buchanana 50 lat później” z IX konferencji nt. „Problemów komunikacyjnych miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”³. Analizie poddano tendencje w praktyce i nurty w teorii optymalizacji miejskich sieci drogowych mijającego półwiecza z punktu widzenia też raportu dotyczących struktury sieci drogowej. Zdefiniowano układy głównych ulic rozprowadzających jako sieci buchananowskie. Na podstawie rozwinięcia idei raportu do formy sześciu tez optymalnego kształtowania sieci autorzy analizują różne nurty w badaniach teoretycznych i empirycznych. W podejściu do problemu optymalizacji za Steenbrinckiem wyróżniono zagadnienie optymalnej architektury sieci od efektywnego kreowania jej wydajności. W architekturze sieci wykazano tendencje izomorficznej zbieżności miejskich układów sieci drogowych z ochroną środowiska miejskiego w rozumieniu Buchanana. Poparto to wynikami eksperymentów symulacyjnych dla czytelnie skonfigurowanego rzeczywistego układu rusztowego sieci ulic Poznania. Wskazano na spójność problemu optymalności z nurtem badań teoretycznych i symulacyjnych związanych z paradoksem Braessa w sieciach przegęszczonych i zatłaczanych. W podejściu do wydajności sieci buchananowskiej wskazano na problem funkcji celu – maksymalizacji pojemności transportowej sieci zatłaczanej i jej związku z dynamicznym zarządzaniem ruchem. Wskazano na problem generalnie związany z brakiem kompatybilności między modelem popytu (macierzy podróży) i teorii strumienia ruchu. Wsparło hipotezę optymalności wynikami badań nad Fundamentalnym Wykresem Makroskopowym (MFD, NFD).

Słowa kluczowe: planowanie miast, ochrona środowiska miejskiego, optymalizacja sieci transportowych, kongestia, zarządzanie ruchem, ITS

Sieć buchananowska

Jedną z najczęściej cytowanych formuł Raportu Buchanana dotyczy, uznanej za optymalną, sieci arterii ruchu samochodowego w kształcie rusztu o gęstości 1300–1400 m, wspartej strukturą ulic obsługujących teren (rozdz. 2.2, nr 38 i 39 [1], także w krajowych źródłach [2, 3]). Optimum to wywiedziono w pracach nad raportem, analizując sieci o gęstości 650, 900, 1370 i 1800 m. Teza podbudowana została analizą przepustowości wlotów i wylotów oraz jakości struktur środowiska miejskiego [1]. Raport wyróżnia ulice rozprowadzające główne i boczne (określimy je jako doprowadzające) oraz środowiskowe. Ma to z grubsza odpowiedniki w polskiej klasyfikacji funkcjonalnej ulic, jeże-

li ulice doprowadzające sklasyfikować jako ulice zbiorcze. W raporcie dopuszcza się zatory wyłącznie w sieci ulic rozprowadzających.

Biorąc pod uwagę upływające półwiecze, interesująco przedstawia się ewolucja tej zasady w teorii i praktyce inżynierii ruchu. Wyodrębnimy trzy zasadnicze przesłanki tego procesu:

1. wyróżnienie sieci głównych ulic rozprowadzających ruch w sieci z pominięciem ulic środowiskowych – obsługujących tereny przyległe,
2. optymalizacja struktury i architektury sieci ulic głównych,
3. kształtowania wydajności ulic obsługujących ruch.

W nawiązaniu do pierwszej przesłanki wprowadźmy oznaczenie β dla optymalizowanej sieci ulic przeznaczonej dla ruchu samochodowego (jako sieci buchananowskiej) – jako wyodrębnionego segmentu z sieci globalnej Φ .

W nawiązaniu do drugiej spróbujemy znaleźć odpowiedź, jak idea regularności i gęstości ρ sieci β jest respektowana w rzeczywistości i jaki ma to wpływ na jej przepustowość.

W nawiązaniu do trzeciej postaramy się zasady praktycznego kształtowania architektury i wydajności sieci β osadzić w teorii kształtowania sieci transportowych i systemów zarządzania ruchem w ciągu ostatniego półwiecza.

Za kluczowy uznać możemy wynikający z raportu, po części zaś z doświadczenia, następujący ciąg logiczny sześciu kolejnych tez:

- I. przegęszczenie ρ sieci β wpływa na zmniejszenie jej pojemności transportowej, analogicznie jak jej mniejsza od optymalnej gęstość;
- II. zwiększenie pojemności sieci β o gęstości nie mniejszej jak optymalnej możliwe jest tylko poprzez jej ekspansję na zewnątrz;
- III. rozszerzenie sieci β na zewnątrz wynika lub sprzyja ekspansji urbanizacji, zmniejszaniu gęstości zaludnienia i zwiększeniu mobilności;
- IV. w przestrzeni urbanizowanej zoptymalizowanej gęstości sieci ρ towarzyszyć musi sieć ulic niezbędna dla obsługi przyległych terenów, której gęstość zależy wyłącznie od sposobu zagospodarowania terenu;
- V. w przestrzeni sieci Φ tylko niektóre z elementów sieci (przynależne do sieci β) decydują o jej pojemności transportowej;
- VI. jeżeli atrybutem współczesnych sieci drogowych miast jest tendencja do obszarowego i czasowego ich zatłaczania, szczególne znaczenie dla pojemności trans-

¹ © Transport Miejski i Regionalny, 2014. Wkład autorów w publikację: A. Krych 50%, J. Rychlewski 50%.

² Artykuł opracowano na podstawie referatu wygłoszonego na IX konferencji naukowo-technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia komunikacyjnego”, Poznań–Rosnówek, 19–21. VI. 2013 r.

³ Część pierwszą raportu opublikowano w numerze 12 TMiR w 2013 roku (Rychlewski J., Krych A., Raport Buchanana 50 lat później).

portowej sieci β ma zatłoczenie jej elementów, prowadzące do zmniejszenia jej wydajności zgodnie z podstawowym równaniem strumienia ruchu.

Wszystkie wyżej wymienione tezy wynikają z pierwszej (I), zakładającej istnienie optimum gęstości sieci ρ . Jest to więc teza centralna o znaczących konsekwencjach w planowaniu i zarządzaniu ruchem.

Wprowadzając pojęcie sieci buchananowskiej za [4], podkreślimy jej odrębność od układu podstawowego ulic ze względu na zasadę (VI). Istotą jej wyodrębnienia jest jej decydujące znaczenie dla pojemności transportowej zatłaczanej sieci Φ , umożliwiające wykonanie maksymalnej pracy transportowej, to jest pracy w warunkach zapewniających płynność ruchu w sieci β . Jest to więc sieć, której odcinki nie powinny być zatłoczone bardziej niż określają to warunki podstawowego równania strumienia ruchu dla przepływu swobodnego. To, na ile dopuścimy w niej do stanu ruchu wymuszonego, pozostanie kwestią wydajności implementowanej przez inteligentny system zarządzania ruchem.

Wyróżnimy dwa atrybuty optymalności [6]:

- architektury – kształtowanej w sposób buchananowski (kształt, gęstość i hierarchia, często określanej w teorii sieci jako morfologia, czasem topologia sieci) oraz:
- wydajności – poprzez dynamiczny i/lub kontrolowany rozkład ruchu w sieci Φ – oczywiście z uwzględnieniem priorytetów odpowiadających dopuszczalnej przepustowości ulic środowiskowych.

Atrybuty wydajności sieci buchananowskiej opisano w pracy [4] (2007), a jej aspekty dynamiczne w [6] (2009) – tu rozszerzymy ich tło o pewne aspekty teoretyczne. Atrybutom architektury sieci rzeczywistej poświęcono rozdział 2, badaniom teoretycznym ich kształtu rozdział 3, a badaniom eksperymentalnym ich wydajności – rozdział 4.

