

УДК 656.13(075)

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.10>

Леснікова І. Ю., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Халіпова Н. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5605-6781

Кузьменко А. І., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-7278-3647

Разгонов С. А., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-1244-2047

Лесніков П. В., магістрант факультету інноваційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0009-0657-6303

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Стаття призначена удосконалення пасажирських перевезень на міському електричному транспорті. Розроблено оптимізаційну модель, яка дозволяє оптимально розподілити наявний рухомий склад по маршрутах міста, що дозволить перевезти якомога більше пасажирів, зменшити витрати на експлуатацію та збільшити комфорт для пасажирів на тролейбусних маршрутах м. Дніпро. Проаналізовано ефективність від впровадження даної моделі.

Важливість якості обслуговування пасажирів збільшується в умовах формування ринкового середовища і розвитку конкуренції (між окремими видами транспорту). З розвитком ринку транспортних послуг у споживача (пасажирів) з'явилась можливість вибору найбільш якісного, зручного і безпечного виду перевезень. Пасажир буде обирати той вид транспорту, де якість обслуговування (гарантії ввічливості, доброзичливості, комфортності, швидкості, безпеки і т.д.) найвищі. Вибрані за такими критеріями транспортні підприємства будуть мати більші доходи, прибутки, будуть найбільш конкурентоспроможні.

Мета роботи: розробка заходів з підвищення ефективності перевезення пасажирів на міському електричному транспорті.

У процесі написання статті були виконані наступні завдання: проаналізовано статистичні дані пасажирських перевезень міським електричним транспортом в Україні та в м. Дніпро; розроблено модель оптимального розподілу рухомого складу на маршрутах міського електричного транспорту; розв'язано задачу оптимізації та проаналізовано результати розв'язку.

Розроблена оптимізаційна модель дає змогу оптимізувати кількість рухомого складу, який перевозить наявний пасажиропотік на маршрутах, зменшити експлуатаційні витрати та збільшити рівень комфорту для пасажирів. Також було розраховано основні характеристики деяких маршрутів тролейбусів м. Дніпро; розраховано основні експлуатаційні характеристики цих маршрутів, за якими було визначено інтервали руху тролейбусів, час обертів на маршруті.

В результаті розрахунку оптимізаційної моделі, отримали, що необхідно 52 одиниці рухомого складу, замість 56 (на 8%), середній коефіцієнт комфортності збільшити на 15,7%, вартість години роботи зменшити на 3273,7 грн (8%). Слід зазначити, що зменшення рухомого складу впливає на інтервал руху тролейбусів, але це зменшення відбувається на маршрутах, де велика кількість рухомого складу. Інтервал підвищиться в середньому на 1,5 хвилини, що є прийнятним для очікування пасажирів. Також можна взяти заходи для збільшення швидкості руху тролейбусів, наприклад, виділення смуги для громадського транспорту по пр. Слобожанському.

Ключові слова: пасажирські перевезення, задача оптимізації, міський електричний транспорт.

© І. Ю. Леснікова, Н. В. Халіпова, А. І. Кузьменко, С. А. Разгонов, П. В. Лесніков, 2023

Lesnikova I. Yu., Khalipova N. V., Kuzmenko A. I., Razghonov S. A., Lesnikov P. V. Development of a mathematical model for optimization of technical and operational parameters of urban electric transport

The article is intended to improve passenger transportation by urban electric transport. An optimization model has been developed, which allows to optimally distribute the available rolling stock along the city routes, which will allow transporting as many passengers as possible, reducing operating costs and increasing comfort for passengers on trolleybus routes in Dnipro. The efficiency of the implementation of this model is analyzed.

The importance of the quality of passenger service increases in the context of the formation of a market environment and the development of competition (between individual modes of transport). With the development of the transport services market, the consumer (passenger) has the opportunity to choose the most high-quality, convenient and safe type of transportation. The passenger will choose the mode of transport where the quality of service (guarantees of politeness, friendliness, comfort, speed, safety, etc.) is the highest. Transport companies selected according to such criteria will have higher incomes, profits, and will be the most competitive.

The purpose of the work: development of measures to improve the efficiency of passenger transportation in urban electric transport.

In the process of writing the article, the following tasks were performed: statistical data of passenger transportation by urban electric transport in Ukraine and in the city of Dnipro were analyzed; a model of optimal distribution of rolling stock on the routes of urban electric transport has been developed; The optimization problem has been solved and the results of the solution have been analyzed.

The developed optimization model makes it possible to optimize the number of rolling stock that carries the available passenger traffic on routes, reduce operating costs and increase the level of comfort for passengers. The main characteristics of some trolleybus routes in the city of Dnipro were also calculated; The main operational characteristics of these routes are calculated, according to which the intervals of movement of trolleybuses, the time of rotation on the route were determined.

As a result of the calculation of the optimization model, it was obtained that it is necessary to have 52 units of rolling stock, instead of 56 (by 8%), to increase the average comfort coefficient by 15.7%, to reduce the cost of an hour of work by 3273.7 UAH (8%). It should be noted that the decrease in rolling stock affects the interval of movement of trolleybuses, but this decrease occurs on routes where there is a large number of rolling stock. The interval will increase by an average of 1.5 minutes, which is acceptable for passengers to wait. Measures can also be taken to increase the speed of trolleybuses, for example, the allocation of a lane for public transport on Ave. Slobozhansky.

Key words: passenger transportation, optimization problem, urban electric transport.

