

УДК 004:656.614.2

Л.М. Олещенко, А.В. Грабарєв

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІННОЇ ВЕЛИЧИНИ ПАСАЖИРОПОТОКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОЇ ГРАВІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

У статті розглянуто середньострокові методи для прогнозування пасажиропотоків між містами. Здійснено прогнозування величини пасажиропотоку між містами Чернігів та Київ, між містом Чернігів та прилеглими територіями. Прогнози отримані за допомогою динамічної гравітаційної моделі. Здійснена оцінка ефективності впровадження розроблених моделей для планування режимів руху транспортних засобів на міжміських маршрутах.

In modern transport companies are not taken into account the amplitude and frequency characteristics of the flow of passengers when planning the structure of the rolling stock. The technical capabilities of trucking companies do not provide timely and quality customer service. Particularly acute problem of rational use and maintenance of rolling stock is manifested in the moments of maxima of flow of passengers, are formed when the queue of passengers and due to the lack of technologies for the processing and transfer of passenger data in automated control systems of the region, deteriorating the quality of their service. The solution of these problems is due to the large amount of data to be processed in real time and cannot be effectively addressed without the use of approaches based on the use of information technology. The main factor affecting the efficiency of road management company intercity is the speed of the process and collect data on all passengers using transport services in a given time. Currently the motor company does not use technology that predicts changes in flow of passengers in time, forecasts are made on the basis of statistical data for past time periods. For data analysis and the development of adequate operational forecasting it is necessary to develop adequate mathematical model of dynamics of change of data. In the article medium-term methods are considered for prognostication of streams of passengers between cities. Prognostication of size of stream of passengers between cities Chernihiv and Kyiv, between a city Chernihiv and adherent territories are carried out. Prognoses are got by means of dynamic gravitational model. A realizable estimation of efficiency of introduction of the worked out models is for planning of the modes of motion of transport vehicles on interurban routes.

Ключові слова: прогнозування, пасажиропотік, модель, метод, точність прогнозу, гравітаційна модель.

Key words: prognostication, stream of passengers, model, method, exactness of prognosis, gravitational model.

У сучасних автотранспортних підприємствах (АТП) України не враховують амплітудно-частотні характеристики пасажиропотоку при плануванні структури рухомого складу. Існуючі технічні можливості АТП не забезпечують своєчасного та якісного обслуговування пасажирів. Особливо гостро проблема раціонального використання та обслуговування рухомого складу АТП проявляється в моменти максимумів пасажиропотоку, коли утворюються черги пасажирів, і, внаслідок відсутності технологій обробки і передачі даних про пасажирів в автоматизованих системах управління регі-

ону, погіршується якість їх обслуговування. Ці проблеми пов'язані з великим обсягом даних, що підлягають обробці в реальному часі, та не можуть бути ефективно вирішені без використання підходів, заснованих на застосуванні інформаційних технологій. Основним чинником, що впливає на ефективність управління АТП у міжміському сполученні, є швидкість обробки та отримання даних про всіх пасажирів, які користуються транспортними послугами в даний момент часу. На даний час АТП не використовує технології прогнозування змін пасажиропотоку в часі, прогнози здійснюються на основі статистичних даних за минулі проміжки часу. Щоб аналізувати дані та робити оперативні адекватні прогнози, необхідно розробити адекватну математичну модель динаміки зміни даних.

Загалом для прогнозування соціально-економічних процесів дослідники використовують адаптивні методи короткострокового прогнозування, які базуються на теорії часових рядів. Основними з них є методи ковзної середньої, експоненційного згладжування Холта-Уінтерса, метод згладжування помилок (метод Трігга), методи Трігга-Ліча та метод Чоу [1; 4]. Питанням прогнозування пасажиропотоку присвячено роботи Давідіча Ю.О. [2], Долі В.К. [3], Кристопчука М.Є., Кравченка Е.А. [5], Шліппе І.І. [6].

Прогнозування пасажиропотоків є важливою складовою управління економікою транспортної системи регіону. Для вирішення проблеми ефективного використання рухомого складу АТП необхідно розробити ефективну технологію прогнозування змінної величини пасажиропотоку з урахуванням його амплітудно-частотних характеристик, що й зумовило мету статті.

