

Про задачу ефективного розподілу робіт між наявною технікою при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

On the problem of efficient task distribution among available equipment during the elimination of emergency situations

Сергій Бісик^A

д.т.н. професор, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

Володимир Богомаз^B

кандидат фізико-математичних наук, доцент, e-mail: wbogomas@i.ua, ORCID: 0000-0001-5913-2671

Олег Арістархов^A

* **Corresponding author:** доктор філософії, e-mail: aristarkhovoleh@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2064-4121

Микола Боренко^B

магістр, e-mail: bmw1961@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9578-3906

Андрій Борисенко^B

магістр, e-mail: andrbor81@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0363-3834

Serhiy Bisik^A

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

Volodymyr Bohomaz^B

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: wbogomas@i.ua, ORCID: 0000-0001-5913-2671

Oleh Aristarkhov^A

* **Corresponding author:** Doctor of Philosophy, e-mail: aristarkhovoleh@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2064-4121

Mykola Borenko^B

master, e-mail: bmw1961@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9578-3906

Andriy Borysenko^B

master, e-mail: andrbor81@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0363-3834

^A Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^B Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

^A National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

Received: July 6, 2023 | Revised: August 19, 2023 | Accepted: August 31, 2023

DOI: 10.33445/sds.2023.13.4.4

Мета роботи: побудувати математичну моделі задачі ефективного розподілу робіт між наявною технікою на одному об'єкті відновлення, розроблення алгоритму розв'язування задач такого типу та побудова множини її ефективних розв'язків на конкретному прикладі.

Метод дослідження: моделювання, системного аналізу.

Результати дослідження: побудовано математичну модель задачі ефективного розподілу робіт між наявною технікою на одному об'єкті відновлення, розроблено алгоритм розв'язування задач такого типу та побудова множини її ефективних розв'язків.

Теоретична цінність дослідження: результати проведеного дослідження доцільно застосовувати при плануванні роботи по відновленню об'єктів транспортної інфраструктури та об'єктів критичної інфраструктури, які пов'язані з переміщенням великих об'ємів земляних мас.

Цінність дослідження: В роботі побудовано математичну модель задачі ефективного розподілу робіт між наявною технікою на одному об'єкті відновлення при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. В моделі враховано задані кількості видів екскаваторів та кожного з видів екскаваторів, умову обмеженості кількості транспортних засобів для кожного виду екскаваторів, яка породжує час простою останніх.

Обмеження дослідження: обмеження дослідження полягає у використанні інформації, що перебуває у вільному доступі.

Тип статті: теоретична.

Purpose: to construct a mathematical model of the problem of efficient task distribution among available equipment at a single recovery site, develop an algorithm for solving such problems, and generate a set of efficient solutions using a specific example.

Method: modeling, system analysis.

Findings: the mathematical model has been constructed for the problem of efficient task distribution among available equipment at a single recovery site. The algorithm has been developed to solve problems of this type, and a set of efficient solutions has been generated.

Theoretical implications: the results of the conducted research are beneficial for application in planning the restoration work of transportation infrastructure objects and critical infrastructure objects associated with the movement of large volumes of earth masses.

Value: The study presents a mathematical model for the problem of efficient task distribution among available equipment at a single recovery site during the elimination of emergency situations. The model takes into account the specified quantities of excavator types and each type's constraint on the number of transportation vehicles, which affects the idle time of the latter.

Limitations of the study: The limitation of the study lies in the usage of information that is freely available.

Paper type: theoretical.

Ключові слова: екскаваторний комплекс, відновлення, час простою, автосамоскиди.

Key words: excavator complex, restoration, idle time, dump trucks.

1. Вступ

Відповідно до чинного законодавства України [1] Державна спеціальна служба транспорту (далі – служба) є спеціалізованим військовим формуванням, що входить до системи Міністерства оборони України, призначеним для забезпечення стійкого функціонування транспорту в мирний час та в особливий період.