Постановка проблеми. Міський електричний транспорт є складовою частиною транспортної мережі України. На сьогоднішній день парк рухомого складу нараховує декілька тисяч одиниць трамваїв та тролейбусів, більшість з яких відпрацювали свій ресурс, а в деяких містах цей показник досягає майже 100%. За останні півтора десяти років кількість рухомого складу міського електротранспорту України зменшився на третину, у зв'язку з чим в окремих містах України відбулося скорочення мережі трамвайних і тролейбусних ліній, при чому потреби міського населення в перевезеннях необхідно задовольняти, адже в Україні міський електротранспорт обслуговує більше 50% внутрішньоміських пасажирських перевезень. Протягом року послугами міського електротранспорту користується більше 2000 млн. пасажирів, з них 50–60% – пільговики різних категорій. При цьому об'єми пасажирських перевезень міським електротранспортом з кожним роком зменшуються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розроблення ключових проблем у сфері організації транспортного обслуговування пасажирів зробили М. Д. Блатнов, Г. А. Варелопуло, Є. П. Володін, В. К. Доля, І. С. Єфремов, О. С. Ігнатенко, Ю. С. Лігум, Л. Б. Міротін, Д. С. Самойлов, В. В. Скалецький, І. В. Спірін, М. Б. Островський, А. В. Панішев, В. П. Поліщук, Г. М. Юн та інші вчені [1].

Проблему розподілу пасажирських переміщень по вулично-дорожній мережі міста досліджували низка вчених, серед яких Грановський Б. І., Горбачов П. Ф., Гецович Є. М., Любий Є. В., Гончаренко С. Ю., Ю. Шеффі, Н. Оппенхайм, Ж. Ортусар та ін. [2–5].

Актуальність даної статті обумовлена тим, що в сучасних умовах потреба населення в переміщеннях задовольняється не повністю і пояснюється такими факторами: великі затрати часу пасажирів на переміщення, потрібне покращення рівня комфортності поїздок і вирішення важливіших актуальних проблем технічного та технологічного забезпечення міського електричного транспорту. Велика тривалість очікування, різке подорожання проїзду, викликають нарікання у місцевого населення.

Мета статті. Метою даної статті є розробка заходів з підвищення ефективності перевезення пасажирів на міському електричному транспорті у м. Дніпро.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізовано статистичні дані пасажирських перевезень міським електричним транспортом в Україні та в м. Дніпро;
- розроблено модель оптимального розподілу рухомого складу на маршрутах міського електричного транспорту;
- розв'язано задачу оптимізації та проаналізовано результати розв'язку.

Важливість якості обслуговування пасажирів збільшується в умовах формування ринкового середовища і розвитку конкуренції (між окремими видами транспорту). З розвитком ринку транспортних послуг

у споживача (пасажира) з'явилась можливість вибору найбільш якісного, зручного і безпечного виду перевезень. Пасажир буде обирати той вид транспорту, де якість обслуговування (гарантії ввічливості, доброзичливості, комфортності, швидкості, безпеки і т.д.) найвищі. Вибрані за такими критеріями транспортні підприємства будуть мати більші доходи, прибутки, будуть найбільш конкурентоспроможні.

Раціональне використання рухомого складу на маршрутах є основним показником ефективності роботи підприємств, адже це є і економічна ефективність роботи підприємства, і перевезення пасажирів в комфортних умовах, недопущення переповненості рухомого складу. Для вирішення такої задачі застосовується оптимізаційна задача з системами обмежень. Щоб створити таку задачу наближену до реальності, необхідно розглянути кожний маршрут окремо, а потім всю систему цілком.

Виклад основного матеріалу. Оптимізацію логістичних рішень здійснюють на основі всебічного аналізу комплексу взаємозалежних чинників, визначення та порівняльної оцінки можливих альтернатив і допустимих планів дій [5].

Для знаходження розв'язку оптимізаційної логістичної задачі використовують економіко–математичні методи моделювання та оптимізації, а також обчислювальну техніку та необхідне програмне забезпечення.

Процес оптимізації логістичних рішень із використанням економіко–математичного інструментарію складається з таких основних етапів: усвідомлення проблемної ситуації, формулювання цілі та визначення обмежень; розробка економіко–математичної моделі; вибір методів і програмних засобів для проведення розрахунків; підготування вихідної інформації; пошук і аналіз варіантів рішення; ухвалення рішення та затвердження плану його реалізації; контроль за виконанням рішення й оцінка результатів; підсумковий аналіз проблемної ситуації та її переосмислення (з поверненням до першого етапу).

Отже, оптимізацію логістичних рішень слушно розглядати скоріше як циклічний процес, що постійно відновлюється, а не лише як окремий акт цього процесу. Знаходять розв'язок оптимізаційної логістичної задачі з використанням спеціальних математичних методів оптимізації, комп'ютерних програм та засобів обчислювальної техніки на основі належної вихідної інформації.

Найчастіше оптимізаційні логістичні задачі є багатовимірними та в узагальненій формі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} y = f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \max (\min) \\ g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0, \quad i = \overline{1, m} \\ h_k(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad k = \overline{1, p} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x_1, \dots, x_n та y – дійсні змінні (керовані параметри), перші n з яких є основними та утворюють план $x = (x_1, \dots, x_n)$ задачі, а остання показує відповідне значення цільової функції; $f, g_i, i = \overline{1, m}, h_k, k = \overline{1, p}$, – числові функції змінних x_1, \dots, x_n .

