

DOI: 10.31319/2519-8106.1(54)2026.350830
UDC 656.073(075)

Sasov Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automobiles and transport and logistics systems

Сасов О.О., кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем
ORCID: 0000-0002-8697-6324
e-mail: sasov@ukr.net

Shmatko Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automobiles and transport and logistics systems

Шматко Д.З., кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем
ORCID: 0000-0001-7447-5955
e-mail: shmatkodima@ukr.net

Bulanyi Ruslan, undergraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

Буланій Р.О., здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем
e-mail: rysawawa@gmail.com

Dniprovsky State Technical University, Kamianske
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

PLANNING OF THE TRANSPORT PROCESS TAKING INTO ACCOUNT THE UNEVENNESS OF CARGO TRANSPORTATION IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

ПЛАНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ З УРАХУВАННЯМ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

The analysis of modern scientific research and publications devoted to the quantitative assessment and forecasting of transport flow unevenness using mathematical–statistical methods and machine learning algorithms has shown that decomposing time series of transport operations into trend, seasonal, and random components makes it possible to improve the accuracy of forecasting and transport resource planning. The study emphasizes the importance of considering transport seasonality in the agricultural sector, where peak loads occur during harvest periods.

A method for modeling the transport process using mathematical–statistical indicators (standard deviation, coefficient of variation, coefficient of unevenness) is proposed, which makes it possible to quantify transport flow fluctuations. Special attention is paid to the use of Fourier series to describe seasonal and periodic variations in transportation volumes and the least squares method for determining the parameters of a theoretical function. An alternative modeling approach based on n-degree polynomials is proposed, providing flexibility and adaptability in the analysis of real transport data.

The results confirm that mathematical–statistical modeling of uneven cargo transportation allows one to forecast daily and monthly fluctuations of transport flows, determine the optimal number of vehicles for peak periods, form efficient vehicle operation schedules considering seasonal peculiarities, and justify the use of reserve fleets or variable working modes.

The obtained results can be applied in the development of transport planning and dispatching control systems aimed at reducing downtime and empty runs. Further research should focus on creating predictive models using regression analysis, machine learning, and time series methods to more accurately identify patterns of seasonal and daily fluctuations in transport demand.

Keywords: *transport process, transport planning, cargo flow unevenness, coefficient of variation, mathematical-statistical analysis, road transport.*

Розглянуто питання планування транспортного процесу в агропромисловому комплексі з урахуванням нерівномірності перевезень вантажів, яка є одним із головних чинників, що впливають на ефективність роботи автотранспортних підприємств. Нерівномірність перевезень, особливо вантажів агропромислового комплексу призводить до нераціонального використання рухомого складу, підвищення собівартості транспортних робіт і зниження ритмічності логістичних операцій. Водночас зазначено, що зменшення нерівномірності можливе шляхом удосконалення планування перевезень, створення оптимальних запасів, раціонального розміщення складів та узгодження графіків транспортування.

Аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій, які присвячені кількісній оцінці та прогнозуванню нерівномірності вантажопотоків з використанням математико-статистичних методів і алгоритмів машинного навчання показав, що розкладання часових рядів перевезень на трендову, сезонну та випадкову складові дає змогу підвищити точність прогнозування та планування транспортних ресурсів. У роботі наголошено на важливості урахування сезонності перевезень у сільськогосподарському секторі, де пікові навантаження спостерігаються в періоди збору врожаю.

Запропоновано методіку моделювання транспортного процесу із застосуванням математико-статистичних показників (середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації, коефіцієнт нерівномірності), що дозволяє кількісно оцінити коливання вантажопотоків. Основну увагу приділено використанню рядів Фур'є для опису сезонних і періодичних змін обсягів перевезень, а також методу найменших квадратів для визначення параметрів теоретичної функції. Запропоновано альтернативний підхід моделювання на основі поліномів n -го ступеню, що забезпечує гнучкість і адаптивність при аналізі реальних транспортних даних.