До основних завдань діяльності служби відноситься: відбудова транспортних комунікацій та об'єктів критичної інфраструктури, порушених унаслідок надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, аварій і катастроф.

Під об'єктами національної транспортної системи України розуміють сукупність різновидів транспортних засобів та розгалужену інфраструктуру для надання всього комплексу транспортних послуг.

При відновленні об'єктів транспортної інфраструктури підрозділи служби можуть бути задіяні на будь-якій території держави. Прикладами визначених об'єктів можуть бути: автомобільні дороги, залізничні колії, мости, переправи, шляхопроводи, які потребують відновлення внаслідок надзвичайних ситуацій або бойових дій. Для відновлення або будови вищезазначених об'єктів зазвичай проводиться великий об'єм робіт, зокрема по переміщенню земляних мас, для виконання якого залучаються так звані екскаваторні комплекси. Основними машинами їх є екскаватори та транспортні засоби (автосамоскиди).

В умовах збройної агресії російської федерації проти України застосування подібних комплексів проводилось на багатьох зруйнованих в результаті бойових дій об'єктах транспортної інфраструктури в зоні відповідальності підрозділів служби (Житомирська, Київська, Чернігівська, Харківська, Херсонська, Миколаївська області), зокрема, при будівництві тимчасового мостового переходу на ближньому обході через річку Сіверський Донець поблизу населеного пункту Співаківка Харківської області (рис. 1) та при капітальному ремонті автомобільного мостового переходу через річку Оскіл Харківської області. На останньому для відновлення руху замість двох зруйнованих берегових прогонів споруджено земляний насип за допомогою екскаваторного комплексу (рис. 2).

Шляхи пересування від місця розміщення підрозділу до об'єктів відновлення відрізняються як за довжиною, так і за якістю покриття доріг, що безпосередньо впливає на вартість транспортування техніки у зазначений район виконання відновлювальних робіт.



Рисунок 1 – Спорудження насипу підходів до мосту будівництві тимчасового мостового переходу на ближньому обході через річку Сіверський Донець



Рисунок 2 – Відсіпка земляного насипу при капітальному ремонті автомобільного мостового переходу через річку Оскіл Харківської області

Таким чином, задача розподілення об'ємів робіт при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій між наявною технікою підрозділу для виконання відновлювальних робіт на визначеному об'єкті інфраструктури є актуальною.

Подібні задачі, які стосуються визначення плану оптимального розміщення замовлень на залізничних підприємствах для виробництва вагонів або локомотивів, розглядались в [2, 3]. Питання організації процесу ущільнення відсіпаної призми земляного полотна комплектом машин розглядались в [4]. Окремі варіанти транспортних задач розглядались раніше у роботах авторів [5]. Однорідна задача ефективного розподілу об'ємів робіт для екскаваторних комплексів підприємства розглядалась автором в роботах [5, 6], але в ній розглянуто випадок, коли для відновлення об'єкту задіяно два види екскаваторів (без врахування кількості кожного виду) та припускається, що є можливість залучити необхідну кількість автосамоскидів для кожного з типів екскаваторів. Отже, дослідження подібних задач зі збільшенням кількості видів екскаваторів (а також кількості кожного з них) та врахування наявних обмежень кількості техніки в підрозділі, які породжують певний час простою екскаваторних комплексів, є досить актуальним.

2. Теоретичні основи дослідження

Теоретичною основою дослідження стала математична оптимізація, а саме лінійне програмування. Методичний підхід ґрунтується на параметризації обраних показників якості (час та вартість виконання робіт) для досягнення необхідних (прогнозованих) об'ємів земляних робіт. При цьому множина необхідних (прогнозованих) об'ємів земляних робіт враховує продуктивність підрозділу, наявну техніку та її тип й часові обмеження.