Регіон поділяється на зони, які співвідносяться до деякого пункту – зонального центру ваги. Транспортна мережа визначається набором зв'язків між зонами. Щоб оцінити попит на послуги транспорту однієї із зон, необхідно визначити населення, соціальну структуру, привабливість та доступність зони. Джерелом пасажиропотоків є населення досліджуваної території, яке має визначену структуру та демографічні особливості. Прогнозування пасажирсько-транспортної взаємодії між територіями характеризується складністю (враховуються взаємозв'язки між змінними), за масштабом – субглобальністю (число змінних може бути від 15 до 35), за трендом – циклічністю (мають регулярну складову у вигляді періодичної функції часу), за періодом попередження – середньостроковістю (від 1 до 5 років), за ступенем детермінованості – змішаністю (містять характеристики як детермінованого, так і стохастичного характеру) [1–3]. На формування пасажиропотоку впливає ряд чинників, серед яких структура та доходи населення, а також інфраструктурні особливості регіону.

Пасажиропотоки є змінними на різних проміжках часу та мають свої амплітудно-частотні характеристики залежно від обраного маршруту, часу доби, дня тижня та сезону. Вони мають тенденції до зміни в часі залежно від тенденцій змін рухливості населення в регіоні. При моделюванні прогнозних значень пасажиропотоку, який має тенденцію до поступової зміни, застосовують теорію нестационарних (часових) рядів. При аналізі рядів динаміки використовують поняття сезонності (циклічності), що характеризує періодичні коливання даного ряду та випадкового відхилення. Випадкова компонента фіксує одномоментні зміни динамічного ряду під впливом випадкових чинників. Для усунення випадкових відхилень здійснюється вирівнювання ряду.

У загальному випадку кожен член динамічного ряду Y_t , де $t \in [0, T]$, може бути представлений в адитивній формі [1; 2]:

$$Y_t = U_t + V_t + E_t + Z_t + \gamma_t \quad (1)$$

де U_t – тренд динамічного ряду, регулярна компонента, що характеризує загальну тенденцію; V_t – сезонна компонента, в загальному випадку – циклічна складова; E_t – випадкова компонента; Z_t – компонента, що забезпечує співвимірність елементів динамічного ряду; γ_t – управляюча компонента, за допомогою якої впливають на члени ряду з метою формування у майбутньому його бажаної траєкторії.

Для окремого обчислення компонент U_t , V_t , E_t ряду Y_t використовують фільтрацію компонент ряду. Сезонна компонента V_t характеризується тривалістю періоду сезонних коливань, їх амплітудою, розміщенням максимумів та мінімумів у часі. Сезонні коливання формуються під впливом не лише природно-кліматичних, але й соціально-економічних чинників. Сила і напрям дії окремих чинників формує різну конфігурацію сезонної хвилі. За своїм характером сезонна компонента може бути адитивною або мультиплікативною. Для адитивної компоненти характерні сталі коливання навколо середнього рівня чи тренду, для мультиплікативної – зростання амплітуди коливань з часом.

Прогнозування сезонних процесів ґрунтується на декомпозиції динамічного ряду. Припускають, що в майбутньому зберігатиметься тенденція і такий же характер коливань. За таких умов прогноз на будь-який місяць (квартал), визначений методом екстраполяції тренду, коригується індексом сезонності.

Динаміка більшості показників не має чітко вираженої тенденції розвитку. Через постійний перерозподіл впливу чинників, які формують динаміку процесу, змінюється інтенсивність динаміки, частота та амплітуда коливань. До таких фактичних даних більш еластичною виявляється ковзна середня, інтервал згладжування якої дорівнює сезонному циклу (4 або 12). Коригування ковзної середньої на сезонність здійснюється так само, як коригування лінійного тренду.

На використанні експоненційної середньої ґрунтується сезонно-декомпозиційна модель Холта-Уінтерса, в якій поєднуються моделі стаціонарності, лінійності та сезонності.

