

PRZYCZYNEK DO WARTOŚCIOWANIA ATRYBUTÓW PODRÓŻY W MIEJSKIM TRANSPORCIE ZBIOROWYM

Andrzej Rudnicki

prof. dr hab. inż., Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2178, e-mail: ar@transys.wil.pk.edu.pl

Streszczenie. *W artykule podjęto próbę dokonano identyfikacji i klasyfikacji atrybutów dotyczących pojedynczej podróży osób w transporcie miejskim. Klasyfikacja obejmuje grupy atrybutów dotyczących aspektów przestrzeni i czasu oraz uwarunkowań odbywanej podróży, jej struktury oraz warunków w jakich dokonuje się podróż. Kolejne grupy atrybutów dotyczą aspektów ekonomicznych i środowiskowych oraz wynikających z charakterystyki podróżnego. Zestawienie kończą atrybuty o charakterze syntetyzującym wcześniej podane. Kilka z atrybutów jest specyficzna dla transportu zbiorowego. Wskazano na atrybuty wykorzystywane w modelach do prognozowania ruchu. Wartościowanie atrybutów podróży dotyczyło trzech przypadków: a) losowej zmienności czasu podróży dla podróży powtarzalnych, b) komfortu podróży w odniesieniu do warunków jazdy, c) efektów obniżenia uciążliwości podróży, w tym zmniejszania czasu składników podróży. Wartości wyrażano w ekwiwalentnych jednostkach czasu lub w utylach, w nawiązaniu do pojęć teorii użyteczności. W oparciu o zwartościowane komponenty podróży można skonstruować uogólniony koszt podróży, który precyzyjniej ujmuje w modelach wpływ wielu czynników na rzeczywiste zachowania komunikacyjne, w szczególności w stadium podziału zadań przewozowych.*

Słowa kluczowe: *atributy podróży, miejski transport zbiorowy, identyfikacja i klasyfikacja, wartościowanie atrybutów*

1. Identyfikacja i klasyfikacja atrybutów podróży

Zgodnie ze słownikiem języka polskiego PWN¹ atrybut to:

1. «cecha jakiejś rzeczy, osoby lub zjawiska wyróżniająca je spośród innych»,
2. «przedmiot o charakterze symbolicznym, ściśle związany z życiem lub działalnością jakiejś postaci»,
3. *filoz.* «podstawowa cecha przedmiotu, bez której nie mógłby on istnieć lub byłby nie do pomyślenia».

W odniesieniu do pojęcia podróży właściwe jest znaczenie pierwsze, a nawet dodatkowo - trzecie, gdyż warunkiem koniecznym pełnego określenia podróży jest dokonanie jej opisu przez zbiór atrybutów identyfikujących podróż.

Atrybuty podróży, w szczególności w transporcie zbiorowym pojawiają się w procedurach związanych z modelowaniem zachowań komunikacyjnych dla potrzeb sporządzania prognoz ruchu i są dla tych celów niezbędne. Ponadto wynikają

1 <http://netsprint.sjp.pwn.pl/sloownik/2551137/atribut>

z kryteriów oceny oferty przewozowej oraz funkcjonowania komunikacji miejskiej². W znacznym zakresie atrybuty pojedynczej podróży pokrywają się z atrybutami (kryteriami oceny) systemu transportowego, jednak nie są z nimi tożsame. Z natury rzeczy atrybuty podróży mają zarówno charakter ilościowy jak i jakościowy.

Na podstawie przeglądu ankiet do wywiadów domowych przeprowadzanych w ramach tzw. kompleksowych badań ruchu i przeglądu literatury, w tym instrukcji dotyczącej modelowania podróży, a zwłaszcza ocen i wskaźników jakości transportu zbiorowego (np. [1, 2, 5, 9, 19, 11, 12, 13]) podjęto próbę zidentyfikowania i uporządkowania atrybutów podróży w transporcie miejskim.

A1. Atrybuty związane z przestrzenią:

A1.1. Miejsce źródła i celu podróży opisane danymi adresowymi (ulica, nr domu) lub współrzędnymi geograficznymi, geodezyjnymi, GPS, GIS, Google lub innymi. W przypadku bardzo odległych celów podróży, poprzestaje się na określeniu nazwy miejscowości, a nawet tylko kraju.

A1.2. Lokalizacja źródła i celu podróży w odniesieniu do obszaru analizy:

- Podróż wewnętrzna: źródło i cel znajdują się w obszarze.
- Podróż zewnętrzna: źródło lub cel znajdują się poza obszarem, w tym:
 - podróż źródłowa: źródło znajduje się w obszarze, natomiast cel - poza,
 - podróż docelowa: źródło znajduje się poza obszarem, natomiast źródło - poza,
 - podróż tranzytowa: źródło i cel znajduje się poza obszarem, lecz podróż realizowana jest przez obszar.

A1.3. Trasa podróży opisana jest sekwencją odcinków i węzłów sieci transportowej, po której realizowane są poszczególne przemieszczenia formujące podróż, w tym numer wykorzystanej linii komunikacji zbiorowej.

A1.4. Miejsce przesiadki określone połączeniami węzłów ramach multimodalnej sieci transportowej, w której dokonywana jest zmiana środka lokomocji w podróży.

A1.5. Długość podróży jest konwencją określenia sekwencji powyższych odcinków; ponadto może być uszczegółowiona w podziale na długości przemieszczeń realizowanych poszczególnymi środkami lokomocji.

A2. Atrybuty związane z czasem:

A2.1. Czas rozpoczęcia i zakończenia podróży (jako chwila w zapisie zegarowym).

A2.2. Usytuowanie momentów rozpoczęcia i zakończenia podróży w stosunku do charakterystycznych okresów czasu. Okresy te mogą odnosić się do:

- pory dnia lub roku (podróże dzienne, podróże nocne, podróże wakacyjne),
- dnia tygodnia (podróże w dni robocze podróże weekendowe),
- okresów nasilenia ruchu (np. podróże w szczycie porannym, podróże w szczycie popołudniowym).