Architektura sieci rzeczywistych

Analiza architektury sieci w miastach europejskich

Aspekt praktyczny podejmiemy, odnosząc się do sieci rzeczywistych. W rzeczywistości, tak jak nie występują sieci regularne, tak również nie występują sieci optymalne – możemy mówić najwyżej o sieciach optymalizowanych izomorficznie, to jest w procesie historycznego ich narastania i przystosowania do bieżących wyzwań, szczególnie wywołanych przez wzrost motoryzacji [7]. Rozważymy problem relacji pomiędzy siecią optymalną z punktu widzenia ruchu samochodowego a siecią optymalną z punktu widzenia Buchanana, to jest z uwzględnieniem środowiska miasta. Kwintesencją problemu jest pytanie, w jakim stopniu kryterium środowiska (czyli gęstość sieci ρ^{eko}) jest antagonistyczne wobec pierwszego kryterium (czyli $\rho^{moto} \geq \rho^{eko}$).

Dokonano analiz sieci 21 miast europejskich (tab. 1), o populacji mieszkańców przewyższających 0,4 mln⁴.

Tabela 1

Charakterystyki ramowych układów ulic układu podstawowego miast przy wyróżnieniu trzech do czterech obrysów ramowych							
Miasto	Średni odstęp (km) Kierunki:		Wartości ekstremalne odstępów obrysów (km)		Rozmiar drugiego obrys (km) Kierunki:		Gęstość cięć poprzecznych drugiego obrys (km)
	EW	NS	Max	Min	EW	NS	
1	2	3	4	5	6	7	8
Bydgoszcz	4,0	3,9	16,8	1,0	2,3	2,7	1,0
Kraków	3,2	2,5	4,7	2,1	2,6	2,1	0,7
Łódź	4,0	4,4	10,6	1,1	2,7	4,6	0,9
Poznań	2,7	3,0	4,0	1,0	4,0	6,0	0,8
Warszawa	2,2	3,3	5,8	1,8	4,5	5,0	1,2
Wrocław	4,3	4,3	10,3	0,8	2,1	1,9	1,0
Berlin	2,6	2,6	5,2	0,8	5,2	5,0	1,1
Birmingham	3,8	6,6	24,2	0,9	3,2	2,6	1,0
Bolonia	3,3	3,2	5,2	0,9	4,6	5,0	0,8
Brno	2,3	2,3	5,3	0,9	3,8	2,7	0,8
Hanower	4,1	3,1	12,0	1,2	4,8	6,0	1,1
Kopenhaga	3,7	4,0	7,4	1,1	3,6	5,1	1,3
Marsylia	7,8	7,8	16,5	1,6	6,7	7,8	1,4
Mediolan	4,6	5,2	9,9	1,9	5,4	5,8	1,2
Manchester	4,2	3,8	10,8	0,4	2,2	1,4	0,5
Londyn	9,0	8,0	19,6	0,7	5,5	4,8	1,0
Nancy	2,2	3,1	6,5	0,7	2,2	3,1	0,4
Leeds	4,7	3,7	11,4	0,8	2,7	2,3	0,8
Lipsk	3,3	2,7	7,4	0,7	2,6	3,3	0,7
Sewilla	2,5	3,5	5,1	1,7	4,8	5,3	1,4
Sofia	1,8	2,7	4,8	1,3	4,3	3,4	1,1
Średnio	3,8	4,0	9,8	1,1	3,7	4,1	1,0

Analizowano układy ulic podstawowych o kształcie rusztu lub pierścienia, klasyfikując je w układzie kolejnych, od trzech do pięciu obrysów ramowych – czasem niejednorodnych pod względem funkcjonalnym, czasami niedomkniętych⁵. Układy obwiedni w obrysie ramowym uwzględniono, biorąc pod uwagę, że są z zasady wpisane w miasto współcześnie – zatem w odstępach minimalizowanych do poziomu kompromisu z jakością i ochroną środowiska miasta. W przeciwieństwie do obrysów ramowych ulice radialne, prowadząc ruch w kierunku ukształtowanych centrów w miastach europejskich, mają historycznie osadzoną tendencję zbieżności w kierunku centrum.

Tendencja dośrodkowa kształtuje się pod wpływem wektorów ruchu w wyniku minimalizacji kosztu dystansu. Układy ramowe stanowią odśrodkową alternatywę dla wektorów ruchu minimalizujących koszty czasu. W obserwacji map drogowych analizowanych miast zauważa się tendencję wyłączania dostępu do układów ram z przecinających je ulic. Taki zabieg, towarzyszący m.in. normatywnym standardom hierarchizacji ulic, świadczy, że w procesie optymalizacji odległości cięcia ram, w przeciwieństwie do odstępów ram, są maksymalizowane – głównie ze względu na sprawność tras o wyższych kategoriach funkcjonalnych.

⁴ Poza polskimi, monocentrycznymi aglomeracjami miejskimi, zestaw pozostałych, ujętych w tabeli 1 wynika z zasady pierwszego wyboru.

⁵ Potencjalnych – czyli w języku geografii ujawniając „ich ukryte tło” [8] (por. rozdz.3.2). Odcinki te mogą być nie aktywowane często także ze względu na ochronę środowiska miejskiego lub jej relacje do potencjalnego natężenia ruchu.

Z analizy danych w tabeli 1 wynikają także następujących wnioski:

- z reguły wyraźne są struktury ramowe pierwszego i drugiego obrysu ramowego, rzadziej trzeciego lub dalszego, które poza nielicznymi przypadkami (lub na niektórych kierunkach) bywają bardziej, a nieraz znacznie bardziej oddalone od poprzednich;
- ukształtowanie węzła dróg krajowych – obwodnic lub krzyżujących się autostrad – zawyża znacznie wartości średnich odstępów między obrysami ramowymi (kol. 2 i 3) oraz odstępów maksymalne (kol. 4) i pozwala stwierdzić, że po drugim obrysie ramowym w kolejnych znacznie wzrasta rozbieżność struktur sieci;
- oprócz pierwszego obrysu (z nielicznymi wyjątkami – wartość minimalną odstępów podano w kol. 5), wyraźnie otaczającego ukształtowane historycznie centra miast, drugi obrys ramowy w przeważającej liczbie przypadków uznać można za najbardziej klasyczny (por. kol. 6 i 7);
- dla drugiego obrysu ramowego – występuje tylko siedem wśród 40 przypadków średniego odstepu mniejszego od optimum Buchanana (to jest mniejszego od 2,7 km – porównując połowę wartości z kol. 6 i 7 jako modułu $\rho^{eko} = 1,35$ km ze względu na obsługę obszaru wewnątrz ramy);
- odmiennie przedstawia się gęstość cięć gałęzi drugiego obrysu ramowego przez ulice o przebiegu radialnym (kol. 8), gdzie prawie we wszystkich miastach (prócz trzech) średnie odstepy mieszczą się poniżej optimum Buchanana (średnio 1,0 km) wyznaczonego w istocie dla nowo kształtowanych struktur.

Na podstawie oglądu danych w tabeli 1 można przyjąć, że moduł regularnego rusztu w klasycznym mieście europejskim jest spłaszczony do formy prostokąta. Mimo stosowanych zasad kontroli akcesji wobec większości kolejnych układów ramowych, zachowuje historycznie zarysowaną tendencję zbiegu w kierunku centrum (średnia około kilometra), a przewyższa optimum Buchanana, nieraz znacznie, w postępujących odśrodkowo odstępach ramowych. Średni odstęp w zasięgu drugiego obrysu 3,8x4,2 km wobec pierwszego 1,1x1,1 km buduje przeciętny dystans 1,35–1,55 km między pierwszym i drugim obszarem ramowym.

