

MODEL WYBORU PRZEZ PASAŻERA WARIANTU PRZEMIESZCZENIA DO MIEJSCA PRACY W WARUNKACH DUŻEGO MIASTA¹

Petro Horbachov

dr inż. hab., Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073783, e-mail: gaf@khadi.kharkov.ua

Olga Svichynska

Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073783, e-mail: ktt@khadi.kharkov.ua

Vitalii Naumov

dr inż., Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073720, e-mail: naumov.vs@gmail.com

Streszczenie. *W artykule przedstawiono podejście do formułowania modelu zachowania pasażera w systemie komunikacji miejskiej, zgodne z zasadami świadomego podejmowania przez osobę decyzji oraz opracowane modele dyskretnego wyboru. Zaproponowane są teoretyczne podstawy modelowania, zgodnie z którymi wartości atrakcyjności trasy przemieszczenia oblicza się za pomocą systemu całkowitych równań Fredholma na podstawie statystycznych prawdopodobieństw wykorzystania alternatywnych tras dla każdego respondenta. Dla obliczania współczynników znaczenia parametrów w funkcji atrakcyjności wykorzystano analizę regresyjną oraz przedstawiono ocenę dokładności prognozy dla prawdopodobieństwa wyboru alternatyw. Przedstawiono funkcję atrakcyjności, która została opracowana w wyniku badań przemieszczeń do miejsc pracy dla miasta Charkowa.*

Słowa kluczowe: *modelowanie podróży, transport zbiorowy, wybór linii*

Wprowadzenie

Dla systemów komunikacji zbiorowej miast Ukrainy charakterystycznym jest obecność dość rozwiniętych sieci transportowych miejskiego transportu, które obsługują więcej od 70% przemieszczeń mieszkańców i gości miast. Dlatego szczególnie ważnym jest skuteczne planowanie procesu transportu publicznego w obecnych warunkach funkcjonowania zasobów przewozowych na Ukrainie, które tak istotnie różnią się od przyjętego w cywilizowanym świecie poziomu obsługi transportowej: informacyjna obsługa pasażerów znajduje się na bardzo niskim poziomie, rozkłady ruchu na najbardziej używanych liniach komunikacji miejskiej

¹ Wkład autorów w publikację: Horbachov P. 60%, Naumov V. 30%, Svichynska O. 10%

są ciągle łamane, istnieją odmowy przyjęcia przy wejściu do pojazdu wskutek jego maksymalnego obciążenia. Tę sytuację pogarsza brak regularnych badań procesu transportowego i w konsekwencji niedostateczna ilość danych wejściowych, potrzebnych dla podejmowania uzasadnionych decyzji. To czyni obsługę pasażerów „za interwałem ruchu” faktycznie jedynym sposobem funkcjonowania transportu publicznego i wymaga szczególnej uwagi do problemu podziału potoków pasażerów między liniami autobusowymi, ponieważ przewozy miejskie są dość atrakcyjnym biznesem, w którym nie tylko wielkość zysku firmy transportowej, ale i zarobki kierowców pojazdów zależą od liczby przewiezionych pasażerów.

Koniecznością dla ukraińskich naukowców stało się stworzenie metody podziału potoków pasażerów między liniami komunikacji miejskiej, która jest oparta na faktycznej informacji co do zachowania pasażerów w miejskim systemie transportowym oraz odpowiednio opisuje kompleksowy, względny charakter procedury wyboru pasażerem trasy przemieszczenia w systemie transportowym.