² termin „komunikacja miejska” będzie stosowany jako zwyczajowy zamiennik terminu „miejski transport zbiorowy”

A2.3. Czas trwania podróży będący konwencją zarejestrowania powyższych czasów; ponadto może być uszczegółowiony w podziale na czas trwania poszczególnych składników podróży.

A2.4. Stabilność (niezmiennosc) czasu podróży. W rzeczywistości występuje rozrzut czasu podróży. Atrybut ten odnosi się do podróży powtarzalnych.

A2.5. Stopień pilności (terminowości) podróży:

- Podróż ściśle terminowa, do której można zaliczyć: podróż do pracy przy sztywnych godzinach rozpoczynania pracy, dojazd do dworców celem odbycia podróży zamiejskiej, podróż na zebrania, wykłady, imprezy oraz w innych celach o ustalonym czasie rozpoczynania danej aktywności.
- Podróż nie ściśle terminowa, do której można zaliczyć: podróż do pracy przy ruchomych godzinach rozpoczynania pracy, podróże powrotne do domu, podróże na zakupy oraz w innych celach nie wymagających osiągnięcia tych celów w ściśle ustalonych momentach czasu.

A2.6. Punktualność podróży (stopień zgodności z rozkładem jazdy) na początku i końcu podróży.

A3. Atrybuty wynikające z uwarunkowań wykonania podróży:

A3.1. Motywacja podróży określona jest parą rodzajów aktywności realizowanych u źródła oraz u celu podróży (zmienna lingwistyczna). W procedurach modelowania podróży zwykle ustala się następujące pary o symetrycznych motywacjach:

- dom – praca; praca – dom,
- dom – nauka; nauka – dom,
- dom - inne cele; inne cele – dom (występuje wielka różnorodność celów innych niż dom i praca: np. zakupy, rekreacja, odwiedziny, urząd, obiekt kultury, obiekt gastronomiczny, obiekt kultu religijnego, itp.),
- nie związane z domem (są to podróże między różnymi aktywnościami, z których żadna nie jest domem).

A3.2. Stopień obowiązkowości podjęcia określonej aktywności u celu podróży:

- podróż obligatoryjna,
- podróż fakultatywna.

A4. Atrybuty wynikające ze struktury podróży:

A4.1. Składniki podróży - sekwencja kolejnych przemieszczeń, która obejmuje:

- w podróżach samochodem osobowym: dojdzie do miejsca postoju samochodu, przejazd, jazda w poszukiwaniu miejsca do parkowania, odejście od miejsca postoju samochodu do celu podróży, przesiadka z samochodu na środek komunikacji zbiorowej lub rower lub odwrotnie,
- w podróżach środkami komunikacji zbiorowej: dojdzie do stacji lub przystanku, oczekiwanie na pojazd, przejazd, przesiadka, odejście od przystanku.

A4.2. Liczba przemieszczeń tworzących daną podróż.

A4.3. Liczba rodzajów użytych środków komunikacji zbiorowej w podróży.

W zależności od środka lokomocji występującego w dominującym przemieszczeniu, rozróżnia się następujące rodzaje podróży:

- podróż piesza,
- podróż rowerowa,
- podróż motocyklowa,
- podróż samochodem,
- podróż komunikacją zbiorową (autobusem, tramwajem, metrem, koleją, itp.,
- podróż multimodalna (np. w systemie Park and Ride).

W procedurach prognozowania pierwsze dwie rodzaje podróży określa się mianem podróży niezmotoryzowanych, pozostałe cztery – podróżami zmotoryzowanymi. Podróże zmotoryzowane dzieli się na „komunikację indywidualną” (samochód, motocykl) i „komunikację zbiorową”.

A5. Atrybuty będące konsekwencją warunków w jakich dokonuje się podróż:

A5.1. Warunki dojścia do i odejścia z przystanku (w tym jakość otaczającej przestrzeni publicznej, kolizyjność z ruchem pojazdów).

A5.2. Warunki oczekiwania na stacjach i przystankach, w tym: ochrona przed deszczem, zimnem, wiatrem, dostępność miejsca do siedzenia.

A5.3. Warunki jazdy, w tym: dostępność miejsca siedzącego, stopień zapelnienia miejsc do stania w pojeździe, płynność jazdy, czystość we wnętrzu pojazdu.

A5.4. Liczba przesiadek (zmian środka lokomocji) i warunki przesiadania się, w tym kolizyjność z ruchem pojazdów.

A5.5. Obecność osoby (osób) towarzyszących w danej podróży (m.in. użyczenie miejsca w samochodzie obcej osobie - tzw. carpooling).

A5.6. Dostępność i jakość informacji o podróży, w tym podawanej w czasie rzeczywistym.

A5.7. Bezpieczeństwo podróży: osobiste i wypadkowe w tym obiektywne i subiektywne (postrzegane przez pasażera).

A5.8. Warunki atmosferyczne.

A6. Atrybuty ekonomiczne:

A6.1. **Koszt zmienny** (np. koszt zużycia paliwa w samochodzie osobowym, koszt zakupu biletu jednorazowego).

A6.2. **Koszt stały** (np. amortyzacja samochodu osobowego, koszty napraw i ubezpieczeń, koszt nabycia biletu okresowego).

A6.3. **Koszt średni.**

A6.4. **Koszt krańcowy** (np. w przypadku posługiwania się biletem okresowym sieciowym można uważać, że koszt kolejnej podróży, czyli jej koszt krańcowy wynosi 0).

A6.5. **Koszt uogólniony** jest w istocie atrybutem syntetyzującym wiele atrybutów cząstkowych.

A7. Atrybuty środowiskowe:

- emisja szkodliwych składników spalin,
- emisja CO₂ dwutlenku węgla, tzw. ślad węglowy podróży,
- emisja hałasu,
- emisja drgań,
- zajęcie przestrzeni,
- zużycie materiałów,
- zużycie energii,
- intruzje wizualne,
- rozcinanie więzi sąsiedzkich.