Ocenia się zatem, że kryterium środowiska miejskiego (ρ^{eko}) w rzeczywistych układach sieciowych nie tylko nie rysuje się ostrzej jak kryterium ruchu (ρ^{moto}), ale wydaje się w znacznym stopniu zbieżne. Co więcej – model sieci miasta europejskiego „uregulowany” na granicy drugiego obrysu ramowego oscyluje w kierunku optimum buchanańskiego.

Morfogeneza sieci drogowych miast potwierdza zasadę izomorfizmu („według cech dróg lub ich układów odczytywać można sposoby poruszania się po tych drogach i układach oraz zakresy i sposoby ujmowania ich optymalizacji, a także – zakresy świadomości występujące w tym postępowaniu” cyt. Z. Wasutyński, wstęp do [7]). Ich morfologia

zdaje się wpisywać w przestrzeń optimumów ujętych na rysunku 1 – gęstość sieci („rozmiar” wg [9]) maleje bowiem ku zewnętrznym strefom miasta z malejącymi kosztami ruchu a rosnącymi kosztami budowy nowych połączeń. Poczynając od drugiej ramy, zdajemy się zbliżać ku sieciom optymalizowanym w skali regionalnej (por. rozdz. 3.2).

Analiza eksperymentu

Sieć ulic miasta Poznania ma wyjątkowo czytelny układ ramowy, także na tle miast scharakteryzowanych w tabeli 1. Kształtuje go układ dwóch ram z załączkami i planami rozbudowy trzeciej ramy. Badania optymalizacyjne układu sieci drogowej Poznania [10,11] przeprowadzono w 1999 roku z wykorzystaniem programu symulacyjnego SATURN, wyjątkowo precyzyjnego w respektowaniu przepustowości w warunków szczytowych obciążeń sieci więźbą podróży.

Zbadano ponad 40 wybranych przedsięwzięć w sieci, sklasyfikowanych w siedmiu kategoriach działań systemowych w kolejności od najbardziej efektywnych w osiągnięciu poprawy warunków ruchu (por. tab. 2).

Badania wykazały ponadto:

- największą wydajność dopełniania układów ramowych lub obwodowych w zarysach ramowych o dobranych odstępach z szybko malejącym efektem zarówno w miarę ich oddalania do obszarów peryferyjnych, jak zbliżania ku elementom ramowym istniejącym;,
- wysokie korzyści zarządzania ruchem w zakresie ograniczeń ruchu w obszarach zatłoczenia;
- brak korzyści w przypadku zagęszczania sieci bez równoczesnego uspokojenia ruchu w otoczeniu (szczególnie dotyczyło to nowych ulic radialnych – por. wynik dla kat. 4 kol. 3 i kol. 4);
- niewielkie korzyści wielkich budowli punktowych.

W kontekście atrybutów wydajności sieci buchanańskiej podkreślić należy wysoką skuteczność projektów objętych kategorią „zarządzania ruchem” w istocie – uspokojenia ruchu w zespołach ulic środowiskowych. Całokształt

Tabela 2

Poprawa wydajności sieci drogowej Poznania według wyodrębnionych kategorii przedsięwzięć (wg [11])			
Nr kategorii	Kategoria działań na sieci rzeczywistej	Wzrost średniej prędkości w optymalizowanym stanie w stosunku do stanu sieci rzeczywistej (%)	
		Projekt najłagodniejszy	Projekt najlepszy
1	2	3	4
1	Nowe elementy w obrysie ramowym	6,4	14,7
2	Zarządzanie ruchem*	7,8	11,5
3	Modernizacja elementów ramowych	2,8	11,0
4	Nowe ulice radialne	0,9	6,9
5	Zespół kilkunastu drobnych modernizacji**	3,2	
6	Modernizacja ulic radialnych	0,1	3,7
7	Wielkie obiekty punktowe***	0,1	1,8

* eliminowanie ruchu tranzytowego, ciężarowego, uspakajanie ruchu, ** jeden projekt, *** pojedyncze węzły, wiadukty na przejazdach kolejowych itp.

wyników poznańskich eksperymentów jest całkowicie zbieżny z tezami Raportu Buchanana dotyczącymi atrybutów architektury sieci. Większość wyników wpisuje się w ciąg tez I do VII wypunktowanych we wstępie.

Nurty teoretyczne w architekturze sieci

Zadanie optymalne

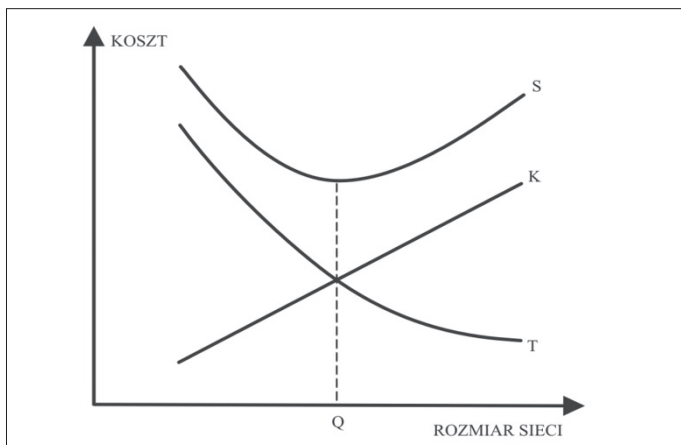
Pojęcie „optymalizacja sieci transportowych” stosowane jest w wielu mało nas interesujących, nieraz odrębnych kontekstach. P. Steenbrink (1974 [5] str. 48–52) z pola potencjalnych zainteresowań różnych teorii optymalizacji sieci wyodrębnia klasę zadań z funkcją celu maksymalizacji różnicy korzyści społecznych i normatywnych kosztów ruchu w warunkach ograniczającego rozwiązanie rozkładu opisowego.

Aspekt rozmiaru sieci ujmuje też ideogram na rysunku 1 (P. O’Sullivan i in., 1979 [9]). Określa ona optymalny rozmiar sieci (ang. *dimension*) w punkcie przecięcia rosnącej funkcji kosztu jej budowy i utrzymania (K) z malejącą funkcją kosztu transportu (T). Jeżeli uznać tę logikę za właściwą oraz przyjąć tezę, że w gęstych i zatłoczonych sieciach:

- skrzyżowania czteroramienne są optymalne (tym bardziej w sieci β),
- wpływ kongestii i kosztów środowiska zawiera się w krzywej kosztów ruchu (T),
- rozmiar sieci związany jest z jej gęstością w określonym obszarze,

to sens rozmiaru sieci pozostałby zgodny z badanym optimum funkcji $S = K + T$ w punkcie $Q = \rho$ sieci buchanańskiej. Koszt transportu w relacji do sieci pozostaje nie tylko pod wpływem jej rozmiaru, ale także więźby podróży. Więżba podróży jest odwzorowaniem struktury przestrzeni, budującej potencjały produkcji ruchu oraz kosztu ruchu w sieci kształtującej strukturę tej więźby. Problem punktu optymalnego w podobnym ujęciu stosował wcześniej W.R. Blunden z wykorzystaniem programowania liniowego i prostego modelu grawitacyjnego (1971 [12]).