Результати дослідження підтверджують, що математико-статистичне моделювання нерівномірності перевезень дозволяє: прогнозувати добові та місячні коливання вантажопотоків; визначати оптимальну кількість автомобілів для забезпечення перевезень у пікові періоди; формувати ефективні графіки роботи рухомого складу з урахуванням сезонних особливостей; обґрунтовувати доцільність використання резервного автопарку або змінного режиму роботи.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні систем планування та диспетчерського управління автотранспортних підприємств, орієнтованих на зменшення простой і холостих пробігів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення прогнозних моделей із застосуванням методів регресійного аналізу, машинного навчання та часових рядів для більш точної ідентифікації закономірностей сезонних і добових коливань транспортного попиту.

Ключові слова: *транспортний процес, планування перевезень, нерівномірність вантажопотоків, коефіцієнт варіації, математико-статистичний аналіз, автомобільний транспорт.*

Problem's Formulation

Road transport is the leading link in logistics systems and provides up to 70 % of the total volume of freight transportation in the agro-industrial complex of Ukraine. The efficiency of the functioning of a road transport enterprise is largely determined by the degree of uniformity of the transport process, which affects the use of rolling stock, labor productivity, transportation costs and the rhythm of the work of consignors and consignees [1, 2].

The unevenness of transportation is characterized by changes in their volume in tons and truck turnover in ton-kilometers over time, i.e. by quarters, months, weeks, days and hours of the day. The unevenness of transportation worsens the use of rolling stock, production facilities and equipment of a

road transport enterprise. However, it can be reduced and even completely eliminated by improving planning, creating reserves, rationally placing warehouses, and timely processing on site of products that quickly deteriorate due to other factors.

Creating inventories entails additional costs. It is recommended to balance the transportation schedules of low-value bulk cargo, but it is impractical to smooth out the flow of valuable cargo.

Analysis of recent research and publications

Over the past few years, there has been a growing body of work aimed at quantifying and predicting the unevenness of freight flows using both classical mathematical and statistical methods and modern machine learning algorithms. Below is a summary of key areas and conclusions relevant to the problem of transportation process planning [3,4].

Research in recent years emphasize that for correct planning it is necessary to decompose the time series of freight flows into a trend, seasonality and random component - this allows you to more accurately identify regular fluctuations (daily, weekly, seasonal) and respond to them in fleet and schedule planning. In application examples (urban and intercity flows), the authors use classical approaches to decomposition together with time series to forecast peak loads [5].

Analysis of specific routes (for example, transportation of agricultural products, produce lanes) illustrates the strong seasonality of freight flows, with peaks concentrated in limited months. In such cases, the authors recommend combining time series with calendar variables and flexible formation of rolling stock reserves in the “high season”, as well as using targeted load balancing scenarios (transferring part of shipments to the off-season or using subcontracting) [6,7].

Formulation of the study purpose

Modeling the process of transporting agricultural products will allow obtaining objective functions to determine the following characteristics: volume of cargo transportation; cargo turnover; container arrivals. Determination of mathematical-statistical indicators (standard deviation, coefficient of variation, coefficient of unevenness) will allow quantitatively assessing fluctuations in cargo flows.

Using the obtained data in the planning process will help increase the utilization rate of the vehicle fleet, reduce downtime, and reduce the cost of transportation.

Presenting main material

The unevenness of transportation is estimated by the unevenness coefficient by the volume of transportation in tons [8]:

$$\eta_p = \frac{P_{max}}{\bar{P}}, \quad (1)$$

freight turnover in ton-kilometers:

$$\eta_w = \frac{W_{max}}{\bar{W}}, \quad (2)$$

where W_{max} , P_{max} — respectively, cargo turnover and transportation volume during the busiest period; \bar{W} , \bar{P} — respectively, average cargo turnover and transportation volume.

Modern methods of planning the transport process are based on its mathematical-statistical research and modeling [9,10].

Periodic and seasonal fluctuations in transportation volumes and cargo turnover are conveniently represented using Fourier series.