3. Постановка проблеми

В умовах оборони територіальної цілісності України значну роль відіграють ресурси, що доступні для підтримання відповідного рівня боєздатності (спроможностей) частин і підрозділів. Ключовим при цьому є раціональне використання наявних ресурсів та часові показники виконання поставлених завдань. Застосування при плануванні відновлення чи будівництва нових об'єктів інфраструктури апробованих математичних моделей оцінки часу та вартості виконання завдання з урахуванням наявної техніки в підрозділі дозволить скоротити час на сам процес планування а також вибрати раціональний розподіл наявних сил і засобів для максимального підвищення ефективності виконання поставленого завдання. Це потребує розроблення математичної моделі задачі ефективного розподілу робіт між наявною

технікою на одному об'єкті відновлення, розроблення алгоритму розв'язування задач такого типу та побудову множини її ефективних розв'язків на конкретному прикладі.

4. Методологія дослідження

Методичний підхід ґрунтується на розв'язанні задачі лінійного програмування з двома показниками якості: час та вартість виконання завдань. Для розглянутої задачі побудовано множину припустимих об'ємів робіт кожного екскаваторного комплексу, яка являє собою відрізок в просторі. В якості чисельного прикладу розглянуто задачу з трьома типами екскаваторів. Для його розв'язування побудовано програму для розрахунку в системі аналітичних розрахунків Maple, за допомогою якої визначено множину ефективних розв'язків, графічну і аналітичну залежність вартості виконання робіт від часу, витраченого для цього.

5. Результати

Нехай є один об'єкт відновлення з відповідним об'ємом робіт V екскаваторними комплексами та в підрозділі є n типів екскаваторів з відповідними продуктивностями Π_i , $i = \overline{1, n}$. Відстань від місця підрозділу до відповідного об'єкту відновлення позначимо L . Зазначимо, що наявні екскаватори двох типів:

- на колісному ході (пересуваються самостійно);
- на гусеничному ході (пересуваються на тралах з тягачем).

Схема руху техніки екскаваторного комплексу приведена на рис. 3. Техніка (екскаватори, автосамоскиди) пересувається з місця дислокації підрозділу до місця розробки ґрунту екскаваторами, який знаходиться на відстані L . Екскаватори знаходяться на об'єкті розробки ґрунту (насип, резерв), розробляють ґрунт та навантажують його на автосамоскиди, які в свою чергу транспортують його на місце відсіпання земляного полотна об'єкту відновлення та повертаються під завантаження на місце розробки ґрунту екскаватором.

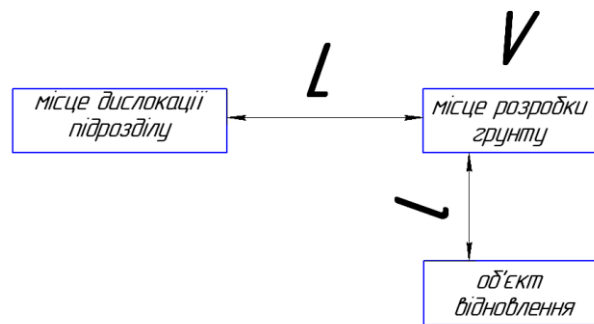


Рисунок 3 – Схема руху техніки екскаваторного комплексу

Нехай x_i – об'єм земляних робіт, виконаний i -им типом екскаватору на об'єкті відновлення. При цьому мають виконуватись обмеження:

$$\sum_{i=1}^n x_i = V; \quad x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Умова (1) означає, що сума об'ємів земляних робіт, розділених між n типами екскаваторів має дорівнювати сумарному об'єму робіт V на об'єкті відновлення.

Час виконання завдань на об'єкті з урахуванням часу транспортування комплексів до місця розробки ґрунту знаходиться за формулою:

$$t = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{x_i}{V_i} + \frac{L}{v} \right\}, \quad (2)$$

де v – середня швидкість пересування техніки на об'єкт (будемо вважати, що середня швидкість не змінюється при різних типах екскаватору), км/год.