Podjmując problem optymalizacji sieci, Steenbrink, ze względu na zmienne instrumentalne, rozróżnia dwie klasy zadań – kształtowania sieci (architektura) oraz za-



Rys. 1. Optimum w funkcji kosztów sieci i kosztów ruchu w zależności od rozmiaru sieci [9]

rządzenia w niej ruchem (wydajność). W podmiocie monografii [5] dla pierwszej klasy zadań opisuje stosowane w procesie optymalizacji sieci transportowych metody programowania matematycznego, algorytmy kombinatoryczne i techniki heurystyczne (s. 60–94). Większość tych metod charakteryzują wielorakie ograniczenia rozwiązań, sprowadzających stosowanie tych metod do sieci niewielkich lub monocentrycznych, często do minimalizacji gęstości sieci poprzez drzewa połączeń lub, w najlepszym wypadku, sprowadzających zadanie do wyboru najbardziej obiecujących projektów⁶. Na tym tle drugą część monografii poświęca metodzie wyznaczania kształtu i rozmiarów dużych sieci metodą SALMOF – iteracyjnego przydzielania potoków ruchu do sieci według najmniejszej funkcji marginalnej celu. Pominiemy opis tej metody, mając na uwadze głównie tę, ile okoliczność, że jej efektywność testowana jest zadaniem wyboru najbardziej obiecujących projektów. Takie proste w istocie podejście zastosowano w badaniach [10, 11] w procesie optymalizacji sieci Poznania prowadzących do wyników i wniosków zaprezentowanych w rozdziale 2.2.

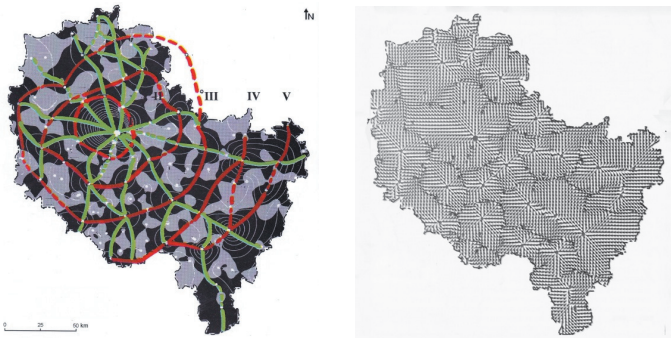
Odmienny i interesujący pogląd na zadanie optymalizacji sieci transportowej na gruncie geografii prezentuje W. Ratajczak (1999, [8] s. 19–21). W stosunku do architektury sieci rzeczywistych (ich morfologii) i jej geograficzno-historycznych uwarunkowań (morfogenezy) rozróżnia podejście poznawcze i praktyczne. W stosunku do pierwszego wyróżnia modelowanie ekonomiczne (oparte na kosztach) i geograficzne (ukierunkowane na morfogenezę) od modelowania operacyjnego i technicznego, stosowanego w podejściu praktycznym, ukierunkowanym na optymalizację sieci.

Teoria pola potencjału a morfologia sieci

Najbardziej płodny nurt badań teoretycznych nad optymalnym kształtem sieci odnajdujemy na gruncie nauk geograficznych i geografii ekonomicznej. Opis rozwoju teorii optymalnych regionalnych sieci osadniczych, od Christallera, przez Loscha, Wasiatyńskiego, Blundena, Wilsona, Zipsera i innych odnajdujemy w Aneksach I i II (W. Ratajczak, [8] s. 167–240). W pracy Ratajczaka potwierdza się interesujący nas ślad izomorfizmu sieci miejskiej (por. $\rho^{moto} \rightarrow \rho^{eko}$), w regionalnej sieci transportowej jednostek osadniczych Wielkopolski. Autor opisuje zastosowany model probabilistyczny rekonstrukcji sieci transportowych (drogowej i kolejowej), respektując w badaniu zarówno aspekt poznawczy morfologii sieci, jak aspekt jej optymalności. W wyniku badań modelu sieci zarówno dróg samochodowych, jak i kolejowych uzyskuje „ukrytą” strukturę optymalnych powiązań przestrzennych niewiele się różniącą od rzeczywistej (s. 74–77). W istocie a’poryczne założenie izomorficznego kształtu sieci pozwala mu potwierdzić ujęcie formalne jej przyczynowej struktury opisowej.

⁶ Podobne wnioski dotyczą zastosowań algorytmów genetycznych [13, 14]. Rezultaty podobnego typu zastosowań prześledzimy dalej w interesujących nas badaniach MFD [9].

W ujawnianiu ukrytych struktur W. Ratajczak posłużył się analizą rozkładu gradientów pól potencjału w sieci osadniczej. Pole potencjału (tu: grawitacyjnego) zostało zdefiniowane jako skalarna miara prawdopodobieństwa dostępności (tu: rozumianej jako miara entropii struktury macierzy podróży ograniczonej potencjałami produkcji i atrakcji ruchu). Zbieżności i rozbieżności pól jako pochodnej funkcji potencjału dla danego kierunku pozwalają wyznaczyć ukryte własności pola na podstawie gradientu zbieżności (konwergencji – o niskiej wartości gradientu) lub rozbieżności (dywergencji – o wysokiej wartości gradientu)⁷. Na styku tych pól „ujawnione” zostaje 12 dróg radialnych wnioskujących do Poznania i pięć okólnych obrysów ramowych (pierścieni) o wysoce regularnym rozstępie (średnio około 25 km), poczynając od pierwszego, obiegającego Poznań w odległości 10 do 30 km od centrum. Ta sieć (rys. 2) okazuje się uderzająco zgodna z morfologią (tu: architekturą) sieci rzeczywistych, także w jej strukturze hierarchicznej (s. 77, 164–165).



Rys. 2. Układ dróg w sieci osadniczej Wielkopolski ukształtowany na podstawie gradientów pól potencjału konwergencji i dywergencji [8]

Ponownie powołując się na zasadę izomorfizmu (Wasułyńskiego związek optymalności z morfologią – por. rozdz. 2.1.), podkreślmy, że to układ pól dywergencji i konwergencji determinuje układ radialno–pierścieniowy badanej sieci transportowej. Odpowiada to w znacznym stopniu tendencji przechodzenia z formuły opisanej spłaszczonej regularności buchanańskiej w przestrzeni zurbanizowanej do sieci optymalizowanych z punktu widzenia przestrzennego rozmieszczenia potencjałów generowanych w sieciach osadniczych.

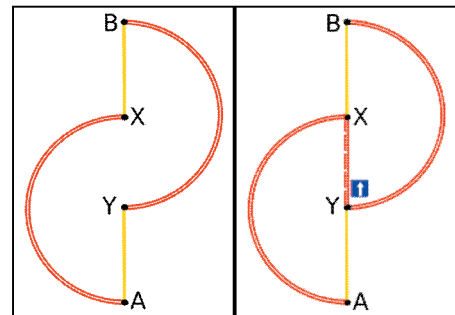
Pomiędzy skalą dość regularnej acz znacznie rozgęszczonej sieci w układach osadniczych a skalą „historycznie” spłaszczonego i zatłaczanego obszaru drugiego obrysów ramowego (praktycznie tuż po jego zewnętrznej stronie) mieści się optimum sieci buchanańskiej. W istocie Raport [1] odnosi idee rusztu optymalnego do planowej, nowej zabudowy terenów miasta. Warto podkreślić, że morfologicznie ukształtowana sieć regionalna z zasady nie jest siecią zatłaczaną, co najwyżej zatłaczaną lokalnie. Występujący w niej czynnik kongestii motoryzacyjnej relatywnie słabiej determinuje wybór między drogą szybszą a krótszą, zatem

problem optymalizacji takich sieci sprowadza się do ich struktury hierarchicznej i wyprowadzenia ruchu tranzytowego na obwodnice jednostek osadniczych.

Paradoks Braessa i teoria gier

Paradoks Braessa wyznacza jeden z najciekawszych i ciągle podejmowanych nurtów badań w teorii optymalizacji sieci. W swej istocie odnosi się do sieci zatłaczanych oraz przegęszczonych. Wobec znacznej popularności paradoksu zarówno wśród badaczy, jak internetowych adoratorów uspokajania ruchu w licznych dostępnych źródłach, prześledzimy tylko najważniejsze kroki w postępach tego nurtu.