Характеристики маршрутів які підлягають дослідженню

Для визначення характеристик тролейбусних маршрутів було взято маршрути, які обслуговує тролейбусне депо № 1 м. Дніпра. Це маршрути: 2, 3, 47, 10, 12, 14, 15, 17, 20. Основні характеристики маршрутів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики тролейбусних маршрутів

№ маршруту	2	3	7	10	12	14	17	20
Характеристика	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Розташування першої кінцевої зупинки	вул. Глінки	вул. Холодильна	вул. Холодильна	пл. Соборна	вул. Глінки	вул. Глінки	ж/м Калиновський6	ж/м Лівобережний3
Розташування другої кінцевої зупинки	ж/м Парус2	пл. Старомостова	вул. Глінки	ж/м Перемога5	ж/м Перемога5	ж/м Сонячний	вул. Глінки	вул. Глінки
Максимальний пасажиропотік у годину "пік", $Q, z_{j,1}$	840	742	161	405	708	216	407	1208
Довжина прямого маршруту	6,14	5,67	4,32	3	4,57	2,2	4,7	6,1
Довжина зворотного маршруту	6,3	5,67	4,65	3,22	4,77	2,05	4,6	5,8
Довжина маршруту	12,44	11,34	8,97	6,22	9,34	4,25	9,3	11,9
Довжина прямої повітряної ділянки	10,36	6,91	7,12	4,37	6,08	2,42	6,41	7,55

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість зупинок прямого маршруту	19	17	14	13	18	6	15	19
Кількість зупинок зворотного маршруту	18	16	12	12	17	6	16	18

Схеми маршрутів наведено на рис. 1–8.