Każda zrealizowana podróż w mniejszym lub większym stopniu ma swój udział w zużywaniu zasobów i w zagrożeniach dla środowiska naturalnego oraz cywilizacyjnego, w tym kulturowego.

A8. Atrybuty wynikające z charakterystyki podróżnego są w istocie uwarunkowaniami formującymi zasadnicze atrybuty podróży:

- płeć, wiek, zawód, poziom dochodów,
- styl życia (np. preferujący zamieszkiwanie w mieście lub poza),
- rola w systemie transportowym (kierowca, pasażer, pieszy, rowerzysta),
- status społeczny (pracownik najemny, pracujący na własny rachunek, bezrobotny, emeryt/rencista, uczeń, student),
- posiadanie prawa jazdy, dostępność do samochodu i roweru (pełna, częściowa, brak),
- posiadanie biletu okresowego komunikacji miejskiej,
- kondycja fizyczna, stan zdrowia, w tym sprawność narządów ruchu, wzroku i słuchu,
- rodzaj i zakres obowiązków zawodowych i rodzinnych,
- postrzeganie komfortu,
- poziom skłonności do ryzyka,
- poziom satysfakcji z odbytej podróży.

A9. Atrybuty integrujące bądź syntetyzujące atrybuty częściowe:

A9.1. Prędkość podróży (z uwzględnieniem czasu dostępu do środka transportu).

A9.2. Powtarzalność podróży. Podróże powtarzalne, to podróże odbywane regularnie, np. codziennie z domu do tego samego miejsca pracy, w tej samej porze dnia, tym samym środkiem lokomocji i tą samą lub zbliżoną trasą. Atrybut powtarzalności dotyczy tej samej osoby.

A9.3. Niezawodność podróży (gwarancja przewozu) dla pojedynczej podróży jest to zmienna zero-jedynkowa: równa 1 gdy podróż się odbyła; równa 0, gdy podróż nie mogła zostać zrealizowana (np. z powodu: odjazdu przyspieszonego w stosunku do rozkładu jazdy, awarii technicznej pojazdu, dużego zatłoczenia jezdni). Dla podróży powtarzalnych miarą niezawodności może być prawdopodobieństwo obsługi.

A9.4. Uogólniony koszt podróży uwzględnia skumulowaną wartość komponentów podróży. Jest to³ suma monetarnych i niemonetarnych kosztów podróży. Koszt monetarny w transporcie zbiorowym obejmuje cenę biletu, a w transporcie indywidualnym: koszt zużycia paliwa i innych materiałów eksploatacyjnych, opłaty parkingowe i inne drogowe (np. myto) oraz koszty kongestii. Niemonetarne koszty wyrażają wartość czasu spędzonego w podróży. Wartość ta jest różnicowana w odniesieniu do poszczególnych składników podróży, z uwzględnieniem dochodu podróźnego i celu podróży. Koszt uogólniony może brać także pod uwagę oceny subiektywne wynikające z uwarunkowań zewnętrznych oraz warunków wewnętrznych realizacji podróży. Uogólniony koszt podróży jest równoważny cenie dóbr materialnych w ekonomicznej teorii podaży i popytu.

A9.5. Formą kosztu uogólnionego jest tzw. **użyteczności podróży**, która jednak w dosłownej interpretacji wiąże się z korzyścią wyniesioną z realizacji aktywności, do której możliwe było dotarcie w wyniku realizacji podróży. Oznaczałoby to, że użyteczność podróży nie zależałaby od czasu trwania i warunków, w jakich się odbywa. Tak rozumiana korzyść z udostępnienia aktywności mogłaby po skwantyfikowaniu być komponentem uogólnionego kosztu podróży. Użyteczność podróży byłaby tym wyższa im niższy byłby jej koszt. W uproszczeniu można by użyteczność podróży utożsamiać z niskim poziomem jej uciążliwości oraz odwrotnie – uciążliwość określać jako niedogodność spowodowaną tym, że atrybuty w mniejszym lub większym stopniu odbiegają od oczekiwań pasażera.

A9.6. Syntetycznym atrybutem podróży jest też **subiektywne odczucie uciążliwości podróży** przez pasażera, obejmujące i wartościujące czas i warunki, w jakich realizują się poszczególne komponenty podróży. Jedną z prób jego oszacowania zarysowano w p. 2.3. Wartość czasu podróży wyrażana jest głównie w jednostkach monetarnych, niekiedy umownych jednostkach fizycznych (tzw. minuta ekwiwalentna).

Atrybuty odnoszą się przede wszystkim do podróży zrealizowanej, dla której są w pełni określone, ale także można jej formułować w odniesieniu do podróży planowanej, zamierzonej w bliżej, a nawet w dalszej perspektywie czasowej. Atrybuty dotyczące transportu zbiorowego mają swoją specyfikę, jednakże obejmują zaledwie kilka przypadków.

Modele podróży tworzone dla celów prognostycznych obejmują całą zbiorowość użytkowników systemu transportowego. Dlatego atrybuty pojedynczych podróży są upraszczane, uśredniane i generalizowane, a przez to większość z tych atrybutów jest pomijana w sieciowych modelach podróży. W modelach tych liczba uwzględnianych atrybutów podróży sprowadzana jest – nie zawsze słusznie – tylko do kilku: położenie źródła i celu podróży, motywacje podróży, użyty środek lokomocji.

Położenie źródła i celu pojedynczej podróży przypisywane jest do tzw. centroidy jako wypośrodkowanego punktu określonego rejonu komunikacyjnego. Momenty rozpoczęcia i zakończenia podróży są generalizowane przez przypisanie ich do okresu analizowanej godziny szczytu. Trasa przemieszczeń między źródłem i ce-

3 http://en.wikipedia.org/wiki/Generalised_cost

lem, a w konsekwencji długość i czas podróży są wynikiem stosowania modelu, określającym ich wartości średnie, ewentualnie także wartości kwantyli.