Dla bardzo prostej struktury sieci łączącej cztery punkty (por. rys. 3) w sieci Φ dodano jeden element o potencjalnej funkcji klasy β . D. Braess (1968 [15]) ujawnił na tym przykładzie znany paradoks, wskazujący na możliwość wzrostu kosztów ruchu (czasu przejazdu) mimo pozornie logicznego „poprawienia sieci” przez dodanie nowego połączenia. Braess wykonał badanie w oparciu o stochastyczny model rozkładu przestrzennego ruchu.



Rys. 3. Połączenia autostradowe między A i X oraz B i Y zostają uzupełnione przez połączenie Y z X. Połączenia między B i X oraz A i Y mają charakter lokalny (rysunek wg: pl.wikipedia.org/Wiki/paradoks_braessa)

Wyjaśnieniem paradoksu jest sytuacja wynikająca z aktywizacji „skrótów” dla ruchu z A do B wykorzystanych do ruchu na części tras dróg lokalnych (AY i BX). Na tych odcinkach, w wyniku przełożenia części ruchu, straty czasu rosną szybciej od zysku na czasie na odciężonych drogach sieci β przy zachowaniu zrównoważonych czasów przejazdu na trasach alternatywnych. Oparcie obliczenia Braessa na I zasadzie Wardropa (1952 [16]) nie ma tu znaczenia, jeżeli zważyć, że przy zastosowaniu II zasady nowy odcinek powinien zostać przez współpracujących, bądź altruistycznie nastawionych kierowców, pominięty (czyli pozostać zbędnym w klasie β).

W 1974 roku P.A. Steenbrink w cytowanej wyżej monografii ([5], s. 43) udowodnił, że zbieżność rozkładu opisowego z rozkładem normatywnym występować może przy niskich natężeniach ruchu w sieci (to jest, gdy natężenie ruchu nie ma wpływu na uogólniony koszt obsługi) lub mogłoby wystąpić teoretycznie wtedy, gdyby każdy uczestnik ruchu respektował w swych decyzjach koszty społeczne ruchu⁸. Nawiązując do

⁷ Ratajczak wyjaśnia – pola rozbieżności są jak obszary splywu wód, pola zbieżności – jak obszary retencji. Styki zbieżności pól wyznaczają pożądane połączenia komunikacyjne. Ich brak w sieci rzeczywistej określa „ukryte struktury powiązań” [8].

⁸ Różnice pomiędzy rozkładem opisowym a normatywnym były zauważane już przez Wardropa (1952), co uwzględniła różnica pomiędzy jego I i II zasadą rozkładu ruchu.

paradoksu Braessa, Steenbrink również otrzymuje rozwiązanie normatywne rozkładu ruchu, w którym dodane połączenie nie jest wykorzystane.

Problem wydajności sieci na przełomie lat 70. i 80. stał się modnym podmiotem zainteresowań na kilku uczelniach kalifornijskich, jako przyczynek do zastosowań teorii gier niekooperacyjnych z punktem równowagi Nasha. Ilustrowały one znany wśród zastosowań tej teorii syndrom „ceny anarchii” jako skutku braku współpracy w podejmowaniu decyzji niealtruistycznie nastawionych osobników (inaczej: niekooperujących „samolubnych genów”). Znaczącego kroku w kierunku rozwiązania tego zadania dokonał w 1988 roku matematyk J.E. Cohen [17], wspomagając algorytmy teorii gier teorią kolejek w badanej sieci.

W 2001 r. T. Roughgarden nawiązał do paradoksu Braessa w analizie interesującego nas problemu centralnego – to jest możliwość optymalizowania dużych grafów sieci Φ poprzez wyłączenia krawędzi zbędnych, czyli w uproszczeniu – dla procesu wyodrębnienia podsieci β z sieci Φ [18]. Wykazał, że rozwiązanie tego zadania poprzez stosowanie optymalnych dla tego celu algorytmów aproksymacyjnych jest niemożliwe dla zdefiniowania wydajności sieci. Rok później w pracy [19] Roughgarden wykazał niezależność wartości ceny anarchii od topologicznych cech prostych sieci. Wyznaczył stałą cenę anarchii dla przypadków niekooperacyjnych połączeń między dwoma punktami na poziomie $4/3$ – to jest 25% występujących kosztów, co faktycznie oznacza przewyższenie o 33% kosztów normatywnych przyjętych na poziomie 100%, czyli kosztów ruchu możliwych do uzyskania w rozkładzie w pełni kooperacyjnym.

W 2008 r. badacze koreańscy H. Youn i H. Jeong wraz z M.T. Gastnerem z Santa Fe [14] w oparciu o punkt równowagi Nasha opisali występowanie ceny anarchii niekooperujących użytkowników w badaniach symulacyjnych konkretnych i dużych sieci rzeczywistych. Dotyczyło to zatłaczanych i przegęszczonych sieci Bostonu i Cambridge oraz centrów Londynu i Nowego Jorku (Manhattan). W każdej z tych sieci wykazano odpowiednio 6, 7 i 12 odcinków sieci zbędnych na trasach pomiędzy wybranymi parami punktów. Ich wyeliminowanie wpływało na obniżenie kosztów ruchu (czasów przejazdu) w granicach od 24 do 30%.

Badanie [14] zawiera najszerzą dotąd skalę zastosowania teorii gier w analizie paradoksu Braessa, obejmując trzy znacznych rozmiarów sieci, powszechnie uznawane za silnie przegęszczone jeszcze w epoce przed wybuchem motoryzacji. Nie jest mimo to nadal jasne, jaki pozostałby kształt sieci w rozumieniu jej optymalności, gdyby rozpatrywano minimalizację ceny anarchii, uwzględniając wszystkie pary połączeń w odpowiednio skonstruowanej więźbie podróży⁹. Zachodzi kolejna wątpliwość – gracze w paradoksie Braessa w wyborze drogi kierują się jednakową strategią minimalizacji kosztu – w zasadzie kosztu czasu. Wybór drogi w rze-

czywistości jest zadaniem dualnym – o jej wyborze decyduje relacja pomiędzy wartością czasu a ceną energii. W przypadkach różnych strategii użytkowników dróg teoria gier w złożonych sieciach Φ jest na razie bardziej bezradna niż wykazał to Roughgarden.

Powyższe wątpliwości stały się przedmiotem badań dużej sieci kanadyjskiego miasta Winnipeg (Bagloe S.A. i in. 2013, [20]). W pierwszej fazie autorzy dla więźby podróży między 152 rejonami znajdowali pulę połączeń zbędnych w rozumieniu Braessa. W drugiej, wykorzystując w podejściu heurystycznym złożone algorytmy genetyczne, wyodrębniali z grafu sieci 62 odcinki, których wyłączenie z sieci skróciło średni czas przejazdu w sieci o 7 minut. Zachowano przy tym liczne połączenia „niezbędne z przyczyn funkcjonalnych”. Rząd tej oszczędności czasu na zwiększeniu wydajności sieci rozgęszczonej zdaje się mieścić w granicach dotychczasowych ocen (tj. 25 do 30% wg [7, 19]).

Empirycznie badana i teoretyczne objaśnienia paradoksu Braessa, szczególnie badania sieci w Winnipeg, potwierdzają zatem znaczne obniżenie wydajności sieci przegęszczonych, w każdym razie na tyle znaczne, by dać rację amatorom i zwolennikom uspokajania ruchu. Praktycznym tego wsparciem bywają cytowane często przykłady pozytywnego wpływu na warunki ruchu w sieci Φ rozwiązań sankcjonujących różne formy jego uspokojenia¹⁰.