Попередня формула є вірною у випадку, коли екскаваторний комплекс в достатній мірі укомплектовано автосамоскидами та виконуються наступна умова: потрібна кількість автосамоскидів має бути не менше наступної величини [8]:

$$N_A = \frac{t_y}{t_{наг}}, \quad (3)$$

t_y – час циклу перевезення автосамоскидом, год;

$$t_y = t_{наг} + \frac{l}{v_{зxi}} + t_p + t_{ман} + \frac{l}{v_{пxi}}, \quad (4)$$

де l – дальність транспортування ґрунту від місця розробки ґрунту до об'єкту відновлення, км;

$v_{зxi}$ – швидкість руху завантаженого автосамоскида, який об'єднаний в комплексі з i -им типом екскаватора, км/год;

$v_{пxi}$ – швидкість руху порожнього автосамоскида, який об'єднаний в комплексі з i -им типом екскаватора, км/год;

t_p – час розвантаження (приймається 1 хв.), год;

$t_{ман}$ – час маневрів (приймається 0,5-1 хв.), год;

час навантаження автосамоскида, який об'єднаний в комплексі з i -им типом екскаватора, год:

$$t_{нагi} = n_{ци} \cdot t_{цики}, \quad (5)$$

де $n_{ци}$ – кількість ківшів ґрунту, завантаженого в один автосамоскид i -ого типу;

$t_{цики}$ – час одного циклу i -го екскаватора (приймається за технічними характеристиками відповідного екскаватору), год.

$$n_{ци} = \frac{U_i}{g_i \cdot K_\Gamma}, \quad (6)$$

де U_i – місткість кузова автосамоскида, який об'єднаний в комплексі з i -им типом екскаватора, м³;

g_i – місткість ковша i -го типу екскаватора, м³;

K_Γ – коефіцієнт наповнення ґрунту, рівний приблизно 1,1.

Всюди далі припустимо, що з кожним типом екскаватора працюють однакові автосамоскиди.

Підставляючи залежності в розрахункову формулу для визначення кількості автосамоскидів на один екскаватор i -ого типу, маємо:

$$N_{Ai} = 1 + \frac{l \cdot (v_{пxi} + v_{зxi}) + 0,034 v_{пxi} \cdot v_{зxi}}{v_{пxi} \cdot v_{зxi} \cdot \frac{U_i}{g_i \cdot K_\Gamma} \cdot t_{цики}}. \quad (7)$$

Сумарна вартість виконання завдання на об'єкті відновлення складається з вартості транспортування та вартості виконання робіт:

$$C = C_{\text{тран}} + C_{\text{роб}}, \quad (8)$$

де $C_{\text{тран}}$ – вартість транспортування на об'єкт відновлення, грн/км;
 $C_{\text{роб}}$ – вартість проведення робіт на об'єкті відновлення, грн/м³;

$$C_{\text{роб}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n 2 \cdot \frac{x_i}{U} \cdot c_i^T \cdot l, \quad (9)$$

де c_i – вартість розробки i -им зразком екскаватору одиниці об'єму ґрунту, грн/м³;
 c_i^m – вартість транспортування одним автосамоскидом, пов'язаним з i -им зразком екскаватору, одиниці довжини відстані від місця розробки ґрунту до об'єкту відновлення, грн/км;

$$C_{\text{тран}} = \sum_{i=1}^n c_i^{\text{пер}} \cdot L, \quad (10)$$

де $c_i^{\text{пер}} = c_{\text{екск}i}^{\text{пер}} + N_{Ai} \cdot c_i^m$ – вартість пересування техніки, що пов'язана в комплексі i -го зразку екскаватора (автосамоскиди), на одиницю відстані від місця розміщення підрозділу до місця розробки ґрунту, грн/км.

Зауважимо, що нумерацію видів екскаваторів необхідно проводити, виходячи з правила зростаючої послідовності вартості виконання робіт, тобто першим має бути вид екскаватора з мінімальною вартістю виконання робіт.