In this case, it is required to obtain such simple harmonic oscillations, the summation of which corresponds to the oscillations of the actual levels of the dynamic series. Based on these considerations, the change in transportation volumes is presented as a function of time:

$$\hat{y}_t = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kt + b_k \sin kt), \quad (3)$$

where \hat{y}_t — aligned (theoretical) values of transportation volume \hat{P}_t , cargo turnover \hat{W}_t , or number of containers submitted \hat{Z}_t . At certain values of t , they are called moving, or conditional, averages; a_0 , a_k , b_k — unknown parameters of the theoretical objective function given by Fourier series; k — harmonic series ($k=1, 2, \dots, n$).

Based on the least squares method, the parameters of the Fourier series are determined by the following formulas [11]:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (4)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos kt; \quad (5)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin kt. \quad (6)$$

When studying the unevenness of transportation, n is often taken equal to the number of months in a year, i.e. 12.

Then for different months of the year t in the expressions under the sign of the functions takes the values given in Tabl. 1.

Table 1. The values of trigonometric functions of the parameters of the Fourier series

month	value	month	value
January	0	July	π
February	$\pi/6$	August	$7\pi/6$
March	$\pi/3$	September	$4\pi/3$
April	$\pi/2$	October	$3\pi/2$
May	$2\pi/3$	November	$5\pi/3$
June	$5\pi/6$	December	$11\pi/6$

Taking the number of harmonics k equal to 1, 2, 3 ..., we find all values of $\cos kt$ and $\sin kt$. According to the value of the harmonic, the Fourier series change their form.

When $k = 1$ function (3) takes the form:

$$\hat{y}_l = a_0 + a_1 \cos t + b_1 \sin t. \quad (7)$$

At n

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{12}; \quad a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cos t}{6}; \quad b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin t}{6}. \quad (8)$$

In the case of the second harmonic ($k = 2$):

$$\hat{y}_l = a_0 + a_1 \cos t + b_1 \sin t + a_2 \cos 2t + b_2 \sin 2t, \quad (9)$$

where $a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cos 2t}{6}$; $b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin 2t}{6}$.

In the case of the third harmonic ($k = 3$):

$$\hat{y}_l = a_0 + a_1 \cos t + b_1 \sin t + a_2 \cos 2t + b_2 \sin 2t + a_3 \cos 3t + b_3 \sin 3t, \quad (11)$$

where $a_3 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cos 3t}{6}$; $b_3 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin 3t}{6}$.

The unevenness of transportation can be represented by other dependencies, for example, by an n th degree polynomial:

$$\hat{y}_l = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n, \quad (12)$$

where a_0, a_1, \dots, a_n — unknown parameters.

Finding the parameters a_0, a_1, \dots, a_n is reduced to solving systems of linear equations. In this case, the available database is used: vector y and matrix T . The system of equations is presented in matrix form:

$$T \cdot A = y_t, \quad (13)$$

$$\text{where } T = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^n \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^n \\ 1 & t_3 & t_3^2 & \dots & t_3^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & t_n^2 & \dots & t_n^n \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad y_1 = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}.$$

A system of linear equations with unknowns a_0, a_1, \dots, a_n , is solved in Mathcad using a matrix method:

$$T \cdot T^{-1} \cdot A = y_t \cdot T^{-1}. \quad (14)$$

$$A = y_t \cdot T^{-1}. \quad (15)$$

Conclusions

Mathematical-statistical research of uneven transportation allows: to predict daily and monthly fluctuations in cargo flows; to determine the optimal number of vehicles required to ensure transportation on peak days; to form vehicle operation schedules taking into account seasonal features; to justify the feasibility of using a variable operating mode or a reserve fleet of vehicles; to develop models for optimizing logistics flows that minimize idle and idle runs.

Optimization is carried out by leveling cargo flows (for example, by transferring part of the transportation to less busy days) or by implementing flexible dispatching control systems.

Further research should be directed towards building predictive models using regression analysis and machine learning methods to predict seasonal and daily fluctuations in transport demand.