Nurty teoretyczne w badaniu wydajności sieci

Pojemność a wydajność transportowa sieci

Najlepszą miarą przepustowości sieci wydaje się być maksymalna praca przewozowa w sieci (poj.km) możliwa do wykonania w jednostce czasu (godzinie)¹¹ [3]. Hipotezą wyjściową pozostaje idea wg rysunku 1, że występuje optimum globalne (maksimum) zależności pracy transportowej (poj.km) i czynnika kosztowego (np. czasu przejazdu, prędkości lub pracy transportowej – poj.h) zależne od kształtu i rozmiarów (gęstości) sieci.

Prawdopodobnie pierwszą próbę ujęcia zagadnienia przepustowości sieci poczynił R.I. Smeed (1966 [21]), przyjmując jako miarę zadania liczbę pojazdów poruszających się w obszarze (X) związaną ze średnią prędkością ruchu (v) oraz miarą gęstości sieci ($f(\rho)$). Formuła Smeeda w następnych latach była rozwijana w kierunku uchwycenia związków zbliżonych do zależności podstawowego strumienia ruchu: prędkości (v), gęstości (k) i natężenia ruchu

¹⁰ Znane jest doświadczenie zamknięcia z okazji Dnia Ziemi 42nd street, usytuowanej w siatce ulic E-W Manhattanu, przecinających wyspę na połączeniu dwóch tuneli prowadzącej ruch do wyspy. Ku ogólnemu zaskoczeniu i zdziwieniu opinii publicznej przyczyniło się to do znacznego uspokojenia w tym dniu ruchu w otoczeniu. Wywołało to liczne komentarze prasowe, w tym między innymi J.E. Cohena, odwołującego się do paradoksu Braessa („The New York Times”, 1990, nr 12.25). Do przykładów klasycznych (licznie cytowanych) należą skutki zbudowanej (w ich następstwie „rozebranej”) Königsstrasse w Stuttgarcie czy przebudowa wielopoziomowej arterii Cheonggyecheon na bulwar spacerowy w Seulu.

¹¹ Zgodnie z [3] sugeruje się ściśle rozróżnienie pomiędzy definicją pojemności transportowej sieci a pojemnością transportową obszaru. Wg [3] przyjmuje się, że na pojemność transportową obszaru składa się przepustowość wlotów do obszaru, przepustowość sieci w obszarze (czyli pojemność transportowa sieci) oraz pojemność parkingów. Dalej w pracy tej prezentowane są metody zrównoważenia tej struktury.

⁹ Przykładowo: w prostym przypadku zilustrowanym na ry s. 3 połączenie X z Y obsługując wyłącznie ruch w relacji między X i Y z pewnością zmniejszyłoby łączne koszty ruchu w sieci poprawiając warunki ruchu w sieci β , co łatwo można wykazać.

(q , niżej: x_{kl}). Ewolucję tego nurtu w skrócie opisuje praca [3]. W tejże pracy, opartej na badaniach ruchu w strefie płatności za wjazd do obszaru w Singapurze, uzyskano związek pomiędzy godzinowym natężeniem ruchu pojazdów na kordonie strefy (Q_{io}) a średnią prędkością w jej obszarze (v):

$$Q_{io} = 80,645v(44,9 - 12,0 \ln v)^{1,563} - 2121,8 \quad (1)$$

Estymowana zależność (1) generowała optimum w granicach średniej prędkości 9 km/h przy maksymalnej obserwowanej dla obszaru około 17 km/h i 84% wykorzystania wartości maksymalnego natężenia ruchu na wlotach i wylotach obszaru.

Odmienne bywa stosowana formuła alternatywna, taka, na którą składa się zależność pojemności transportowej sieci $\{kl\}$ od sumy przepustowości wlotów i wylotów poszczególnych odcinków sieci (kl), typu:

$$\max \sum_{kl} (x_{kl} d_{kl}) = \sum_{kl \in \beta} [(x^{\max})_{kl} d_{kl}] \quad (2)$$

gdzie:

- $(x^{\max})_{kl}$ – przepustowość odcinka kl [poj/h],
- d_{kl} – długość odcinka sieci kl [km],
- kl – notacja łuków w grafie sieci β o węzłach k, l ,
- k, l – notacja węzłów zbiorem liczb naturalnych: $k, l \in \mathbb{N} \{1, 2, \dots\}$.

Zauważmy, że sens zadania optymalnego (2) ogranicza się do sieci β . Jego formuła ogólna (również cytowana w [3]¹²) nie zawiera dwóch oczekiwanych właściwości:

1. Przepustowość odcinków jest zależna od zmiennej struktury ruchu w węzłach (k, l) i, ujmując problem w kategoriach optymalności, winna być w tej addytywnej strukturze cechą typu: $x_{kl} \rightarrow (x^{\max})_{kl}$.
2. Zwiększanie przepustowości węzła (l) dla odcinka (kl), ma wpływ na wzrost pojemności sieci tylko w pewnych ograniczeniach prowadzących do stanu przepustowości zrównoważonej, nie jest to więc funkcja bezwarunkowo addytywnych, maksymalnych prac transportowych w zbiorze niezależnych odcinków i węzłów.

Przy powyższych właściwościach zadanie zapisane w formule (2), w rozumieniu Steenbrinka, jest zadaniem optymalizacji wydajności. Potrzebna jest ku temu formuła ograniczenia rozwiązań, w której zrównoważone zostaną przepustowości skrzyżowań w układzie sieciowym stosowanie do zmieniającego się opisowego rozkładu ruchu. Dość szczegółowo opisano to zagadnienie w pracy [6], wiążąc problem efektywności dynamicznego sterowania ruchem z więźbą podróży. Związać je można z (2) poprzez tożsamość prac transportowych:

$$\max \sum_{kl} (x_{kl} d_{kl}) = \sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}^{\beta}) \quad (3)$$

gdzie: więźbę podróży międzyobszarowych $\{x_{ij}\}$ opisuje macierz kosztu (tu: odległości $\{d_{ij}\}$) w czasie (Δt), a (i, j) jest zbiorem relacji między obszarami (i) i (j) opisanych na zbiorze liczb naturalnych ($i, j \in \mathbb{N} \{1, 2, \dots\}$), natomiast w (4.3) zachodzi warunek:

$$\sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}^{\beta}) = \sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}) - \sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}^*) \quad (4)$$

oznaczający wyodrębnienie pracy transportowej w więźbie $\{x_{ij}\}$ wykonanej w sieci β na odcinkach (d_{ij}^{β}) poprzez wyłączenie pracy pozostałych odcinków sieci (d_{ij}^*). Rozwiązanie zadań (2) oraz (3) winno zatem spełniać warunek równowagi:

$$\sum_{kl \in \beta} (x_{kl}^{\max} d_{kl}) = \max \left[\sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}) - \sum_{ij} (x_{ij} d_{ij}^*) \right] \quad (5)$$

z którego wynika związek pomiędzy dynamicznym stanem obciążenia sieci β i więźbą podróży a cytowanymi właściwościami formuły (2). Wartość maksymalna pracy transportowej współzależy zatem od atrybutów:

- efektywności adaptacyjnego sterowania obszarowego (dynamicznego zarządzania przepustowością skrzyżowań),
- optymalnych w tym systemie warunków przetrzymania nadwyżek popytu poza siecią β , co stabilizuje dopływ ruchu w granicach $x_{kl} \rightarrow (x^{\max})_{kl}$ w tej sieci (co zarazem optymalizuje gęstość sieci przez długość odcinka z kontrolą dopływów na jego przebiegu).