Zwiększenie liczby atrybutów podróży uwzględnianych w modelach prognozytycznych zapewne zwiększałoby dokładność odwzorowania rzeczywistych zachowań komunikacyjnych. Najprościej można to dokonać ujmując zwartościowany wpływ atrybutów w uogólnionym koszcie podróży. Sprawa otwartą jest w jakim stopniu będzie to skutkowało ulepszeniem modeli prognozytycznych oraz które atrybuty podróży są istotne z tego punktu widzenia.

2. Wartościowanie wybranych atrybutów miejskiego transportu zbiorowego

Wiele publikacji raportuje badania w zakresie parametryzacji kryteriów jakościowych w funkcjonowaniu miejskiego transportu zbiorowego. Część z nich podejmuje wartościowanie atrybutów podróży w skwantyfikowanej monetarnej formie w odniesieniu do tego transportu. W syntezie tych wyników zawartej w [7] znajdują się poniższe generalne tendencje i stwierdzenia:

- Koszt jednostkowy czasu (np. godziny) w podróżach niezarobkowych szacuje się na poziomie 25-50 % aktualnego wynagrodzenia za pracę, jakie otrzymuje podróżny.
- Koszt czasu podróży jest wyższy w przypadku niekomfortowych, niebezpiecznych i stresujących warunków jej realizacji.
- Koszt czasu podróży wrasta wraz ze wzrostem dochodów podróżnego; jest na ogół niższy dla dzieci i młodzieży oraz dla emerytów i bezrobotnych.
- Jednostkowy koszt podróży wrasta, jeśli podróż trwa ponad 20 minut lub jeśli suma wszystkich podróży odbywanych w ciągu doby przez daną osobę przekracza 90 minut.
- Koszt czasu podróży rośnie ze wzrostem rozrzutu czasu podróży oraz niepewności co do czasu osiągnięcia celu podróży i jest szczególnie wysoki w przypadku niespodziewanych opóźnień.
- Jednostkowy czas dojścia do przystanku oraz oczekiwania na pojazd jest dwa do pięciu większy niż czas przejazdu. Przesiadka – ze względu na dodatkowy wysiłek podróżnego obłożona jest dodatkowym kosztem (tzw. karą za przesiadanie się) równoważnym 5 do 15 minutom czasu jazdy.
- W nieprzyjemnych warunkach odbywania przemieszczenia pieszo, rowerowego bądź oczekiwania (np. przejście wzdłuż ruchliwej ulicy bądź oczekiwania na autobus w otoczeniu, które wydaje się pasażerowi brudne i niebezpieczne, koszt czasu tych komponentów podróży jest istotnie wyższy od kosztu czasu przejazdu autobusem.
- Niektóre badania (np. [6]) wskazują na nieliniowy charakter wpływu warunków, w jakich realizowane są komponenty podróży na wartościowanie czasu podróży.

Te z natury rzeczy ogólne stwierdzenia dotyczą warunków zachodnioeuropejskich. Warto je odnieść do warunków polskich i doprecyzować. W dalszej części artykułu przytoczone zostaną wybrane wyniki badań własnych dotyczących niedogodności wywołanych rozrzutem czasu w przypadku powtarzalnych podróży. Pokazana zostanie subiektywna niejednorodność czasu poszczególnych komponentów podróży i nieliniowy wpływ warunków w jakich się realizują. Szczególnie ważne w warunkach polskich jest zwartościowanie czasu jazdy w warunkach zatłoczenia pojazdów komunikacji zbiorowej, co nie stanowi problemu w Europie Zachodniej.

2.1. Wartościowanie uciążliwości losowej zmienności czasu w podróży powtarzalnej

2.1.1. Rozrzut czasu podróży w podróżach powtarzalnych

Wariancja czasu podróży wynika z losowej zmienności czasu oczekiwania i czasu jazdy. Założono, że czasy dojścia do i odejścia od przystanku jako kontrolowane przez pasażera nie wpływają na zwiększenie rozrzutu czasu podróży.

Dla przypadku losowych przebyć pasażerów na przystanek, co ma miejsce przy częstotliwościach obsługi σ i więcej kursów na godzinę, wariancja czasu oczekiwania wyraża się wzorem:

$$s_w^2 = \frac{m_3}{3m_1} - \frac{m_2^2}{4m_1^2} \quad (1)$$

gdzie m_i ($i = 1, 2, 3$) oznacza moment zwykły i -tego rzędu rozkładu odstępów czasu między kolejnymi pojazdami komunikacji zbiorowej (tzw. interwał obsługi). W większości przypadków rozkład ten jest zgodny z rozkładem Gamma i wówczas wariancja czasu oczekiwania opisana jest wzorem:

$$s_w^2 = \frac{\bar{h}^2}{12} \left(1 + \frac{1}{k} \right) \left(1 + \frac{5}{k} \right) \quad (2)$$

w którym:

\bar{h} – średni interwał obsługi,

k – parametr charakterystyczny rozkładu Gamma.

Rozkład Gamma w dogodny sposób ujmuje ścieranie się wpływów czynnika deterministycznego (rozkład jazdy) i losowego (zakłócenia w kursowaniu pojazdów) w funkcjonowaniu miejskiego transportu zbiorowego. Wartość parametru k tego rozkładu można uznać za miarę stopnia determinizmu: wartości $k = 1$ (jest to przypadek rozkładu wykładniczego) odpowiada pełna losowość kursowania pojazdów, natomiast wartościom $k \rightarrow \infty$ odpowiada ścisła regularność ruchu, czyli przypadek stanowiący proces deterministyczny. Zmianie wartości parametru k w przedziale $[1; \infty]$ odpowiada zmiana wartości wariancji czasu oczekiwania w zakresie od \bar{h} do $0,08 \bar{h}$, czyli bardzo znaczna. W większości przypadków

parametr k przyjmuje wartości rzędu kilku jednostek, co wskazuje na dość silny wpływ czynnika losowego na funkcjonowanie komunikacji miejskiej.