Рис. 1. Схема маршруту № 2

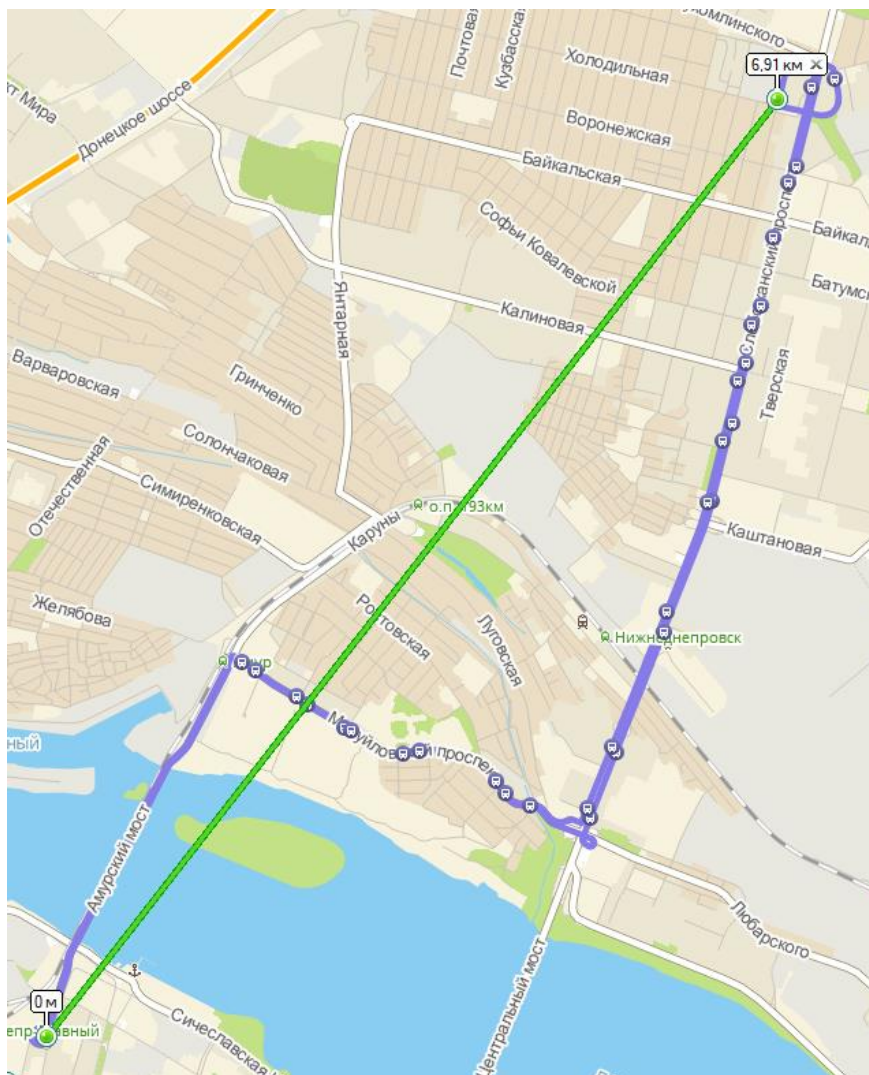


Рис. 2. Схема маршруту № 3

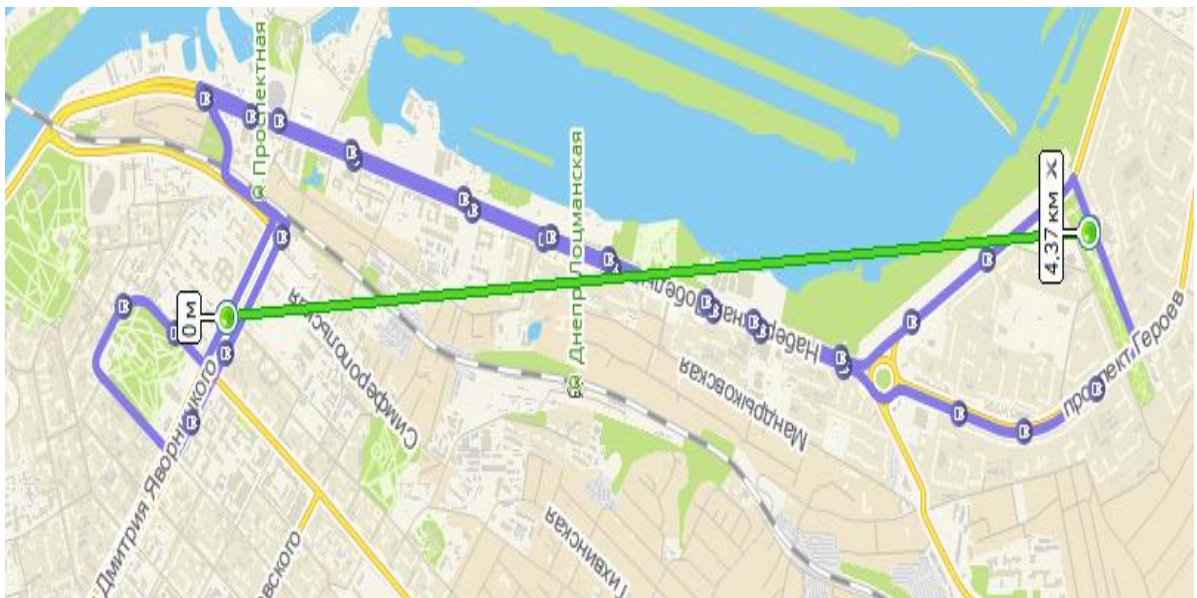


Рис. 3. Схема маршруту № 7

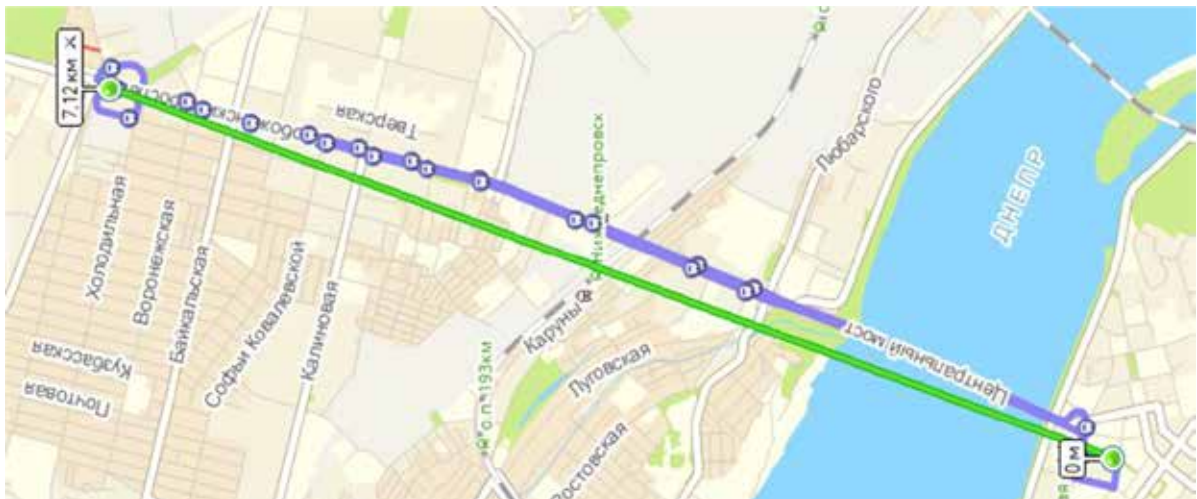


Рис. 4. Схема маршруту № 10



Рис. 5. Схема маршруту № 12

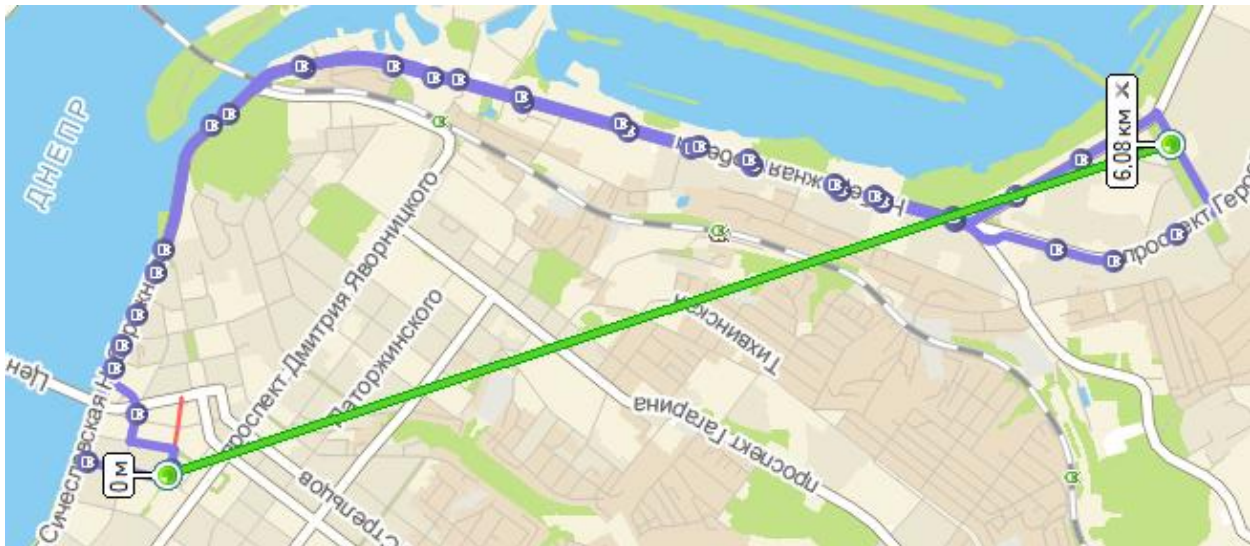


Рис. 6. Схема маршруту № 14



Рис. 7. Схема маршруту № 17

До основних експлуатаційних характеристик маршруту належить:
 1. Коефіцієнт непрямолінійності маршруту:

$$k_{\text{непр}} = \frac{L_M}{L_{\text{вл}}}, \quad (2)$$

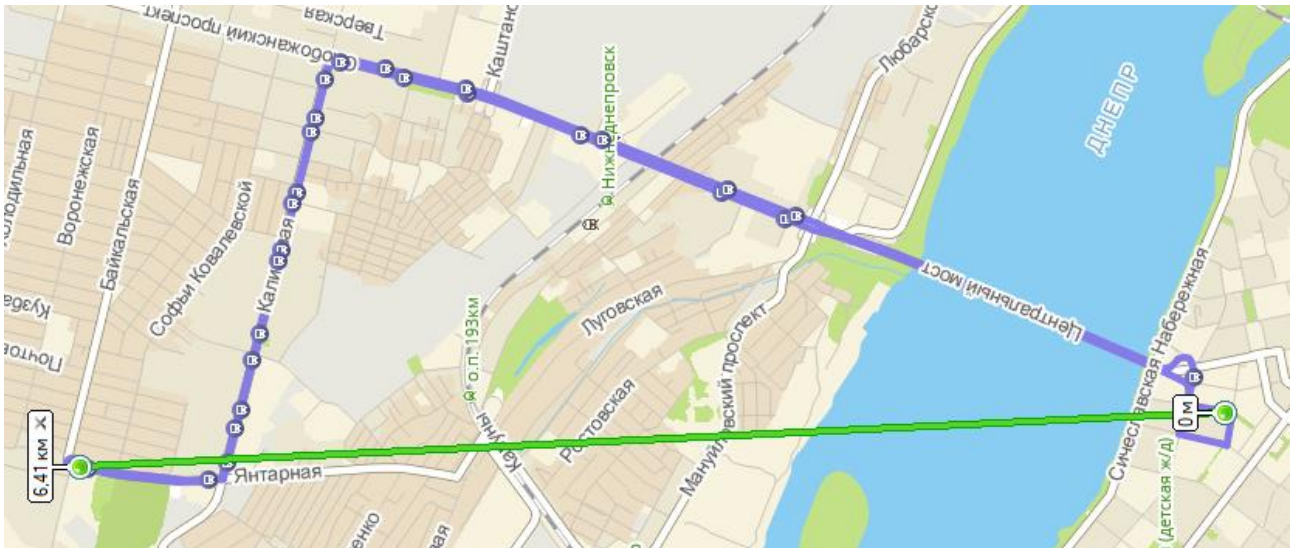


Рис. 8. Схема маршруту № 20

де $L_{вл}$ – відстань між кінцевими пунктами по повітряю, км.

2. Час рейсу тролейбуса в прямому $np\ tp$ та зворотному $tp\ зв$ напрямку розрахувати за залежністю, хв.:

$$t_p^{np} = \frac{60 \cdot L_{нз}^{np}}{V_m} + n_{нз}^{np} \cdot t_{нз} + t_{кз}, \quad (3)$$

$$t_p^{зв} = \frac{60 \cdot L_{м}^{зв}}{V_m} + n_{нз}^{зв} \cdot t_{нз} + t_{кз}, \quad (4)$$

де V_m – технічна швидкість тролейбуса, км/год.;

$n_{нз}^{np}, n_{нз}^{зв}$ – кількість проміжних зупинок на маршруті відповідно упрямому та зворотному напрямках, од.;

$t_{нз}$ – час простою на проміжній зупинці, хв.;

$t_{кз}$ – час простою на кінцевій зупинці, хв.

3. Час оборотного рейсу тролейбуса дорівнює, хв.:

$$t_{об} = t_p^{np} + t_p^{зв}. \quad (5)$$

4. Час сполучення за оборотний рейс, хв.:

$$t_c^{об} = t_{об} - 2 \cdot t_{кз}. \quad (6)$$

5. Експлуатаційна швидкість V_e тролейбуса, км/год.:

$$V_e = \frac{60 \cdot (L_m^{np} + L_m^{зв})}{t_{об}}. \quad (7)$$

6. Швидкість сполучення V_c тролейбуса, км/год.:

$$V_c = \frac{60 \cdot (L_m^{np} + L_m^{зв})}{t_c^{об}}. \quad (8)$$

7. Необхідна кількість тролейбусів A на маршруті у годину «пік», од.:

$$A = \frac{Q_{max} \cdot t_{об}}{60 \cdot q_n}, \quad (9)$$

де Q_{max} – максимальний пасажиропотік у годину «пік», пас.;

q_n – номінальна пасажиромісткість тролейбуса, пас. (табл. 2)

8. Інтервал руху тролейбусів I у годину «пік», хв.:

$$I = \frac{t_{об}}{A} \quad (10)$$

Результати розрахунків основних експлуатаційних характеристик

№ маршруту	2	3	7	10	12	14	17	20
Характеристика								
Коефіцієнт непрямолінійності	1,20	1,64	1,26	1,42	1,54	1,76	1,45	1,58
t пр р, хв	46,03	42,26	34,20	28,25	39,14	18,25	36,63	45,88
t зв р, хв	45,63	41,26	33,44	28,08	38,89	17,69	37,25	43,75
t об, хв	91,65	83,53	67,64	56,33	78,03	35,94	73,88	89,63
t с об, хв	83,65	75,53	59,64	48,33	70,03	27,94	65,88	81,63
V е, км/год	8,14	8,15	7,96	6,63	7,18	7,10	7,55	7,97
V с, км/год	8,92	9,01	9,02	7,72	8,00	9,13	8,47	8,75
A, штук	7	7	3	6	9	3	4	14
I, хв	13,09	11,93	22,55	9,39	8,67	11,98	18,47	6,40

Системи лінійних нерівностей представляють собою кількісні характеристики пасажиропотоків на маршрутах, місткість різних типів рухомого складу, їх комфортність, вартість години роботи. Для кожного маршруту будується окрема система лінійних нерівностей, виходячи з даних, а потім об'єднуються в одну.