Аналіз динамічного ряду пасажиропотоку здійснюється за схемою:

1. Члени динамічного ряду корегуються спеціальною компонентою Z_t , якщо ряд не вимагає умов зіставлення, то $Z_t = 0$.
2. Управляюча компонента γ_t приймається рівною нулю.
3. Обчислюється регулярна складова U_t (тренд).
4. Визначається сезонна компонента V_t .
5. Оцінюються похибки при обчисленні U_t та V_t (оцінка випадкової складової E_t).

Перевірка рівності математичного сподівання значення залишкової компоненти нулю здійснюється за допомогою t -критерія Стюдента, перевірка незалежності значень ряду залишкової компоненти (оцінка наявності автокореляції) – за допомогою критерія Дарбіна-Уотсона.

Показниками точності моделі прогнозу є: коефіцієнт збіжності ϕ^2 , коефіцієнт кореляції $R \in [0; 1]$, коефіцієнт детермінації R^2 , середня помилка апроксимації $|\bar{e}|$. Моделі, для яких показники ϕ^2 та $|\bar{e}|$ мають мінімальні значення, а R і R^2 – максимальні, краще відображають досліджуваний процес [4].

Сезонна і випадкова компоненти є складовими часового ряду, які залишаються після виділення з нього тренду. Якщо всі складові знайдені правильно, математичне

сподівання випадкової складової дорівнює нулю і її коливання відносно середнього значення сталі. Випадкова складова відображає стохастичний характер пасажирсько-транспортного процесу, вплив на нього різноманітних факторів: соціально-економічних, політичних, організаційних. При виявленні сезонного процесу здійснюється фільтрація сезонної складової.

З урахуванням періодичних коливань ряду місячної динаміки пасажиропотоку використовують моделі сезонної хвилі на основі гармонічного аналізу. Основними її характеристиками є: амплітуда, фаза, період і частота коливань. Амплітуда характеризує відстань від середнього рівня максимуму (мінімуму) сезонної хвилі, період коливань — тривалість циклу, частота — кількість циклів в одиницю часу. Необхідною умовою для оцінювання періодичної складової є виключення з ряду Y_t регулярної складової (тренду U_t).

Якщо функція V_t з періодом T задовольняє умови Діріхле та інтегрована на інтервалі $(0, T)$ і відомі n її значень $y_k = V(t_k)$ у рівновіддалених точках $t_k = kT/n$, $k=0, 1, \dots, n-1$, то цю функцію можна апроксимувати тригонометричним многочленом. Гармонічний аналіз передбачає розкладання функції V_t , заданої на відрізку $[0, T]$, у ряд Фур'є або в обчисленні коефіцієнтів Фур'є a_j і b_j . Гармонічний синтез дає коливання складної форми шляхом підсумовування їх гармонічних складових (гармонік) [4]:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \left[\sum_{k=1}^m (a_k \cdot \cos(\omega_k \cdot k \cdot t) + b_k \cdot \sin(\omega_k \cdot k \cdot t)) \right]. \quad (2)$$

Коефіцієнти гармоніки a_j , b_j , $j=1, 2, \dots, m$ визначаються методом найменших квадратів, тобто мінімізують суму $\sum_{k=0}^{n-1} (\hat{y}_k - y_k)^2$ квадратів відхилень розрахованих значень $\hat{y}_k = \hat{y}(t_k)$ від значень y_k , отриманих у результаті експерименту. Тригонометричний многочлен (2) також можна представити у вигляді [4]:

$$\hat{y}(t) = A_0 + \sum_{j=1}^{m-1} A_j \cos(j\omega t - \phi_j) + A_m \cos(m\omega t), \quad (3)$$

де $A_0 = a_0/2$ — середнє значення функції $f(t)$, $A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}$; $A_m = a_m/2$ — амплітуди гармонік; $\omega = 2\pi/T$ — частота першої гармоніки; $\phi_j = \arctg(b_j/a_j)$ — фаза j -ї гармоніки, $j=1, 2, \dots, m$. Чим більшою є амплітуда коливань, тим вагоміший вклад гармоніки в загальну дисперсію процесу.