Таким чином сумарна вартість виконання розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} Z &= \sum_{i=1}^n \left(c_i \cdot x_i + 2 \cdot \frac{x_i}{U_i} \cdot c_i^T \cdot l + c_i^{\text{пер}} \cdot L \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\left(c_i + 2 \cdot \frac{c_i^T \cdot l}{U_i} \right) \cdot x_i + c_i^{\text{пер}} \cdot L \right) = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot x_i + c_i^{\text{пер}} \cdot L), \end{aligned} \quad (11)$$

де $C_i = \left(c_i + 2 \cdot \frac{c_i^T \cdot l}{U_i} \right)$ – вартість виконання робіт i -им зразком екскаватора разом з транспортуванням автосамоскидами ґрунту на об'єкт відновлення, грн/м³.

Отже, математична модель задачі ефективного розподілення робіт між наявною технікою на об'єкті відновлення має вигляд:

$$t = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{x_i}{U_i} + \frac{L}{v} \right\} \rightarrow \min \quad (12)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot x_i + c_i^{\text{пер}} \cdot L) \rightarrow \min \quad (13)$$

при

$$\sum_{i=1}^n x_i = V; \quad x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Для розв'язування подібних задач залучимо методику, яка викладена у роботі [2, 3] при формуванні ефективного розподілу замовлень по виробництву рухомого складу на заводах.

Набір об'ємів земляних робіт x_i^* $i = \overline{1, n}$ будемо називати ефективним, якщо будь-яка зміна його величини призводить до збільшення хоча б одного з показників якості (вартості або часу).

Розв'язком вище приведеної задачі будемо вважати множину X^* , кожний з елементів якої є ефективним набором.

Розглянемо найпростішу задачу такого класу, коли для виконання земляних робіт на одному об'єкті відновлення є два види екскаваторів, тобто $n = 2$. Також будемо вважати, що є можливість залучити необхідну кількість автосамоскидів для кожного типу екскаватору (тобто є необмежений запас автосамоскидів в підрозділі).

На рис. 4 побудовано множину припустимих об'ємів земляних робіт, яка, враховуючи обмеження (14), має вигляд відрізка BC. Промінь, який є продовженням вектору продуктивності $\bar{\Pi} = (\Pi_1, \Pi_2)$, має властивість рівності часу виконання робіт першим та другим комплексами, а отже мінімальності часу виконання робіт. В точці В вартість виконання робіт є мінімальною, оскільки вартість виконання робіт першим комплексом є мінімальною за вказаним раніше правилом.

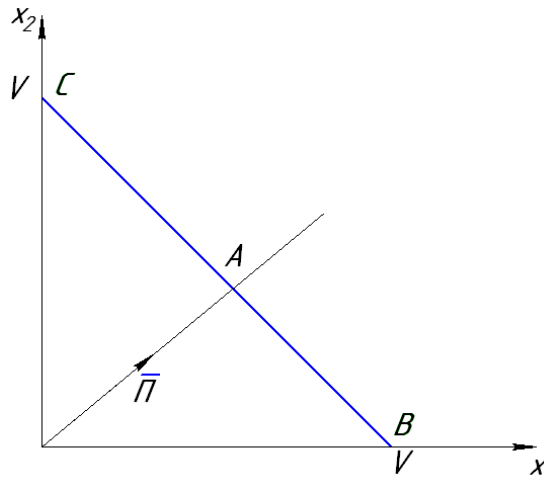


Рисунок 4 – Множина припустимих об'ємів роботи

Таким чином, множина ефективних розв'язків має вигляд відрізка АВ, який можна представити у вигляді:

$$AB = \{(x_1, x_2) : x_1 = \alpha V + (1 - \alpha)x_{1A}, x_2 = (1 - \alpha)x_{2A}, 0 \leq \alpha \leq 1\}. \quad (15)$$