Zauważmy ponadto związek efektywności sterowania offsetami z wyrównanymi odległościami między skrzyżowaniami (lub utrzymaniem ich w pewnym module odległości) oraz przetrzymaniem na odcinkach akumulacji nadwyżek popytu [4,6,23]. Praca transportowa w tych odcinkach jest minimalizowana poprzez minimalizowane natężenia ruchu i maksymalną jego gęstość na długości kolejek. Rozległość sterowania obszarowego umożliwia rozproszenie kolejek poza obszarem sterowania w sieci β . Dodatkowo warunki środowiska miejskiego i uprzywilejowania transportu publicznego każą zwrócić uwagę na efektywność systemu sterowania zintegrowanego z planowym kształtowaniem powierzchni akumulacji. Lokalizacja powierzchni akumulacji w odcinkach sieci ulic układu podstawowego jest wskazana wtedy, gdy odcinki te mają niewielki wpływ na pojemność transportową sieci [4]. Dopelnieniem byłoby minimalizowanie nadwyżek popytu poprzez jakość alternatywnych środków transportu (w tym nadanie im stosownych priorytetów) oraz zrównoważenie pojemności parkingowej obszarów środowiska miejskiego w potencjalach produkcji i atrakcji ruchu (wśród cytowanych: [1,3,23]).

Fundamentalny wykres makroskopowy (MFD)

Stosując pojęcie pojemności transportowej jako maksymalnej pracy transportowej w sieci β , badano związek pracy transportowej ze średnią prędkością sieci w warunkach eksperymentu [4,6,10]. Zależność ta, podobnie jak w przypadku skomentowanego wyżej równania Smeeda,

¹² Formuła autorstwa Dziubak M., Suchorzewski W. (1961, wg [3]).

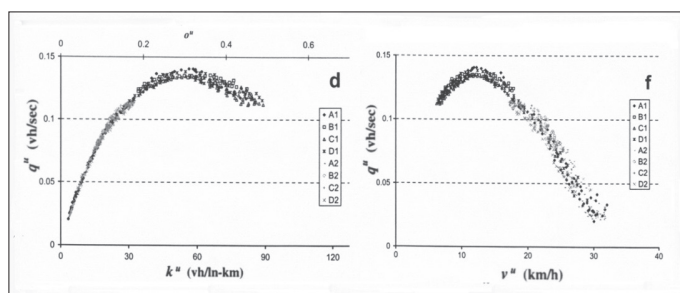
nie zawiera optimum¹³, co związane z potrzebą standaryzacji pojęcia pojemności transportowej sieci normą średniej prędkości (v).

Badania teoretyczne tego problemu zawiązały się wokół fundamentalnego wykresu makroskopowego – MFD)¹⁴, ostatnio zaś zaproponowanej formuły fundamentalnego diagramu sieci (NFD [22]). W istocie początek nurtu badań nad MFD odnajdujemy w cytowanych eksperymentach badawczych z Singapuru (Olszewski P. i in., 1995 [13]).

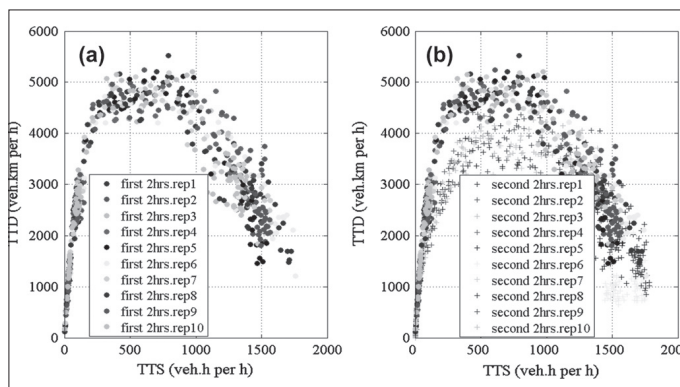
Oba pojęcia (MFD i NFD) odwołują się do podstawowego równania strumienia ruchu opartego na zależnościach prędkości (v), gęstości (k) i natężenia ruchu (q , wyżej: $x_{k,v}$, por. [24]) przełożonego na sieci makroskopowe, przy czym NFD dodatkowo uwzględnia związek tych parametrów z więzłą podróży (np. [23], formułą (4.5), a także interpretacją cytowanego rysunku 1 w pracy [5]).

Badania MFD prowadzone są najczęściej w sieciach rzeczywistych metodami meta heurystycznymi z wykorzystaniem wyrafinowanych algorytmów operacyjnych. Często prowadzone w oparciu o cechy zajętości w czujnikach zlokalizowanych na połączeniach sieci, wykazując wyraźną analogię z zależnościami równania podstawowego, przy czym w konstruowaniu MFD zasadniczy problem fundamentalny sprowadza się do uchwycenia wpływu histerezy w procesie symulacji zatłoczonej sieci ([23,25] – por. również rysunek 5 wg [22]). W 2008 roku N. Geroliminis z C.F. Daganzo [23], dla badanej, stosunkowo rozległej sieci Jokohamy w gęsto zabudowanym obszarze o powierzchni 10 km², uzyskują dyspersję odchyleń związku gęstości i prędkości w MFD w granicach błędu obliczeniowo – pomiarowego (rys. 4). W 2011 roku N. Geroliminis i J. Sun wykazują dla dwóch badanych subsieci duocentrycznej aglomeracji Mineapolis – St. Paul związek dyspersji zależności MFD z rozmieszczeniem cech gęstości w sieci oraz z wpływem kształtu sieci [25]. W pracy [23] podkreśla się znaczący związek zależności określonych w MFD z praktyczną kontrolą dopływów do sieci zatłaczanych poprzez opłaty za wjazd do obszary (Londyn, Singapur i Sztokholm), bramkowanie (Beijing, Mexico City) oraz odpowiednie parametry systemu sterowania w sieci (Zurich).

Autorzy koncepcji NFD [22] określają stosowanie metaheurystycznych algorytmów operacyjnych jako zbyt trudne dla uwzględnienia środowiska czasu realnego w warunkach niestabilności więzby. W nawiązaniu do idei NFD stosują symulacyjny program AIMSUN dla optymalizacji stanu ruchu w sieci Chani (Kreta) poprzez kontrolę dopływów do sieci priorytetowej (bramkowania). Badając kształt zależności pomiędzy pracą przewozową (poj.km) a czasową (poj.h), uchwycili wyraźny związek dyspersji tej zależności z czasem trwania symulacji (rys. 5). Z interesującego nas punktu widzenia zasadnicze znaczenie ma jednak wyraźne kształtowanie się przestrzeni optymalnej tej zależności w sieci priorytetowej, to jest sieci definiowanej przez nas jako buchananowska sieć β .



Rys. 4. Osiągnięte minimum dyspersji zależności prędkości (v) i natężenia (k) w sieci drogowej Yokohamy na podstawie przetworzenia danych ze zbiorów czujników [23].



Rys. 5. Kształt i dyspersja współzależności czasowej i dystansowej pracy transportowej w Chani w 10 seriach badań w pierwszym (2h – po prawej stronie) i drugim interwale (2h – po lewej stronie) w czterogodzinnej symulacji procesu [22].

Badania [13,22,23,25] potwierdzają występowanie optimum pojemności sieci, jej zależność od kształtu sieci, związek tej pojemności z jakością sterowania ruchem oraz znaczenie powierzchni akumulacji w jej wykorzystaniu. Potwierdza to zarazem trafność tezy VI (we wstępie rozdz. 1.).