У модель гармонійного аналізу можна включити декілька гармонік із різними періодами коливань. Гармонічна функція розкладає часовий ряд на правильні періодичні хвилі — синусоїди. Для випадку сезонних коливань пасажиропотоку з періодом коливань 12 місяців апроксимуюча функція має такий вигляд [4]:

$$V_{ti} = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^n a_j \cos \frac{j\pi t}{6} + \sum_{j=1}^n b_j \sin \frac{j\pi t}{6}, \quad (4)$$

де

$$a_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{11} V_{ti} \quad a_j = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{11} V_{ti} \cos \frac{t_i \pi j}{6} \quad b_j = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{11} V_{ti} \sin \frac{t_i \pi j}{6}.$$

Пасажиропотік характеризує переміщення населення між територіями регіону у визначеному напрямку за одиницю часу і може бути описаний залежністю: $\Phi_{ij} = \frac{dQ_{ij}}{dt}$, де Q_{ij} – об'єм пасажирських перевезень від пункту i до пункту j . У загальному пасажиропотік Φ_{ij} між містами можна виразити гравітаційною залежністю типу [7; 8]:

$$\Phi_{ij} = k_{ij} \cdot \int_{S_i} \rho_i(S_i) dS_i \cdot \int_{S_j} \rho_j(S_j) dS_j \cdot F(t) \cdot r_{ij}^{-2} e^{-c_{ij} r_{ij}} \quad (5)$$

де c_{ij} , k_{ij} – параметри, що характеризують анізотропію пасажиропотоків, причому c_{ij} є сталим у моделі; ρ_i , ρ_j – густина населення; S_i , S_j – площі транспортних зон ($dm = \rho dS$); r_{ij} – відстань між центрами транспортних зон; $F(t)$ – коливання пасажиропотоку у часі, що виражаються залежністю $F(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)$, де $F_2(t)$, $F_3(t)$ – добовий, тижневий та сезонний епіцикли пасажиропотоку, між якими існує така залежність: $F_3 = 4,28F_2$, $F_2 = 7F_1$.

За допомогою пакету MATLAB на основі статистичних даних пасажирсько-транспортної взаємодії отримано прогнозні значення пасажиропотоку на маршрутах «Чернігів–Київ» та маршрутах пасажирсько-транспортної взаємодії між обласним центром та районами області (табл. 1).

Таблиця 1

Прогнозні значення Q , ρ , k , знайдені гравітаційним методом для маршрутів «Чернігів–Київ», «Чернігів–Мена», «Чернігів–Ріпки», «Чернігів–Щорс», «Чернігів–Городня» у середовищі MATLAB (розробка авторів)

		2007 р.	2008 р.	2009 р.	2010 р.	2011 р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.	2015 р.
Чернігів–Київ	ρ_1	3832	3824	3818	3813	3807	3800,5	3794,4	3788,3	3782,2
	ρ_2	3253	3280	3310	3350	3763	3718,2	3827,2	3936,2	4045,2
	k	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09
	Q	813017	836105	904754	1066697	1199997	1281107	1395608	1514230	1636952
Чернігів–Мена	ρ_1	3832	3824	3818	3813	3807	3800,5	3794,4	3800,5	3794,4
	ρ_2	29,8	29,3	28,9	28,5	28,1	27,66	27,24	27,66	27,24
	k	30,35	29,65	30,53	31,55	31,96	32,35	32,86	32,35	32,86
	Q	282943	271223	274997	279913	279186	277629	277307	276851	276262
Чернігів–Ріпки	ρ_1	3832	3824	3818	3813	3807	3800,5	3794,4	3800,5	3794,4
	ρ_2	15,8	15,4	15	14,8	14,5	14,14	13,82	14,14	13,82
	k	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$
	Q	371900	379854	395954	401621	368987	327166	327365	327187	326633

Продовження табл. 1

Чернігів—Щорс	ρ_1	3832	3824	3818	3813	3807	3800,5	3794,4	3788,3	3782,2
	ρ_2	20,9	20,5	20	19,8	19,5	19,09	18,74	18,39	18,04
	k	$5,44 \cdot 10^{-6}$	$5,50 \cdot 10^{-6}$	$5,68 \cdot 10^{-6}$	$5,92 \cdot 10^{-6}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$
	Q	180716	178914	180139	185284	205272	204579	209352	213779	217860
Чернігів—Городня	ρ_1	3832	3824	3818	3813	3807	3800,5	3794,4	3788,3	3782,2
	ρ_2	20,5	20,1	19,7	19,4	19,1	18,71	18,36	18,01	17,66
	k	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,096	0,097
	Q	381627	375753	349118	358930	371363	356870	352958	348931	344788