Analiza źródeł literaturowych

Najbardziej niezawodną, współczesną, jak teoretycznie uzasadnioną podstawą dla opracowania metody modelowania zachowania pasażerów są modele oparte o makroekonomiczną teorię, która określa tak zachowanie osoby, że ona zawsze wybiera ze zbioru alternatyw tę, która tworzy maksymalną użyteczność. Dla odzwierciedlenia atrakcyjności alternatywy wykorzystuje się pojęcie użyteczności, które uważa się za wygodny konstrukt teoretyczny, zdefiniowany jako to, co osoba chce zmaksymalizować [1]. Przy tym zakłada się brak błędów osoby podejmującej decyzję, a ponieważ badacz nie może mieć pełnej informacji o wszystkich elementach, które wpływają na wybór osoby, użyteczność rozdzielania jest na dwa składniki [1, 2]. Pierwszy składnik jest mierzony obserwowaną częścią V_{ij} :

$$V_{ij} = \sum_k \beta_k \cdot x_{ijk} = \beta \cdot x_{ij} \quad (1)$$

gdzie:

β – wektor parametrów;

x_{ij} – wektor charakterystyk i -tej osoby, właściwości alternatywy j ;

$i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, J$ (n – liczba osób, J – liczba alternatyw ponumerowanych dowolnie).

Drugi składnik mierzony jest losową częścią ε_{ij} , co odzwierciedla wszystkie czynniki, które zapewniają mało zauważalny wpływ na wybór osoby i również uwzględniają ewentualne błędy popełnione podczas obserwacji lub w trakcie tworzenia matematycznego modelu [1, 2]. Biorąc pod uwagę (1), funkcja użyteczności przyjmuje następującą postać:

$$U_j = x_j \cdot \beta + \varepsilon_j \quad (2)$$

Obecność zmiennej losowej w (2) stwarza możliwości dla wyjaśnienia przyczyn wykorzystania różnych alternatyw, ponieważ prawdopodobieństwo wyboru przez osobę i alternatywy j jest prawdopodobieństwem tego, że jej użyteczność będzie największą w porównaniu z innymi alternatywnymi.

Po dokonywaniu matematycznych przekształceń standardowy logit-model otrzymuje następującą formę [1-5]:

$$P_j = \frac{e^{x_j \beta}}{\sum_{r=1}^J e^{x_r \beta}} \quad (3)$$

Do określenia parametrów tego modelu wykorzystywana jest metoda maksymalnej wiarygodności, dla której danymi wejściowymi są binarne prawdopodobieństwa każdej alternatywy i parametry, które je charakteryzują. To czyni modele dyskretnego wyboru bardzo wszechstronnymi narzędziami modelowania, ale ostateczne wyniki opracowania jakich bądź modeli dyskretnego wyboru osiągnięte są przez zbyt śmiałe założenia o jednakowym rozkładzie losowych elementów wszystkich czynników wyboru trasy przemieszczenia, pomimo faktu, że czynniki te mają różne znaczenie fizyczne. Poza tym modele te nie pozwalają na szczegółowy przegląd procedury wyboru trasy przemieszczania, która zawsze realizuje się dla określonego zbioru alternatyw. Ocena parametrów każdej alternatywy ma względny charakter i to wyraźnie widać z wyników badań [6], w których dla oceny procedury wyboru respondentom zaproponowano do rozważenia dwa alternatywne warianty trasy przemieszczenia pomiędzy ustalonymi dzielnicami miasta.

Przy rozwiązaniu stosunkowo prostego zagadnienia wyboru przez pasażerów trasy przemieszczenia za pomocą transportu miejskiego istnieje możliwość uproszczenia sformułowania problemu i opracowania specjalnej metody obliczania prawdopodobieństwa wyboru alternatyw, opartej na osobliwościach interwałowego podejścia do obsługi pasażerów transportem publicznym, dla którego charakterystycznym jest to, że pasażer podejmuje decyzję bezpośrednio na przystanku, w zależności od konkretnej sytuacji transportowej.

Teoretyczne podstawy wyboru wariantu przemieszczenia

Przy opracowaniu metody wykorzystuje się tę samą zasadę świadomego zachowania pasażerów transportu publicznego, która jest podstawą dla modeli dyskretnego wyboru. Jednak stosowane jest przy tym bardziej ogólne twierdzenie o tym, że pasażer maksymalizuje efektywność przemieszczenia, która odzwierciedla jakość tego przemieszczenia. Jako jakość rozumie się zestaw właściwości obiektu, które określają jego zdolność do zaspokojenia pewnych potrzeb w odpowiedności