Podsumowanie

1. Analiza różnych nurtów teorii wskazuje na trafność tezy Raportu Buchanana dotyczących optymalnej sieci transportowej w środowisku miejskim. W szczególności znajdujemy tego potwierdzenie w badaniach nad paradoksem Braessa w sieciach przegęszczonych. W podsumowaniu tego nurtu badań możemy stwierdzić, że przegęszczenie sieci zatłoczonej wg opisowego rozkładu ruchu niekooperujących użytkowników prowadzi do zmniejszenia wydajności sieci o rząd 24 do 33%.
2. Zarówno cytowane badania Rughgardena, jak analizy Steenbrinka i zarysowane krytyczne uwagi własne w stosunku do różnych pól teorii optymalizacji sieci transportowych wskazują wyraźnie, że na drodze opanowanych dotąd metod operacyjnych, meta heurystyk i rozwiniętych algorytmów operacyjnych dowodzenia optymalności sieci buchananowskiej można dochodzić wyłącznie na bazie analiz sieci rzeczywistych. Rozwinięcie w ostatnich latach badań nad fundamentalnym wykresem ruchu w sieci makroskopowej (MFD, NFD) dowodzi, że istnieje optimum pracy transportowej w sieci zależne od jej kształtu.
3. Zwraca się uwagę, że rozwój podejścia MFD, a zwłaszcza NFD, w badaniach eksperymentalnych ma zasadnicze znaczenie dla zintegrowania dwóch podstawowych

¹³ por. rys. 2 w [11], str. 147 i rys. 1 w [6] – str. 394.

¹⁴ Jedyne napotkane polskie określenie „Macroscopic Fundamental Diagram” dotyczy opisu modelu makroskopowego „fundamentalnego wykresu ruchu” [24].

teorii inżynierii ruchu – teorii strumienia ruchu i modelowania ruchu.

4. Analiza sieci transportowych w dużych miastach europejskich wykazuje, że architektura tych sieci w obszarach zatłaczanych jest mocno zróżnicowana, lecz zachowuje wyraźne tendencje optymalności kształtu i rozmiaru zbieżnych z tezami raportu. Z potwierdzenia zasady izomorfizmu sieci w procesie ich kształtowania wynika, że zasadniczym problemem pozostaje wpływ niekooperacyjnych zachowań na cenę anarchii zachowań użytkowników samochodu.
5. Zagrożeniem środowiska miast europejskich nie jest więc niewystarczający potencjał sieci drogowych, lecz brak regulacji dostępu do stref chronionego środowiska miejskiego (opłaty, fizyczna kontrola dopływów do sieci, kontrola tranzytowych przepływów ulicami życia miejskiego, strategie sterowania ruchem).
6. Wyodrębnienie sieci buchananowskiej jako segmentu całej sieci i poddanie jej specyficznym kryteriom przepustowości w praktyce zarządzania ruchem ma zasadnicze znaczenie dla zwiększenia wydajności sieci. W dynamicznym zarządzaniu ruchem niezbędne jest wyróżnienie w sieci dróg i ulic powierzchni przeznaczonych na rozproszenie akumulacji nadwyżek popytu. Stanowi to nowy instrument w respektowaniu hierarchicznej zasady sieci, służący ochronie środowiska miejskiego, a zarazem ochronie sieci buchananowskiej przed zatłoczeniem.
7. Miejmy na uwadze to, że mapa wyobraźni (lub nawigacji) użytkownika może się różnić znacznie od mapy przewodnika, który zarządza ruchem. Użytkownicy w oparciu o takie mapy minimalizują własne koszty (a więc jej rezultatem jest opisowa struktura sieci), podczas gdy przewodnik minimalizując koszty społeczne, winien dążyć do kształtowania rozkładu normatywnego. Kreowanie przepustowości skrzyżowań w podatnej na zatłoczenie sieci buchananowskiej w oparciu o kryterium pomierzonego natężenia ruchu jest widomą oznaką braku wyobraźni przewodnika.
8. Pojęcie sieci buchananowskiej jest niewątpliwie abstraktem. Gdyby nie zakorzenione w drogownictwie rozróżnienie techniczne ulicy od drogi, znacznie prościej, a nawet bardziej logicznie, byłoby określać elementy sieci β pojęciem drogi (np. miejskiej drogi samochodowej), przypisując pozostałym segmentom sieci Φ pojęcie ulicy. Miałyby to istotne znaczenie kulturowe w tym sensie, że silnie zakorzeniona w rodzimej praktyce administracji drogowej misja „usprawniania ruchu samochodowego” nie kłóciłaby się ze znacznie silniej zakorzenioną w naszej tradycji, kulturze i sposobie bycia misją ulicy w strukturze miasta. W polskich miastach konflikt na powyższym tle znacząco narasta stawiając administrację drogową w niekorzystnym oglądzie opinii publicznej.
9. Zarówno praktyka, jak i teoria w całej rozciągłości potwierdzają związek sześciu tez sformułowanych w rozdziale 1. Są to tezy w swojej istocie oparte na idei Raportu Buchanana (teza I), wsparte postępowaniem w teorii i doświadczeniem eksperymentów badawczych.

Literatura

1. Bagloee S.A., Ceder A., Tawana M., Bozic C., *A Heuristic Methodology to Tackle Braess's Paradox Detecting Problem Tailored for Real Road Networks*, Transportmetrica A: Transport Science, 2013, (w druku).
2. Blunden W. R., *The land use transport system*, Oxford, Pergamon Press 1971.
3. Braess D., *Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung*, „Unternehmensforschung” 12/1968.
4. Buchanan C., *Traffic in towns*, for Her Majesty's Stationary Office by Waterloo & Sons, London 1963.
5. Cohen J.E., *The Counterintuitive in Conflict and Cooperative*, American Scientist, 11/12, 1988.
6. Cudziło J., Krych A., Thiem J., *Network optimization using simulating Saturn procedure*: Conf. Modelling and Management in Transportation, vol.2, EURO Working Group of Transportation, Poznań–Kraków 1999.
7. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ, Warszawa 2008.
8. Gawlikowski A., *Ulica w strukturze miasta*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992.
9. Gerolimimis N., Daganzo C. F., *Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings*, Transportation Research, Part B 42/2008.
10. Gerolimimis N., Sun J., *Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic*, Transportation Research Part B 45/2011.
11. Keyvan-Ekbatani M., Kouvelas A., Papamichail J., Papageorgiou M., *Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating*. Transportation Research Part B 46/2012.
12. Krych A., *Dynamiczne zarządzanie ruchem w sieci zatłaczanej*, w: Kaczmarek, M., Krych A., *Skuteczne zmniejszanie zatłoczenia miast*, SITK RP, Poznań 2009.
13. Krych A., *Efektywność inwestycji drogowych w sieciach przesyconych*, w: *Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego – II Konferencja Naukowo-Techniczna SITK RP*, Poznań 1999.
14. Krych A., *Optymalizacja sieci drogowej zatłoczonej*, w: *Wspomaganie decyzji w projektowaniu i zarządzaniu transportem – VI Konferencja Naukowo-Techniczna. SITK RP*, Poznań 2007.
15. Olszewski P., Fan H.S.L., Tan, Y-W., *Area-wide traffic speed-flow model for the Singapore CBD*, Transportation Research, Part A 29 (4)/1995.
16. Olszewski P., Suchorzewski W., *Samochód w śródmieściu*, WKiŁ, Warszawa 1983.
17. O'Sullivan P., Holtzclaw G.D., Barber G., *Transport Network Planning*, London, Croom Helm, 1979.
18. Ratajczak W., *Modelowanie sieci transportowych*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 1999.
19. Roughgarden, T., *Designing Networks for Selfish Users is Hard*. FOCS 2001.
20. Roughgarden, T., *The price of anarchy is independent of the network topology*, Proceedings of the 34th Symposium on Theory of Computing, 2002.
21. Smeed, R. I., *Road capacity of city centers*, Traffic Engineering of Control, vol 8 nr 7/1966.
22. Steenbrink P.A., *Optymalizacja sieci transportowych*, WKiŁ, Warszawa 1978.
23. Wardrop J.G., *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings, Institute of Civil Engineers, 1/1952.
24. Wasutyński Z., *Optymalizacja układów komunikacyjnych*, Ossolineum, Wrocław 1976.
25. Youn H., Gastner M.T., Jeong H., *Price of Anarchy in Transportation Networks: Efficiency and Optimality Control*, Physical Review Letters. 101, vol.12, 128701, 2008.