Порівняємо методи ковзного середнього, експоненційного згладжування Холта-Уінтерса та запропонований гравітаційний метод для прогнозування пасажиропотоку між містами Чернігів та Київ на 2012–2015 роки. При моделюванні різними методами отримано показники точності прогнозу, представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Показники точності прогнозу різними методами (розробка авторів)

Метод	Точність прогнозу
Ковзного середнього	0,96
Експоненційного згладжування Холта-Уінтерса	0,93
Лінійний тренд	0,93
Логарифмічний тренд	0,90
Динамічна гравітаційна модель	0,98

Розроблену модель прогнозу пасажиропотоку використано при формуванні запитів у системі керування базами даних про пасажирів MS SQL Server. Модель прогнозу (5) використано для моделювання оптимальних інтервалів руху та структури транспортних засобів на міжміських маршрутах Чернігівської області, ефективність впровадження цих моделей наведено у роботах [9; 10].

Завдяки врахуванню епіциклів пасажиропотоку та статистичних даних про населення взаємодіючих територій регіону запропонована модель прогнозу (5) є найбільш точною порівняно з іншими методами середньострокового прогнозування. Отримані прогнозні значення статистичних епіциклів пасажиропотоків на досліджуваних маршрутах дозволили покращити роботу АТП Чернігівської області, зокрема при плануванні режимів руху та виборі транспортних засобів для перевезення пасажирів. Врахування статистичних епіциклів пасажиропотоку призвело до збільшення прибутку автотранспортних підприємств м. Чернігова в середньому на 25 %, що підтверджує ефективність запропонованої моделі прогнозу.

1. Антохонова *И.В.* Методы прогнозирования социально-экономических процессов: учеб. пособие / И.В. Антохонова. — Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004. — 212 с.;
2. Давідич *Ю.О.* Розробка розкладу руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень: навч. посіб. / Ю.О. Давідич. — Харків: ХНАМГ, 2010. — 345 с.;
3. Доля *В.К.* Модель функціонування пасажирської транспортної системи приміського сполучення / В.К. Доля, М.Є. Кристопчук / Наука і молодь. Прикладна серія: зб. наук. праць. — К.: НАУ, 2006. — Вип. 6. — С. 108–111;
4. Єріна *А.М.* Статистичне моделювання та прогнозування: навч. посіб. / А.М. Єріна. — К.: КНЕУ, 2001. — 170 с.;
5. Кравченко *Е.А.* Информационные технологии транспортной логистики в междугородных пассажирских перевозках / Е.А. Кравченко, М.А. Голоскоков // Фундаментальные исследования. — 2007. — № 12. — С. 509–5104;
6. Шлиппе *И.И.* Анализ формирования пассажиропотоков по часам суток с помощью статистических характеристик / И.И. Шлиппе, А.И. Аврамов. — М.: МАДИ, 1975. — Вып. 106. — С. 22–25;
7. Олещенко *Л.М.* Використання динамічних гравітаційних моделей для прогнозування пасажирсько-транспортної взаємодії / Л.М. Олещенко // Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем. — Харків: ВД «ІНЖЕК», 2011. — С. 74–76;
8. Олещенко *Л.М.* Геоінформаційна модель пасажирсько-транспортної взаємодії мегаполіса з прилеглими територіями / Л.М. Олещенко, О.О. Железняк // XI Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013». — К.: НАУ, 2013. — С. 27–28;
9. Medvedev *M.G.* The optimal control models of interurban bus transport / M.G. Medvedev, L.M. Oleschenko // Electronics and control systems. — 2014. — № 1 (39). — P. 85–90;
10. Medvedev *M.G.* Information technology in the organization of long-distance bus passenger transportation / M.G. Medvedev, L.M. Oleschenko // Electronics and control systems. — 2013. — № 4 (38). — P. 94–97.