do przeznaczenia obiektu. W takim przypadku wynik wyboru, czyli jego efektywność, musi w pełnej mierze odzwierciedlać cel stworzenia i funkcjonowania badanego obiektu i może być zdefiniowany jako różnica między wynikiem przemieszczenia i jego kosztem. Z uwzględnieniem zasady maksymalizacji, efektywność przemieszczania k -tym wariantem trasy między rejonami transportowymi d i e , E_{kde} określa się zgodnie z formułą:

$$E_{kde} = \max_l \{R_{lde} - C_{lde}\}, d, e \in [1, N_{TP}], k, l \in [1, z_{de}], \quad (4)$$

gdzie:

- k – indeks wybranego wariantu trasy przemieszczenia między rejonami odjazdu d i przybycia e , $k \in [1, z_{de}]$;
- d, e – indeksy dzielnic transportowych miasta, $d, e \in [1, N_{TP}]$;
- l – indeks jednego z alternatywnych wariantów trasy przemieszczenia między rejonami d i e , $l \in [1, z_{de}]$;
- z_{de} – liczba alternatywnych wariantów trasy przemieszczenia między dwójką rejonów transportowych d i e , $z_{de} \geq 2$;
- E_{kde} – efektywność przemieszczenia k -tym wariantem trasy między rejonami d i e ;
- C_{lde} – koszty wszystkich rodzajów na przemieszczenie l -tym wariantem trasy między rejonami d i e ;
- R_{lde} – wynik wykorzystania l -tego wariantu trasy, albo użyteczność zmiany lokalizacji (przemieszczenia) między rejonami d i e .

Użyteczność przemieszczania jest określana przez jej konieczność, pilność, czyli stosunkiem pasażerów do celu podróży. Czynniki te nie są bezpośrednio związane z procesem transportowym i wiarygodnie mogą znacznie się różnić.

Dla prawidłowego zastosowania zasady maksymalizacji efektywności podróży dalej koniecznym jest jej uzupełnienie założeniem, że pasażer ma jasne widzenie, co do konsekwencji wyboru trasy. To założenie wydaje się dość prawidłowym podczas wprowadzania ograniczeń dla modelowania zachowania pasażerów w sieci transportowej tylko w stosunku do podróży do miejsca pracy. Ograniczenie to pozwala również znacznie zmniejszyć zakres możliwych wartości wskaźnika R_{lde} ze względu na podobny charakter podróży dla każdego pasażera, ponieważ w takim przypadku wynik przemieszczenia dla każdej osoby jest ten sam – być w pracy bez opóźnienia. Dlatego dla rozpatrywanych podróży można stwierdzać, że

$$R_{lde} = const = R, \text{ dla } \forall l; c; d. \quad (5)$$

Mimo (5), uwzględnienie wyników przemieszczenia w (4) jest bardzo ważnym krokiem nie tylko z metodologicznego punktu widzenia, ale również pod względem szukanego modelu, ponieważ to wyjaśnia prawdziwy sens wolnego członka w tym wyrazie.

Sytuacja dla badania zachowania pasażera jest bardzo odmienna od ogólnej sytuacji wyboru losowego, która jest rozpatrywana w modelach dyskretnego wyboru. Kluczowym elementem ogólnej sytuacji jest podróż samochodem osobowym, a warianty korzystania się z komunikacji miejskiej rozpatrywane są jako możliwe alternatywy podróży samochodem. Jeśli dla podróży do miejsca pracy pasażer zawsze używa środków komunikacji miejskiej, przy interwałowej metodzie obsługi pasażerów podejmowanie decyzji co do wariantu trasy przemieszczenia odbywa się na przystanku i to prowadzi do formowania specyficznego zestawu wydatków pasażera, innego niż ilościowe parametry podróży, charakterystyczne dla modeli dyskretnego wyboru. Po pierwsze, nie wszystkie parametry ilościowe trasy transportu mogą być uznane za deterministyczne, a przede wszystkim odnosi się to do czasu podróży. Po drugie, przy podejmowaniu decyzji o wyborze tego albo innego wariantu trasy przemieszczenia, pasażer jeszcze nie zna wyników swojego przemieszczenia. Dlatego koniecznym jest wprowadzenie w modelu jasnego pojęcia deterministycznych czynników trasy przemieszczenia. Jako deterministyczne uważane są te czynniki, które w momencie wyboru mają stałą i znaną pasażerowi wartość. Wśród podstawowych czynników, które pasażer bierze pod uwagę przy wyborze wariantu trasy przemieszczenia, można wyodrębnić dwie grupy:

- deterministyczne (wartość podróży, liczba przesiadek, czas dojścia, niezawodność wariantu i poziom komfortu, który charakteryzuje się średnim współczynnikiem napełnienia pojazdu podczas podróży, czas przesiadki);
- stochastyczne (czas oczekiwania na przystanku).

Inne czynniki, w tym i jakościowe wskaźniki funkcjonowania transportu, niemające ilościowej oceny, rozpatrywane są jako niezdefiniowane, których stopień wpływu jest szacowany przy statystycznej obróbce danych eksperymentalnych. Wynik analizy kosztów podróży jest przedstawiony następującą zależnością:

$$C_l = \sum_{i=1}^{n_g} c_i \cdot g_{il} + c_t \cdot t_l \quad (6)$$

gdzie:

- n_g – liczba istotnych deterministycznych czynników, które są używane przez pasażerów w trakcie wyboru trasy przemieszczenia między dwoma rejonami transportowymi;
- c_i – współczynnik istotności i -tego deterministycznego czynnika;
- g_{il} – wartość i -tego deterministycznego czynnika dla l -tego wariantu trasy przemieszczenia;
- t_l – czas oczekiwania pojazdu dla l -tej trasy (zmienna losowa);
- c_t – współczynnik istotności czasu oczekiwania.

W (6) i dalej nie używano indeksów d i e , które określają zgodność przemieszczenia parze rejonów transportowych (początkowemu i końcowemu punktowi

przemieszczenia), dla tych wypadków, kiedy one nie wpływają na treść wyrazu, czyli kiedy rozpatrywana jest jedna para rejonów.

Biorąc pod uwagę stałość użyteczności przemieszczenia, wynikiem modelowania jest uzyskanie obiektywnych wartości współczynników istotności deterministycznych parametrów trasy podróży c_i , $i \in [1, n]$, które pozwalają opisać nastawienie pasażera do odpowiednich czynników transportowych. Dla odzwierciedlenia zależności efektywności l -tego wariantu trasy przemieszczenia w (4) wprowadza się zmienną y_l za pomocą dzielenia deterministycznej części zależności kosztów (6) przez współczynnik c_l przy losowej części czasu oczekiwania t_l :

$$y_l = \frac{R}{c_l} - \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_l} \cdot g_{il} \quad (7)$$

Po czym, uwzględniając (4), dostaje się:

$$\frac{E_l}{c_l} = y_l - t_l \quad (8)$$

Aby uprościć wyrażenie, lewą część (8) można zamienić specjalnym symbolem X_l :

$$X_l = \frac{E_l}{c_l} \quad (9)$$

wówczas otrzymuje się wyrażenie:

$$X_l = y_l - t_l \quad (10)$$

w którym zmienni X_l i y_l mają odpowiedni sens:

- X_l jest sprowadzona do czasu oczekiwania efektywność przemieszczenia, albo innymi słowy, efektywność przemieszczenia w wymiarze czasu; w rozpatrywanym modelu ta wielkość jest pozytywną zmienną losową, ze względu na wpływ czasu oczekiwania;
- y_l jest efektywnością przemieszczenia w jednostkach czasu bez uwzględnienia czasu oczekiwania; to jest deterministyczna pozytywna wielkość, dla której dalej wykorzystamy określenie "deterministyczna atrakcyjność trasy przemieszczenia".