Функція мети показує нам мінімізацію кількості рухомого складу тролейбусів на маршрутах у відповідності до заданих обмежень

$$F = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{21} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{22} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{23} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{31} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{32} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{33} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{41} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{42} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{43} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{71} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{72} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{73} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{101} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{102} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{103} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{121} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{122} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{123} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{141} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{142} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{143} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{151} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{152} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{153} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{171} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{172} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{173} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \geq z_{201} \\ b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \leq z_{202} \\ c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \geq z_{203} \\ x_1 \leq 45; \\ x_2 \leq 25 \\ x_3 \leq 13 \\ x_4 \leq 5 \\ x_5 \leq 3 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in Z \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0 \end{cases}$$

де x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кількість рухомого складу, де x_1 – кількість тролейбусів моделі ЮМЗ Т2, наявних в тролейбусному депо № 1; x_2 – кількість тролейбусів моделі Дніпро Т203, наявних в тролейбусному депо № 1; x_3 – кількість тролейбусів моделі БКМ-321, наявних в тролейбусному депо № 1; x_4 – кількість тролейбусів моделі Дніпро Т103, наявних в тролейбусному депо № 1; x_5 – кількість тролейбусів моделі ЗіУ-682Г, наявних в тролейбусному депо № 1

a_i – місткість i -го типу рухомого складу (5 чол/м²). $i=1$ – місткість тролейбусу моделі ЮМЗ Т2, $i=2$ – місткість тролейбусу моделі Дніпро Т203, $i=3$ – місткість тролейбусу моделі БКМ-321, $i=4$ – місткість тролейбусу моделі Дніпро Т103, $i=5$ – місткість тролейбусу моделі ЗіУ-682Г. Дані отримані з технічних характеристик тролейбусів (табл. 2).

b_i – вартість години роботи i -го типу рухомого складу для кожної моделі тролейбусу [6].

c_i – коефіцієнт комфортності i -го типу рухомого складу для кожної моделі тролейбусу [6].

$z_{j,1}$ – пасажиропотік на j -му маршруті (табл. 2.1).

$z_{j,2}$ – вартість роботи на j -му маршруті [6].

$z_{j,3}$ – коефіцієнт комфортності на j -му маршруті [6].

Підставимо отримані з розрахунків дані у формулу 2.1, отримаємо економіко-математичну модель:

$$F = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \rightarrow \min$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 840 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 13406,4 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 12,1 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 742 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 11842,32 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 9,5 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 156 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 2489,76 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 2,6 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 161 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 2569,56 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 2 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 405 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 6463,8 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 7 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 708 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 11299,68 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 9,1 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 216 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 3447,36 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 4,1 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 90 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 1436,4 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 1 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 407 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 6495,72 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 4 \\ 100x_1 + 100x_2 + 115x_3 + 108x_4 + 98x_5 \geq 1208 \\ 1187,9x_1 + 954,1x_2 + 871,5x_3 + 1082,9x_4 + 1085,7x_5 \leq 19279,68 \\ x_1 + 1,5x_2 + 1,5x_3 + 1,3x_4 + x_5 \geq 14,6 \\ x_1 \leq 45; x_2 \leq 25; x_3 \leq 13; x_4 \leq 5; x_5 \leq 3 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in Z \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

№ п/п	Коефіцієнти при x					Одержані обмеження	Задані обмеження	Маршрут
	x1	x2	x3	x4	x5			
1	100	100.00	115	108	98	908	840	
2	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	8715.7	13406.4	
3	1	1.5	1.5	1.3	1	13	12.1	2
4	100	100.00	115	108	98	777	742	
5	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	6946	11842.32	
6	1	1.5	1.5	1.3	1	10	9.5	3
7	100	100.00	115	108	98	230	156	
8	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	1743	2489.76	
9	1	1.5	1.5	1.3	1	3	2.6	4
10	100	100.00	115	108	98	198	161	
11	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	2040	2569.56	
12	1	1.5	1.5	1.3	1	3	2	7
13	100	100.00	115	108	98	560	405	
14	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	4674	6463.8	
15	1	1.5	1.5	1.3	1	7	7	10
16	100	100.00	115	108	98	713	708	
17	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	6728	11299.68	
18	1	1.5	1.5	1.3	1	10	9.1	12
19	100	100.00	115	108	98	300	216	
20	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	2862	3447.36	
21	1	1.5	1.5	1.3	1	5	4.1	14
22	100	100.00	115	108	98	115	90	
23	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	872	1436.4	
24	1	1.5	1.5	1.3	1	2	1	15
25	100	100.00	115	108	98	415	407	
26	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	4435	6495.72	
27	1	1.5	1.5	1.3	1	5	4	17
28	100	100.00	115	108	98	1213	1208	
29	1187.9	954.1	871.5	1082.9	1085.7	11966	19279.68	
30	1	1.5	1.5	1.3	1	17	14.6	20

Рис. 9. Вихідні дані в середовищі MS Excel (Скрин екрана)

Параметри розв'язувача

Оптимізувати цільову функцію:

До: Максимум Мінімум Значення:

Змінюючи клітинки змінних:

Підлягає обмеженням:

\$C\$40:\$G\$40 = ціле
 \$C\$40:\$G\$49 = ціле
 \$C\$50 <= 45
 \$D\$50 <= 25
 \$E\$50 <= 13
 \$F\$50 <= 5
 \$G\$50 <= 3
 \$H\$10 <= \$I\$10
 \$H\$11 >= \$I\$11
 \$H\$12 >= \$I\$12
 \$H\$13 <= \$I\$13
 \$H\$14 >= \$I\$14
 \$H\$15 >= \$I\$15

Зробити необмежені змінні не від'ємними

Виберіть метод розв'язання:

Метод розв'язання
 Для розв'язання гладких нелінійних задач виберіть розв'язувач нелінійних задач за методом зведеного градієнта. Для розв'язання лінійних завдань виберіть розв'язувач за симплекс-методом, для негладких завдань виберіть розвиваний розв'язувач.