Dla przypadków, gdy średnie napelnienie pojazdu transportu zbiorowego zbliża się do jego pojemności mogą wystąpić przypadki niezabrania pasażera w wyniku braku miejsca w pojeździe. Wówczas rozkład czasu oczekiwania jest jeszcze bardziej złożony i dla jego wyznaczeniu trzeba się posłużyć transformatą Laplace'a splotu rozkładów prawdopodobieństwa: 1) przy założeniu nieprzekraczania maksymalnej pojemności pojazdu oraz 2) braku wolnego miejsca w pojazdach kursujących z interwałami o rozkładzie Gamma i na tej podstawie wyznaczyć wariancję czasu oczekiwania, co przedstawiono w [8].

W przypadku średniej i niskiej częstotliwości kursowania pojazdów transportu zbiorowego (6 i mniej na godzinę) część pasażerów orientuje swoje przybycia na przystanek w dostosowaniu do rozkładu jazdy. W tym przypadku komplikuje się wyznaczenie wariancji czasu przejazdu, gdyż wymaga to znajomości funkcji intensywności przybyć na przystanek, (zindywidualizowanej dla poszczególnego pasażera) oraz znajomości rozkładu wielkości występujących odchyłek od rozkładu jazdy.

Czas przejazdu w podróżach powtarzalnych zmienia się losowo w wyniku zmienności warunków ruchu panujących na trasie przejazdu, w tym w wyniku wpływu działania sygnalizacji świetlnej oraz stanów kongestii ruchu. Także jest skutkiem zróżnicowania indywidualnych cech kierowców i motorniczych pojazdów komunikacji miejskiej. Własne badania rozkładu czasu przejazdu pozwoliły oszacować jego wariancję:

$$s_j^2 = z \bar{t}_j \quad (3)$$

gdzie:

z – współczynnik zakłóceń (z zawiera się w zakresie od 0,05 do 0,2 w zależności od linii oraz odcinka pokrywającego trasę przejazdu; przeciętnie $z = 0,1$).

Przy założeniu, że rozkłady czasu oczekiwania oraz czasu przejazdu są wzajemnie niezależne, wariancja czasu podróży s_p^2 (przy pominięciu niewielkiej wariancji czasu dojścia do i odejścia od przystanku) jest sumą wariancji s_w^2 czasu oczekiwania oraz wariancji s_j^2 czasu przejazdu.

$$s_p^2 = s_w^2 + s_j^2 \quad (4)$$

Czas podróży opisany jest rozkładem zbliżonym do normalnego, jednakże uciętego z lewej strony. W pewnych przypadkach, tj. występowania dużych przyspieszeń lub opóźnień w stosunku do rozkładu jazdy i/lub pojawienia się długich interwałów w potoku pojazdów komunikacji zbiorowej, czas przejazdu będzie zależał od czasu oczekiwania, czyli te zmienne losowe nie można wtedy uznać za

wzajemnie niezależne. Wówczas wariancję czasu podróży należałoby wyznaczyć dla splotu tych rozkładów.

2.1.2. Badania nad predykcją czasu przeznaczanego przez pasażera na podróż

Rozrzut czasu podróży komunikacji zbiorowej – i to nawet przy ustalonym jej źródle i celu powoduje trudności w prawidłowym przewidywaniu, ile konkretna podróż zajmie czasu. Stanowi to dodatkową niedogodność zależną od stopnia pilności podróży. Każda decyzja pasażera przeznaczająca na podróż o wiadomym źródle i celu określoną ilość czasu powoduje określone skutki, wyrażające się we wcześniejszym lub późniejszym - niż było to zamierzone - przybyciu do celu podróży. Mniej lub bardziej dotkliwe konsekwencje spóźnienia (zależy to od celu, a zwłaszcza stopnia terminowości podróży) powodują, że pasażerowie przeznaczają na podróż zwykle większą ilość czasu, niż wynosi średni czas podróży, po to aby sprowadzić prawdopodobieństwo spóźnienia - zwłaszcza spóźnienia dużego - do niewielkiej, możliwej jeszcze do zaakceptowania wartości. Ten naddatek rezerwy czasu podróży wartościuje się zwiększeniem wskaźnika uciążliwości podróży.

Na podstawie przeprowadzonego ankietowania pasażerów i ekspertów szerzej opisanego w [9], posługując się zasadami psychologii matematycznej [4] skonstruowano następujące modele czasu t_{pp} przeznaczanego przez pasażera na podróż:

- podróże ściśle terminowe:

$$t_{pp} = t_{sp} + 1,63 s_p \quad (5)$$

- podróże nie ściśle terminowe:

$$t_{pp} = t_{sp} + 0,36 s_p \quad (6)$$

gdzie:

t_{sp} - średni czas podróży,

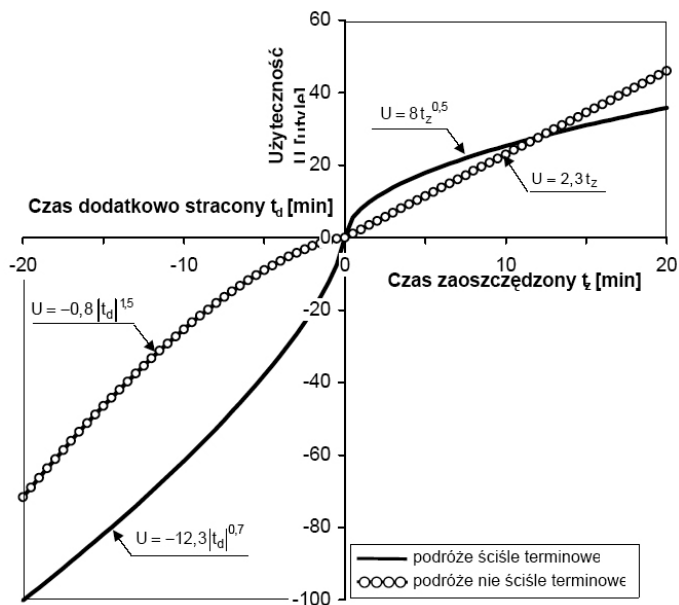
s_p - odchylenie standardowe czasu podróży.