Według formuły całkowitego prawdopodobieństwa dla ciągłej zmiennej losowej, prawdopodobieństwo wyboru k -tego wariantu trasy przemieszczenia określone jest przez całkowity wyraz [7]:

$$p_k = \int_{\alpha_k}^{\beta_k} P \{X_k = \max \{X_l\}\} \cdot f(x_k) dx_k, \quad x_k \in [a_k, b_k] \quad (11)$$

gdzie α_k, β_k – odpowiednio dolna i górna granica interwału wartości zmiennej losowej X_k ; $f(x_k)$ – gęstość rozkładu zmiennej losowej – czasu oczekiwania przez pasażera pojazdu dla k -tego wariantu trasy przemieszczenia.

Za pomocą równania (11) można opisać prawdopodobieństwa wyboru wszystkich alternatywnych wariantów tras przemieszczania. W ogólnym przypadku, kiedy między parą rejonów transportowych istnieje z realnych alternatyw w sieci transportowej komunikacji miejskiej, dla których określone są niezerowe wartości prawdopodobieństwa wyboru można zaproponować układ z równań:

$$\left\{ \begin{aligned} & p_1 = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \prod_{l=2}^z P \{y_l - t_l < y_1 - t_1\} \cdot f(y_1 - t_1) dt_1 \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ & p_k = \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \prod_{l=1; l \neq k}^z P \{y_l - t_l < y_k - t_k\} \cdot f(y_k - t_k) dt_k \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ & p_z = \int_{\alpha_z}^{\beta_z} \prod_{l=1}^{z-1} P \{y_l - t_l < y_z - t_z\} \cdot f(y_z - t_z) dt_z \end{aligned} \right. \tag{12}$$

Na podstawie układu (12) wyznaczane są wielkości zmiennych $y_l, l \in [1, z]$, do tego koniecznym jest określenie statystycznych prawdopodobieństw wyboru alternatyw, a również funkcji rozkładu $f(t)$ rzeczywistego czasu oczekiwania pierwszej podróży dla wariantu trasy.

Układ (12) jest układem równań całkowych [7] z multiplikatywną podcałkową funkcją, dla której liczba niewiadomych y_l równa się liczbie równań z . Można udowodnić, że układ ten ma jedno rozwiązanie. Warunek porównania zmiennych losowych w każdym równaniu układu (12) wygląda następująco:

$$y_l - t_l < y_k - t_k; \quad k \neq l; \quad k, l \in [1, z] \tag{13}$$

$$\Delta y_l = y_1 - y_l, \quad l \in [2, z], \tag{14}$$

gdzie: Δy_l – deterministyczna atrakcyjność pierwszego wariantu trasy w stosunku do l -tego.

Odpowiednia liczba nowych stałych równa się $z - 1$. Ze względu na (14), układ (12) przekształca się następująco:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \prod_{l=2}^z P \{t_1 < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_1) dt_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ p_k = \int_{\alpha_k}^{\beta_k} P \{t_k + \Delta y_k < t_1\} \cdot \prod_{l=1; l \neq k}^z P \{t_k + \Delta y_k < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_k + \Delta y_k) dt_k \\ \cdot \\ \cdot \\ p_z = \int_{\alpha_z}^{\beta_z} P \{t_z + \Delta y_z < t_1\} \cdot \prod_{l=1}^{z-1} P \{t_z + \Delta y_z < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_z + \Delta y_z) dt_z \end{array} \right. \quad (15)$$

gdzie: $\alpha_l' = \alpha_l + \Delta y_l$; $\beta_l' = \beta_l + \Delta y_l$; $l = k \cup z$.

W ogólnym przypadku technologiczny sens Δy_l polega na tym, że zmienna ta wskazuje na względne przesunięcie rozkładu czasu oczekiwania $f(t_l)$, wynikiem którego jest zmiana prawdopodobieństwa $P[t_k < t_l + \Delta Y_l]$.

Tak więc proces modelowania zachowania pasażerów w systemie komunikacji miejskiej, czyli formowanie modelu określenia prawdopodobieństwa wyboru przez pasażera trasy przemieszczenia dla konkretnego obiektu, można przedstawić w postaci kilku etapów.