References

- [1] Kostenko V. M. (2018). *Orhanizatsiia avtomobilnykh perevezen i bezpeka rukhu: Navchalniy posibnik. [Organization of road transportation and traffic safety: Textbook]*. Kyiv: NAU. [in Ukrainian].
- [2] Sakhno V. P., Diachenko Yu. I. (2020). *Planuvannia i upravlinnia transportnyimi protsesami: monohrafiia. [Planning and management of transport processes: Textbook]*. Kharkiv: KhNADU. [in Ukrainian].
- [3] Kim, D. (2025). Long-term forecasting of maritime economics index using time-series decomposition. *Journal of Transportation and Logistics Modeling*. Vol. 12, No. 1. P. 45–59.
- [4] Sultanbek, M., Alimova, Z. (2024). Forecasting the demand for railway freight transportation using hybrid ARIMA–ML models. *Transportation Research Procedia*. Vol. 75. P. 256–265.
- [5] Barzaga, E., Martin, J., Cook, R. (2024) Time series analysis on produce truck load patterns and seasonality in freight transportation. *Journal of Supply Chain Analytics*. Vol. 8, No. 2. P. 87–101.
- [6] Liang, Y., Zhang, W., & Chen, L. (2024). Urban transportation data research overview: trends and statistical modeling approaches. *MDPI Applied Sciences*. Vol. 14, No. 6. P. 1142–1156.
- [7] Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (2024). *Transport Ukrainy: statystychnyi zbirnyk. [Transport of Ukraine: Textbook]*. Kyiv : Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. [in Ukrainian].
- [8] Kostyuk, I., Romanenko, O. (2023). Statistical assessment of freight transport seasonality on Ukrainian highways. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3, No. 5 (129). P. 22–30.
- [9] Smirnov, P., Hlushko, V. (2023). Application of ARIMA and exponential smoothing models for freight traffic forecasting in regional logistics systems. *Transport Problems*. Vol. 18, No. 2. P. 35–47.
- [10] Burlaka, V. P., Kostenko, V. M. (2022). *Matematychni modeliuvannia transportnykh potokiv: monohrafiia. [Mathematical modeling of transport flows: Textbook]*. Kharkiv: KhNADU. [in Ukrainian].
- [11] Diachenko, Yu. I., Sakhno, V. P. (2021). *Planuvannia transportnykh protsesiv: Navchalniy posibnik. [Planning of transport processes: Textbook]*. Kharkiv: KhNADU. [in Ukrainian].

Список використаної літератури

1. Костенко В. М. Організація автомобільних перевезень і безпека руху. Київ: НАУ, 2018. 215 с.
2. Сахно В. П., Дяченко Ю. І. Планування і управління транспортними процесами. Харків: ХНАДУ, 2020. 328 с.
3. Kim, D. Long-term forecasting of maritime economics index using time-series decomposition. *Journal of Transportation and Logistics Modeling*. 2025. Vol. 12, No. 1. P. 45–59.
4. Sultanbek, M., & Alimova, Z. Forecasting the demand for railway freight transportation using hybrid ARIMA–ML models. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 75. P. 256–265.

5. Barzaga, E., Martin, J., & Cook, R. Time series analysis on produce truck load patterns and seasonality in freight transportation. *Journal of Supply Chain Analytics*. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 87–101.
6. Liang, Y., Zhang, W., & Chen, L. Urban transportation data research overview: trends and statistical modeling approaches. *MDPI Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 1142–1156.
7. Державна служба статистики України. Транспорт України : статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики України, 2024. 152 с.
8. Kostyuk, I., Romanenko, O. Statistical assessment of freight transport seasonality on Ukrainian highways. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, No. 5 (129). P. 22–30.
9. Smirnov, P., Hlushko, V. Application of ARIMA and exponential smoothing models for freight traffic forecasting in regional logistics systems. *Transport Problems*. 2023. Vol. 18, No. 2. P. 35–47.
10. Бурлака, В. П., Костенко, В. М. Математичне моделювання транспортних потоків: монографія. Харків: ХНАДУ, 2022. 248 с.
11. Дяченко, Ю. І., Сахно, В. П. Планування транспортних процесів : навчальний посібник. – Харків: ХНАДУ, 2021. 312 с.

Надійшла до редколегії 26.11.2025
Прийнята після рецензування 10.12.2025
Опублікована 22.01.2026