Powyższym wartościom t_{pp} czasu podróży można przypisać wartości dystrybuanty rozkładu - odpowiednio 0,95 i 0,63. Oznacza to, że w odniesieniu do powtarzalnych podróży ściśle terminowych rzeczywisty czas podróży będzie dłuższy od czasu przeznaczanego na podróż w 5 % przypadków, a dla podróży nie ściśle terminowych - w 37 % przypadków

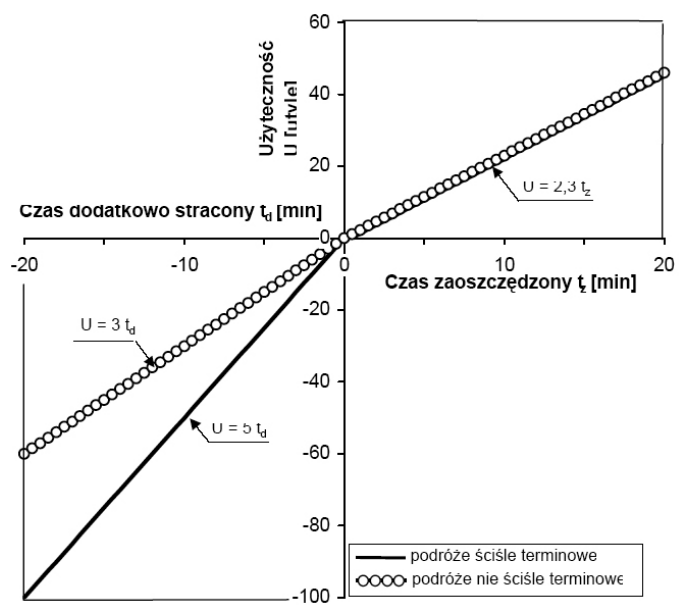
2.1.3. Użyteczność czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży

Różnica między średnim czasem podróży, a czasem trwania konkretnej podróży o tej samej relacji (np. konkretny dom i konkretne miejsce pracy) będzie nazywana: *czasem zaoszczędzonym* t_z - jeśli ma znak dodatni względnie *czasem dodatkowo straconym* t_d - jeśli jest ujemna. Użyteczność odchyleni czasu podróży od wartości spodziewanej (średniej) wyrażana będzie w jednostkach umownych tzw. *utyłach* U (punktach użyteczności). Podziałową skalę użyteczności unormowano przyjmując, że użyteczność każdej podróży o czasie trwania równym wartości średniej wynosi 0 utyli, natomiast użyteczność 20-minutowego czasu dodatkowo straconego wynosi - 100 utyli. Zatem przez te dwa punkty powinna przechodzić każda krzywa użyteczności. Na podstawie ankietowania 127 osób, w ramach którego każdy

z respondentów wkreślał swoją indywidualną krzywą użyteczności (jej usystematyzowane typy zestawiono w [9]). Zbiór tych krzywych po obróbce, uśrednieniu i wygładzeniu poddawano pod dyskusję i akceptację kilkusobowej grupie ekspertów. W wyniku krzywoliniowej aproksymacji uzyskano funkcje i wykresy jak na rys. 1, natomiast dla aproksymacji prostoliniowej - jak na rys. 2.



Rys. 1. Krzywoliniowa estymacja użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży



Rys. 2. Prostoliniowa estymacja użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży

W aproksymacji krzywoliniowej w zakresie do ok. 12 min czasu zaoszczędzonego, jego użyteczność jest większa dla przypadku podróży ściśle terminowych, niż dla podróży nie ściśle terminowych; dla większych wartości tego czasu jest na odwrót. Dla zakresu czasu dodatkowo straconego, uciążliwość (użyteczność ujemna) dla podróży ściśle terminowych jest od 25 do 35 utyli większa niż dla podróży nie ściśle terminowych.

W aproksymacji liniowej dla zakresu czasu zaoszczędzonego, funkcja użyteczności jest identyczna jak w przypadku podróży ściśle terminowych jak i podróży nie ściśle terminowych. Uciążliwość czasu dodatkowo straconego dla podróży ściśle terminowych jest o 2/3 większa, niż dla nie ściśle terminowych. Czas zaoszczędzony rekompensuje czas dodatkowo stracony o tej samej wartości bezwzględnej:

- w 76 % dla podróży nie ściśle terminowych,
- tylko w 46 % dla podróży ściśle terminowych.

Dla określonej powtarzalnej relacji „źródło – cel”, całkując numerycznie iloczyn funkcji użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży i funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu czasu podróży wyznacza się przeciętną użyteczność odchyłek czasu podróży od wartości średniej. Można przykorzystać z empirycznego rozkładu częstości tych odchyłek lub rozkładu z wygenerowanymi częstościami jak dla rozkładu normalnego o wariancji wyznaczonej wzorami (2), (3) i (4). Warto zauważyć, że średnia wartość analizowanego wskaźnika dla powtarzalnej relacji podróży jest ujemna; może być równa zeru tylko dla podróży o zdeterminowanej stałej wartości czasu trwania podróży.

2.2. Wartościowanie warunków podróży w odniesieniu do przejazdu środkami transportu zbiorowego

Największe różnicowanie warunków odbywania podróży ma miejsce w jej komponencie jakim jest przejazd. Może wystąpić przepadek, w którym pasażer ma dostępne miejsce siedzące bez narzuconego sąsiedztwa, bądź przypadek jazdy na stojąco w dużym tłoku. Zatem warunki przejazdu mają istotny wpływ na poziom uciążliwości podróży, w tym poprzez subiektywne postrzeganie czasu trwania przejazdu.