W pierwszym etapie równolegle prowadzi się badania podróży pasażerów do miejsc pracy w celu określenia statystycznego prawdopodobieństwa wykorzystania różnych wariantów trasy przemieszczenia i również zbieranie technicznych, eksploatacyjnych i statystycznych charakterystyk linii komunikacji miejskiej.

Drugi etap, to opracowanie statystycznych charakterystyk funkcjonowania linii komunikacji miejskiej, określenie wartości deterministycznych czynników i parametrów rozkładu czasu oczekiwania na liniach w szczytowych godzinach.

W trzecim etapie prowadzi się opracowanie przydatnych do wykorzystania ankiet, zgodnie z którymi pasażerowie korzystają z kilku wariantów trasy przemieszczenia. Przy opracowaniu dla każdej ankiety na podstawie parametrów oddzielnych linii kształtowane są parametry konkurencyjnych tras przemieszczenia.

W czwartym etapie poprzez rozwiązanie układu równań (15) wykonuje się obliczenie $(z - 1)$ -tej wartości odchylenia zadanej efektywności tras ΔY_s od bazowej (pierwszej) trasy dla każdej odebranej ankiety.

W piątym etapie dla N_c ankiet formowany jest układ równań (15). Ze względu na pozytywną wartość wyniku przemieszczenia ustala się bazową wartość deterministycznej atrakcyjności dla pierwszej ankiety i dokonuje się analizy regresyjnej, wynikiem której są współczynniki określające nastawienie pasażerów do czynników transportowych.

W końcowym szóstym etapie prowadzi się analizę statystyczną uzyskanego modelu, określa się konieczność poprawy jego dokładności i podejmuje się szereg działań w tym kierunku.

Badania eksperymentalne

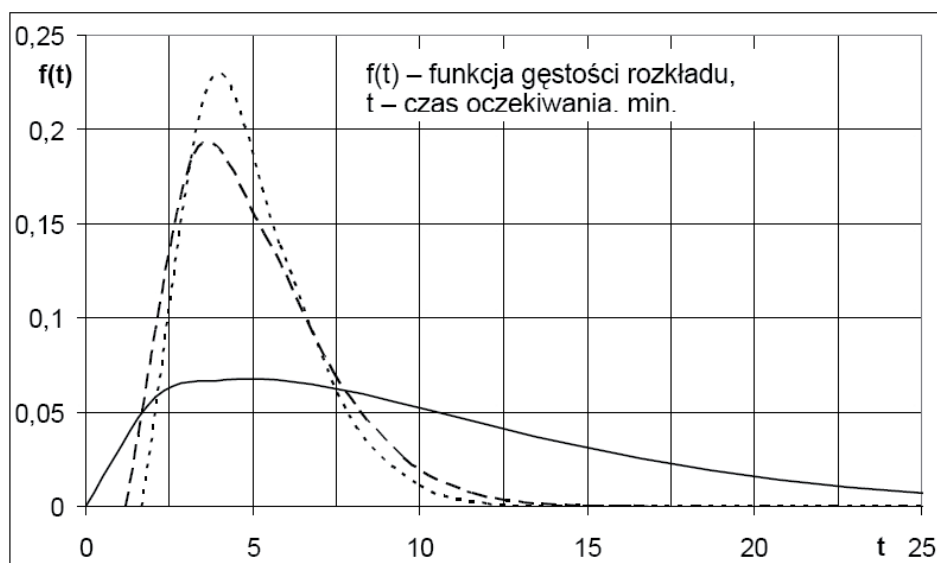
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w drugim co wielkości mieście Ukrainy – Charkowie, z liczbą ludności około 1,5 mln osób. W pierwszym etapie za pomocą symulacyjnego eksperymentu stwierdzono, że przy interwałowym sposobie obsługi czas oczekiwania pasażerów pojazdu pojedynczej linii rozłożony jest za Gamma-rozkładem z parametrami skali, które liniowo zależą od planowanego interwału ruchu na linii.