Довідка

Рис. 10. Розв'язання задачі в середовищі MS Excel (Скрин екрана)

Функція мети		1	1	1	1	1	52
		X1	X2	X3	X4	X5	
1	2	0	8	0	1	0	9
2	3	0	0	3	4	0	7
3	4	0	0	2	0	0	2
4	7	0	1	0	0	1	2
5	10	1	0	4	0	0	5
6	12	0	5	1	0	1	7
7	14	0	3	0	0	0	3
8	15	0	0	1	0	0	1
9	17	3	0	1	0	0	4
10	20	2	8	1	0	1	12
		6	25	13	5	3	

Рис. 11. Результат розрахунку в середовищі Excel

Порівняємо результати з наявним станом. Порівняння наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння

Номер маршруту	Дані 01.12.2021 [6]			Оптимізація		
	Кількість од.	$Z_{i,z}$, середній коефіцієнт комфортності	Вартість години роботи, грн	Кількість од.	Середній коефіцієнт комфортності	Вартість години роботи, грн
2	10	1,33	13090,7	9	1.37	8715.7
3	8	1,17	10013.5	7	1.38	6936
3	1	1,3	1082.9	2	1.5	1733
7	2	1	2375.8	2	1.25	2030
10	5	1,3	5003.3	5	1.3	3673
12	8	1,28	7277.9	7	1.32	6728
13	3	1,33	3076.8	3	1.5	2862
15	1	1	1178.9	1	1.5	875.1
17	5	1	7127.3	3	1.12	3335
20	13	1,21	17122	12	1.38	11966
Всього	56	1.203	55259.5	52	1.392	50983.8

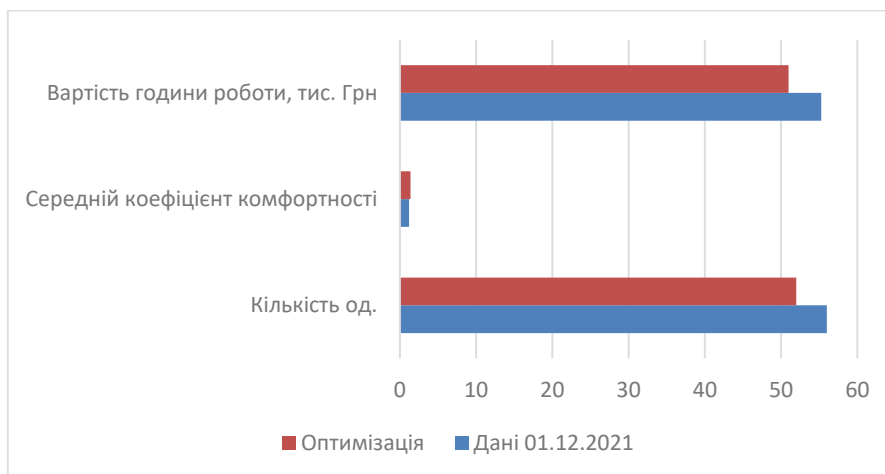


Рис. 12. Порівняння отриманих результатів

Висновки з даного дослідження та перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Виходячи з розрахунків завдяки оптимізації на всіх маршрутах можна скоротити кількість рухомого складу на 3 одиниці (на 8%), середній коефіцієнт комфортності збільшити на 15,7%, вартість години роботи зменшити

на 3273,7 грн (8%). Слід зазначити, що зменшення рухомого складу впливає на інтервал руху тролейбусів, але це зменшення відбувається на маршрутах, де велика кількість рухомого складу. Різниця між інтервалами наведена в таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняння інтервалів руху тролейбусів

Маршрут	Дані на 01.12.2021			Після оптимізації		
	Кількість одиниць, шт.	Час оборотного рейсу, хв	Інтервал, хв	Кількість одиниць, шт.	Час оборотного рейсу, хв	Інтервал, хв
2	10	92	9,2	9	92	10
3	8	83	10,5	7	83	12
12	8	78	10	7	78	11
17	5	73	15	3	73	19
20	13	90	7	12	90	7,5

Відповідно до розрахунків інтервал підвищиться в середньому на 1,5 хвилини, що є прийнятним для очікування пасажирів. Також можна вжити заходи для збільшення швидкості руху тролейбусів, наприклад, виділення смуги для громадського транспорту по пр. Слобожанському.

Розглянемо структуру рухомого, який виходить на маршрут та після оптимізації (табл 5, рис. 13, 14).

Таблиця 5

Рухомий склад

Маршрут	На 01.12.2021					Після оптимізації				
	ЮМЗ Т2	ДНІ-ПРО Т203	АКСМ-321	ДНІ-ПРО Т-103	ЗіУ-682	ЮМЗ Т2	ДНІ-ПРО Т203	АКСМ-321	ДНІ-ПРО Т-103	ЗіУ-682
2	3	6	3	0	0	0	8	0	1	0
3	5	2	0	2	0	0	0	3	3	0
3	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0
7	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1
10	1	3	0	0	0	1	0	3	0	0
12	2	3	0	0	1	0	5	1	0	1
13	0	2	0	1	1	0	3	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
17	6	0	0	0	0	3	0	1	0	0
20	9	3	3	0	0	2	8	1	0	1
Всього	30	22	6	3	2	6	25	13	5	3