Na podstawie ankietowania pasażerów i ekspertów wyznaczono wartości współczynnika ekwiwalentnego uciążliwości czasu przejazdu zależnego od stopnia zapelnienia powierzchni miejsc do stania w pojeździe komunikacji miejskiej. Standaryzującą wartość (1,0) współczynnika przyjęto dla przypadku, gdy pasażer siedzi w warunkach nie narzucającego się sąsiedztwa (tj. bezpośrednio przylegające siedzenie jest wolne). Uznano to za najwyższy poziom komfortu jazdy. W odniesieniu do tych warunków szacowana była względna uciążliwość jazdy w pozostałych, objętych ankietowaniem przypadkach. W efekcie uśrednienia ocen z ankiet oraz przeprowadzenia drugiej, „negocjacyjnej” fazy ankietowania - uzyskano wyniki jak w tabl. 1.

Tablica 1. Względna uciążliwość jazdy pasażera w określonych warunkach w pojeździe komunikacji miejskiej

Stan zapelnienia pojazdu	Pasażer siedzi	Pasażer stoi
Pojazd wyludniony	1,3	-
Półowa miejsc siedzących zajęta	1,0	-
Niewielkie zapelnienie powierzchni do stania: od 0 do 1 [os./m ²]	1,1	1,5
Średnie zapelnienie powierzchni do stania: od 2 do 3 [os./m ²]	1,5	2,3
Duże zapelnienie powierzchni do stania: od 5 do 7 [os./m ²]	2,2	4,3

Powyższe wartości stanowiły podstawę do wyznaczenia przeciętnej wartości współczynnika ekwiwalentnego przy jeździe w warunkach określonego napełnienia, wyrażonego w mierze względnej (stosunek liczby pasażerów do pojemności nominalnej określonej normami fabrycznymi). Badaną zależność aproksymowano parabolą drugiego stopnia:

$$\mu_j = 0,8 + 3,6 (q - 0,15)^2 \quad (7)$$

gdzie:

μ_j - współczynnik uciążliwości czasu jazdy,

q - napełnienie względne; $0 \leq q \leq 1,3$.

przy czym:

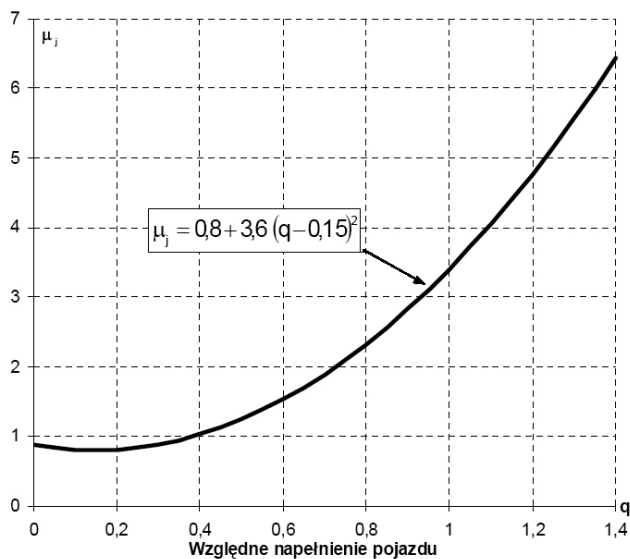
$$q = \frac{N}{C_n} \quad (8)$$

gdzie:

N - napełnienie bezwzględne (liczba pasażerów w pojeździe),

C_n - pojemność nominalna pojazdu (przy wykorzystaniu powierzchni miejsc do stania $0,15 \text{ m}^2/\text{os.}$).

Rys. 3 przedstawia wykres zależności (8)



Rys. 3. Zależność współczynnika ekwiwalentnego czasu jazdy μ_j od napełnienia pojazdu

Wartość współczynnika uciążliwości jazdy oznacza, ile razy jazda w konkretnych warunkach jest przeciętnie bardziej uciążliwa, w porównaniu z jazdą, gdy pasażer siedzi a wypełnienie miejsc stojących jest niewielkie ($0,5 \text{ os./m}^2$), co określa umowny poziom odniesienia, tzn. że wówczas $\mu_j = 1$. Zakres stosowności formuły (8) rozciąga się do napełnień maksymalnych C_{\max} odpowiadających wypełnieniu powierzchni miejsc do stania ok. $0,10 \text{ m}^2/\text{os.}$

$$C_{\max} \cong 1,3 C_n \quad (9)$$

gdzie:

C_n - napełnienie nominalne pojazdu przy wskaźniku $0,15 \text{ m}^2/\text{os.}$

Ponieważ wartość wskaźnika rośnie w miarę wzrostu napełnień, to jest to w istocie wskaźnik dyskomfortu. Interpretacja wartości współczynnika uciążliwości jazdy jest np. następująca: podróżny uważa jazdę w warunkach napełnień zbliżonych do norm fabrycznych ($0,15 \text{ m}^2/\text{osobę}$ tj. ok. $6,7 \text{ os./m}^2$) za $3,4$ razy bardziej uciążliwą, niż w przypadku niewielkiego wypełnienia miejsc do stania ($0,5 \text{ os./m}^2$).

Współczynnik ekwiwalentny jest narzędziem względnego zwartościowania uciążliwości przejazdu w podróży. Poszczególnym przedziałom wartości współczynnika można przypisać poziomy komfort jazdy co przedstawiono w [9].