Dalej zostało przeprowadzone 5-dniowe badanie rzeczywistych przemieszczeń 866 mieszkańców miasta, wśród których przydatnymi dla dalszego opracowania okazało się 307 ankiet. Za przydatne uważano wszystkie ankiet, w których były poprawnie wypełnione pola dla wszystkich 5 przemieszczeń, w których wskazano 2 albo więcej wykorzystanych wariantów przemieszczenia. Badanie to w dużej mierze zbiega się z opisanym w [8] badaniem sposobów przemieszczenia ale w przeciwieństwie do niego dla każdego respondenta określono nie 5 binarnych prawdopodobieństw, a mniej, zgodnie z ilością wykorzystanych przez pasażerów wariantów przemieszczenia i na podstawie częstotliwości ich wykorzystania.

Równoległe określono główne charakterystyki procesu transportowego obsługi pasażerów: deterministyczne koszty pasażerów i zaplanowane interwały ruchu na liniach.

W następnym etapie wyznaczono wielkości deterministycznej atrakcyjności tras przemieszczenia na podstawie formuły numerycznego całkowania Gaussa. Rozkład czasu oczekiwania przyjęto zgodnie z rozkładem Weibulla z parametrami, które określa się na podstawie interwału ruchu na linii. Nieuwzględniony odsetek rozkładu, który określa dokładność obliczeń, przyjęto na poziome ósmej cyfry znaczącej. Przykład obliczeń przedstawiono dla pojedynczej ankiety, w której znajdują się trzy alternatywne warianty trasy przemieszczenia z prawdopodobieństwami wykorzystania $P_1 = 0,2$, $P_2 = P_3 = 0,4$ i interwałem ruchu $J_1 = 0,2$, $J_2 = J_3 = 0,4$.

Dla osiągnięcia wartości prawdopodobieństwa uzyskanych w wyniku badania poszukuje się odpowiedniego rozmieszczenia rozkładów czasu oczekiwania za pomocą uwzględnienia w czasie oczekiwania atrakcyjności tras Δy_2 i Δy_3 . Funkcją celu jest minimum długości wektora niedopasowania empirycznych i wyliczonych wartości prawdopodobieństwa. Wyniki rozwiązania nadają następujące wartości atrakcyjności: dla drugiej trasy $\Delta y_2 = 1,186$ i dla trzeciej trasy $\Delta y_3 = 1,668$. Odpowiednie rozmieszczenie rozkładów czasu oczekiwania z uwzględnieniem atrakcyjności tras przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rozkład czasu oczekiwania dla alternatywnych wariantów z uwzględnieniem atrakcyjności tras:

— $f(t_1)$ - - - $f(t_2 + \Delta y_2)$ ····· $f(t_3 + \Delta y_3)$

Obliczone wartości prawdopodobieństwa wyboru trasy, które odpowiadają temu rozkładowi, wynoszą $P_1^0 = 0,207$, $P_2^0 = 0,407$, $P_3^0 = 0,406$.

Na podstawie tych obliczeń został utworzony zestaw danych dla analizy regresyjnej funkcji atrakcyjności tras przemieszczenia z domu do miejsca pracy, przetwarzanie którego pozwoliło uzyskać następujący model atrakcyjności (tab. 1):

$$y = 43,25 - 1,029 \cdot t_n - 9,227 \cdot \gamma_n - 10,443 \cdot C_n - 11,430 \cdot P \quad (16)$$

Gdzie:

t_n – czas transportowy przemieszczenia komunikacją zbiorową z domu do miejsca pracy [min];

γ_n – współczynnik wypełnienia wnętrza przy wejściu do pojazdu;

C_n – cena (wartość) podróży z domu do miejsc pracy, hrn.;

P – liczba przesiadek dla wariantu trasy przemieszczenia.