Рис. 13

Розподіл рухомого складу після оптимізації

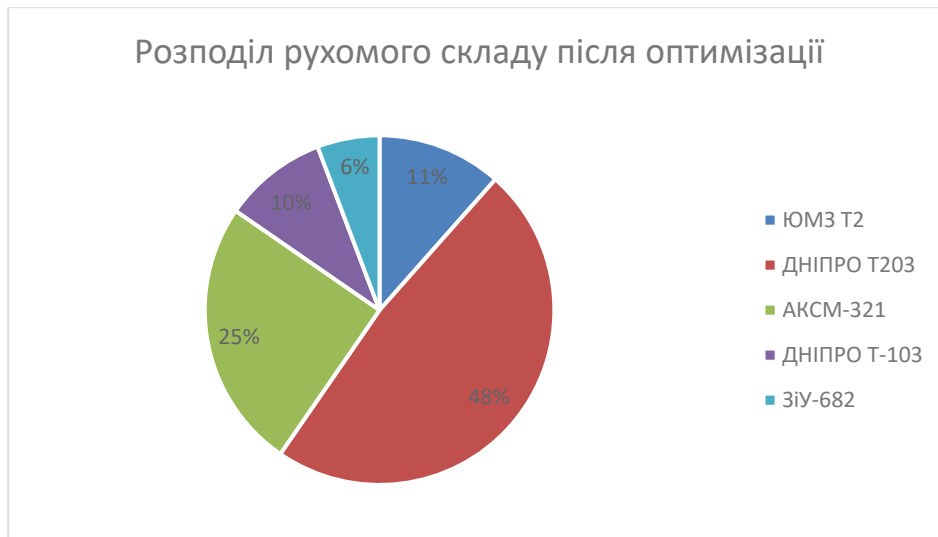


Рис. 14

Виходячи з графіків можна побачити, що зараз старий рухомий склад (тролейбуси ЗІУ-682 і ЮМЗ Т2) складає 50%, за підсумками оптимізації маємо, що старий рухомий склад складає 17%, це означає, що новий рухомий склад необхідно випускати максимум, який наявний в депо, а старий рухомий склад використовувати, як підмінний рухомий склад, якщо який троллейбус зламався або йому потрібні регламентні роботи (ТО-1, ТО-2, СР, КР).

Дана оптимізаційна модель дуже гнучка і може легко змінюватись у зв'язку з невизначеністю пасажиропотоків у місті (сезонність, дні тижня, карантинні обмеження), невизначеність економічної ситуації (зміна вартості енергоносіїв, зміна вартості імпортованих запчастин для рухомого складу, інфляційні процеси), що впливає на собівартість перевезень.

Список використаних джерел:

1. Григорова Т. М. Теоретичні основи організації маршрутних автобусних перевезень у приміському сполученні: дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.22.01. Харків, Харків. держав. ун-т міськ. гос-ва ім. О.М. Бекетова, Григорова Тетяна Михайлівна, 2016, 348 с.
2. Горбачов П. Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ. 2009. № 27. С. 210–214.
3. Любий Є. В. Підхід щодо формування транспортної моделі системи пасажирського транспорту в малих містах. Вісник економіки транспорту і промисловості: Проблеми транспортного комплексу України. Харків. 2016., № 55. 191 с. URL : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:CoWg5ynzuiEJ:btie.kart.edu.ua/article/download/83395/78750+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua> (дата звернення 13.10.21)
4. Sheffi Y. Urban Transportation Networks. : Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Engelwood Cliffs: Prentice-Hall, 1985. 415 p. сайт. URL : http://web.mit.edu/sheffi/www/selectedMedia/sheffi_urban_trans_networks.pdf (дата звернення 11.09.21)
5. Леснікова І.Ю., Халіпова Н.В, Кузьменко А.І., Разгонов С.А., Новицький Є.М., Лесніков П.В, Чіхун Д.А., Шевчук К.А., Єрмакова Л.П., Горуля М.М., Черніков Д.О. Розробка методики розрахунку техніко-економічних показників роботи електротранспорту на маршруті. Грааль науки: SCIENTIFIC VECTOR OF VARIOUS SPHERE' DEVELOPMENT: REALITY AND FUTURE TRENDS, 2023. № 33. С. 221–243. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.37>
6. Статистика транспорту Дніпра. URL: <http://kstat.pp.ua/dpstat/?action=list&date=2021-12-01>.

References:

1. Hryhorova, T. M. (2016). Teoretychni osnovy orhanizatsii marshrutnykh avtobusnykh perevezen u prymyskomu spoluchenni: dys. na zdobuttia nauk. stupenia dokt. tekhn. nauk: 05.22.01. Kharkiv, Kharkiv. derzhav. un-t misk. hos-va im. O.M. Beketova, Hryhorova Tetiana Mykhailivna, 348 s.
2. Horbachov, P. F. (2009). Nova kontseptsiiia modeliuвання potreb naseleння u trudovykh peresuvanniakh miskym pasazhyrskym transportom. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*. Dnipropetrovsk. № 27. S. 210–214.
3. Liubiy, Ye. V. (2016). Pidkhid shchodo formuvannya transportnoi modeli systemy pasazhyrskoho transportu v malykh mistakh. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti: Problemy transportnoho kompleksu Ukrainy*.

Kharkiv. № 55. 191 s. URL: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:CoWg5ynzuiEJ:btie.kart.edu.ua/article/download/83395/78750+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua> (last accessed 13.10.21)

4. Sheffy, Y. (1985). *Urban Transportation Networks. : Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Engelwood Cliffs: Prentice-Hall, 415 p. URL : http://web.mit.edu/sheffi/www/selectedMedia/sheffi_urban_trans_networks.pdf (last accessed 11.09.21)

5. Lesnikova I.Iu., Khalipova N.V, Kuzmenko A.I., Razghonov S.A., Novytskyi Ye.M., Lesnikov P.V, Chikhun D.A., Shevchuk K.A., Yermakova L.P., Horulia M.M., Chernikov D.O. Rozrobka metodyky rozrakhunku tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv roboty elektrotransportu na marshruti. Hraal nauky: SCIENTIFIC VECTOR OF VARIOUS SPHERE' DEVELOPMENT: REALITY AND FUTURE TRENDS, 2023. № 33. S. 221–243. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.37>

6. Statystyka transportu Dnipra. URL: <http://kstat.pp.ua/dpstat/?action=list&date=2021-12-01>.