Na próbie 32 specjalistów przeprowadzono dodatkowe ankietowania, celem oszacowania współczynnika uciążliwości czasu jazdy w funkcji dwóch zmiennych: czasu jazdy oraz wypełnienia powierzchni miejsc do stania. Z estymowanych zależności przedstawionych w [9] wynika, że współczynnik uciążliwości nie jest wartością stałą lecz funkcją liniową czasu jazdy, zatem szybkość zmian jego wartości jest funkcją kwadratową stopnia wypełnienia powierzchni miejsc do stania. Oznacza to, że podróżowanie w bardzo zatłoczonych pojazdach może być tolerowane jeszcze przez pasażera tylko w przypadku podróży o krótkim czasie przejazdu.

2.3. Wartościowanie efektów obniżenia uciążliwości podróży, w tym zmniejszania czasu trwania jej komponentów

Uzyskane z badań własnych oszacowania ekwiwalentów, sprowadzających rzeczywiste czasy trwania poszczególnych komponentów podróży do ich subiektywnego odczuwania zostały wykorzystane do uformowania tabl. 2. W przypadku występowania w źródłowej postaci zależności krzywoliniowych, dla potrzeb opisywanego tu ujęcia dokonano przedziałowej ich linearyzacji. Tablica 2 ustala równoważność zmniejszenia o jednostkę wartości parametru opisującego każdy rozważany przejaw uciążliwości podróży, tj.: średni czas dojścia, oczekiwania i jazdy; średnie napełnienia pojazdu; średnia liczba przesiadek oraz odchylenia standardowe: czasu oczekiwania, czasu jazdy i napełnienia pojazdu. Skutek określonego działania będzie wyrażany w tzw. minutach ekwiwalentnych, ujmujących jego względne znaczenie.

Tablica 2. Efekty działań obniżających subiektywną uciążliwość podróży w miejskiej komunikacji zbiorowej

Lp.	Działanie i jego bezpośredni efekt	Jednostka odniesienia	Przypadki	Skutek działania = obniżenie ekwiwalentnego czasu podróży [w minutach]
1.	Zmniejszenie średniego czasu dojazdu o 1 minutę		przy odległości dojazdu: - do 200 m - od 200 do 600 m - od 600 do 1000 m - powyżej 1000 m	1,0 1,5 2,5 3,5
2.	Zmniejszenie średniego czasu oczekiwania o 1 minutę		przy czasie oczekiwania: - do 2 min - od 2 do 5 min - od 5 do 10 min - powyżej 10 min	1,0 1,5 2,5 3,5
3.	Zmniejszenie odchylenia standardowego czasu oczekiwania o 1 minutę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	0,8 3,2
4.	Zmniejszenie średniego czasu jazdy o 1 minutę		przy napełnieniu pojazdu: - 0 os./m ² - od 0 do 3 os./m ² - od 3 do 6 os./m ² - od 6 do 10 os./m ²	1,0 1,3 2,4 4,5
5.	Zmniejszenie odchylenia standardowego czasu jazdy o 1 minutę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	0,4 1,6
6.	Zmniejszenie średniego zapęłnienia powierzchni miejsc stojących o 1 os./m ²	na każdą minutę rzeczywistego czasu jazdy	przy napełnieniu pojazdu: - od 0 do 3 os./m ² - od 3 do 6 os./m ² - od 6 do 10 os./m ²	0,2 0,4 0,8
7.	Zmniejszenie odchylenia standardowego zapęłnienia powierzchni miejsc stojących o 1 os./m ²	na każdą minutę rzeczywistego czasu jazdy		0,05
8.	Zmniejszenie liczby przesiadek o 1 przesiadkę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	4,2/6,1 * 8,0/10,8 *

**) pierwsza wartość dotyczy przypadku, gdy przesiadka nie wymaga ponownego płacenia za bilet, druga - gdy przesiadka wymaga ponownej opłaty.*

W oparciu o zwartościowane komponenty podróży można skonstruować uogólniony koszt podróży, który precyzyjniej ujmuje wpływ wielu czynników na rzeczywiste zachowania odwzorowywane w modelach, w szczególności w stadium podziału zadań przewozowych.

Literatura

- [1] Braun K. M., Every day mode choice and its determinants: trip attributes versus lifestyle. Charles University in Prague, 2008. <http://www.feem-web.it/ess/files/braunkohlova.pdf>.
- [2] Eboli L., Mazzula G., Performance indicators for an objective measure of public transport service. *European Transport*, issue 51, paper no 3, 2012.
- [3] Handbook of Transportation Engineering (editor Myer Kutz) 2nd edition the McGraw-Hill Companies, Inc, Volume I - Systems and Operation, 2011.
- [4] Kozielski J., *Problemy psychologii matematycznej*. PWN, Warszawa 1971.
- [5] Krygsman S., Dijst M., Multimodal trips in the Netherlands: Conceptual clarification, micro-level individual attributes and residential context. *Transportation Research Record*, Vol. 1753, 2001.
- [6] Lapparent M., Palma A., Fontan C., Nonlinearities in the Valuation of Travel Attributes. Publication AJD-69. Paris, 2002.
- [7] Liman T., Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, Vol. 11, No. 2, 2008.
- [8] Rudnicki A., Charakterystyka probabilistyczna czasu oczekiwania pasażerów z uwzględnieniem ograniczonej pojemności pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej. "Inżynieria Lądowa", PAN, Oddział w Krakowie, Komisja Budownictwa. Ossolineum 1990.
- [9] Rudnicki A., Jakość komunikacji miejskiej. Seria: Monografie, Nr 5. Wyd. SITK Kraków, 1999.
- [10] Starowicz W., Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 2007.
- [11] Transportation Research Board: A guide book for developing a transit performance- measurement system. TCRP Report 88. National Academy Press. Washington DC, 2003.
- [12] Vuchic V.R., *Urban transit systems and technology*. John Wiley @ Sons Inc. Hoboken, New Jersey 2007.
- [13] Yatskiv I., Pticina I., The urban public transport system quality indicator for European cities. Proceedings of the 10th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication". Transport and Telecommunication Institute, Riga. 20–23 October 2010.