Tabela 1. Charakterystyki współczynników regresji

Czynnik modelu regresyjnego	Współczynniki	Błąd standardowy	t-kryterium	P-wartość
Y-przecięcie	43,25	4,47	9,68	7,44E-21
Czas podróży	-1,03	0,09	-12,71	2,16E-33
Współczynnik napelnienia pojazdu	-9,23	3,07	-3,01	0,002706
Wartość podróży	-10,44	2,20	-4,75	2,47E-06
Liczba przesiadek	-11,43	2,33	-4,91	1,14E-06

Wymienione w tab. 1 współczynniki regresji okazały się istotnymi dla modelu. Jest to wystarczającą podstawą dla wykorzystania modelu atrakcyjności tras przemieszczenia (16), przy prognozowaniu prawdopodobieństwa wyboru przez pasażerów tras przemieszczenia w ramach modelu systemu komunikacji miejskiej za pomocą nowoczesnych narzędzi planowania transportu.

Podsumowanie i wnioski

Modele, opracowane na podstawie dyskretnego podejścia, potrzebują dla określenia wartości współczynników istotności czynników takiej metody obliczenia maksymalnej dokładności za pomocą binarnych wartości prawdopodobieństw wykorzystania alternatywnych tras podróży, która pozwala uzyskać pożądane rezultaty bez dokładnego badania procedury wyboru alternatyw, ponieważ zbiory tych alternatyw w procesie transportu mogą mieć bardzo znaczącą różnicę, wynikającą z różnych lokalizacji miejsc źródła i celu podróży. Wyniki wyboru przez pasażera alternatywy oparte są na uwzględnieniu właściwości rzeczywistych sposobów realizacji potrzeb przemieszczania, więc określa się względne wskaźniki atrakcyjności każdej alternatywy w celu oceny istotności czynników wyboru. Ostateczne wyniki opracowania modelu dyskretnego wyboru osiągnięto pod warunkiem bardzo rygorystycznych założeń o jednakowym rozkładzie składników losowych wszystkich czynników wyboru trasy przemieszczenia, a binarny charakter prawdopodobieństwa wejściowego dla modelu, utrudnia oszacowanie dokładności prognozowania prawdopodobieństw.

Zidentyfikowane prawidłowości zmiany czasu oczekiwania pojazdów na przystanku przy interwałowej metodzie obsługi pasażerów z losowym czasem odjazdu pozwoliły na zdefiniowanie konkretnego sensu składnika losowego efektywności przemieszczenia i również na analityczne rozwiązanie problemu określenia względnej atrakcyjności wariantów podróży za pomocą układu równań całkowych.

Zaproponowany model opisuje specyficzny obiekt transportowy z osobliwą metodą obsługi pasażerów, ale właśnie ten model pozwala uzyskać obiektywną charakterystykę nastawienia pasażerów do czynników przemieszczenia za pomocą określenia względnego charakteru alternatyw i obecności mechanizmu łączenia różnych pod względem kierunków i długości przemieszczeń w jeden zbiór dla analizy regresyjnej. W przedstawionym przypadku znaczącymi czynnikami wyboru przez pasażera wariantu trasy przemieszczenia do miejsca pracy okazały się: czas podróży komunikacją miejską, współczynnik napelnienia pojazdu w momencie wejścia do niego pasażera, cena (wartość) podróży z domu do miejsca pracy oraz liczba przesiadek dla wariantu trasy przemieszczenia.

Literatura

- {1} Ortúzar J. de D., and L. G. Willumsen, *Modelling Transport*. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2001.
- {2} Ben-Akiva M., *Discrete choice models with applications to departure time and route choice* / M. Ben-Akiva, M. Bierlaire. – C.: *Handbook of Transportation Science*, 2003. – 32 p.
- {3} Kjær T., *A review of the discrete choice experiment* / Kjær Trine. – D.: *University Of Southern Denmark*, 2005. – 143p.
- {4} Ben-Akiva M., *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand (Transportation Studies)* / M. Ben-Akiva, S. Lerman. – Massachusetts: MIT Press. – 1985. – 10 p.
- {5} McFadden D., *Modeling the choice of residential location* / McFadden Daniel. – Amsterdam: *University of California, Berkeley and Yale University*, 1977.–34 p.
- {6} *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2156, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., 2010, pp. 56 – 63.
- {7} Вентцель Е. С., *Теория вероятностей и ее инженерные приложения* / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1988. – 480 с.
- {8} *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2156, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., 2010, pp. 131 – 139.