Вектор x_A , який відповідає мінімуму часу виконання робіт, має наступні компоненти:

$$x_{1A} = \Pi_1 \cdot \frac{V}{\Pi_1 + \Pi_2}, \quad x_{2A} = \Pi_2 \cdot \frac{V}{\Pi_1 + \Pi_2}. \quad (16)$$

Для побудови множини ефективних розв'язків задачі представимо показники якості (12)-(13) як функції від параметру α :

$$t = \max \left\{ \frac{\alpha V + (1 - \alpha)x_{1A}}{\Pi_1} + \frac{L}{v}, \frac{(1 - \alpha)x_{2A}}{\Pi_2} + \frac{L}{v} \right\} \rightarrow \min, \quad (17)$$

$$Z = C_1 \cdot (\alpha V + (1 - \alpha)x_{1A}) + C_2 \cdot (1 - \alpha)x_{2A} + \sum_{i=1}^n (c_i^{неп} \cdot L) \rightarrow \min. \quad (18)$$

Слід зауважити, що параметризовані показники якості мають вигляд (17)-(18) тільки в тому випадку, якщо є можливість залучити необхідну кількість автосамоскидів для кожного з них (тобто є необмежений запас автосамоскидів в підрозділі).

Випадок обмеженого парку машин. Розглянемо випадок, коли є певні обмеження на кількість відповідних автосамоскидів та задана кількість екскаваторів кожного виду n_{exi} , $i = \overline{1, n}$.

В розглянутому випадку задачі кількість автосамоскидів може бути меншою за розраховану за формулою (7) для кожного типу екскаватору.

Отже, нехай задана кількість наявних автосамоскидів (наприклад, у вигляді вектору $\overline{N_{Ad}} = (N_{Ad1}, N_{Ad2}, \dots, N_{Adn})$), тоді фактична кількість автосамоскидів для всіх $i = \overline{1, n}$ приймається за правилом:

$$N_{Ai} = \begin{cases} N_{Ai}, N_{Ai} < \text{floor}\left(\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right), \\ \text{floor}\left(\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right), N_{Ai} \geq \text{floor}\left(\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right), \end{cases} \quad (19)$$

Зауважимо, що N_{Ai} розраховано за формулою (7).

Оператор *floor* означає цілу частину числа меншого або того, що дорівнює отриманому в квадратних дужках (це пояснюється тим, що екскаватор, з яким буде працювати менша частина автосамоскидів буде працювати довше, а отже і весь комплекс буде працювати довше).

Але, якщо $N_{Ai} \geq \text{floor}\left(\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right)$, тоді залежності (16)-(17) матимуть зміни, пов'язані з втратами часу простою екскаватору, яке буде дорівнювати для одного циклу транспортування (при рівномірному розподілі автосамоскидів між всіма екскаваторами i -го типу):

$$t_{прості} = H\left(N_{Ai} - \text{floor}\left[\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right]\right) \cdot t_{наві}, \quad (20)$$

де $H(y)$ – функція Хевісайда, яка дорівнює нулю при $y \leq 0$ та дорівнює y при $y > 0$; N_{Ai} розраховано за формулою (7).

При цьому сумарний час простою екскаваторів i -го типу буде становити:

$$T_{прості} = \frac{x_i}{N_{Adi} \cdot U_i} \cdot t_{прості} = \frac{x_i}{N_{Adi} \cdot U_i} \cdot H\left(N_{Ai} - \text{floor}\left[\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right]\right) \cdot t_{наві}. \quad (21)$$

Підставляючи (5)-(6) в (21), маємо:

$$T_{прості} = \frac{x_i}{N_{Adi}} \cdot H\left(N_{Ai} - \text{floor}\left[\frac{N_{Adi}}{n_{exi}}\right]\right) \cdot \frac{t_{циклі}}{g_i \cdot 1,1}. \quad (22)$$

Залежності (16) в цьому випадку (при заданій кількості екскаваторів кожного виду n_{exi}) будуть мати вигляд:

$$x_{iA} = n_{exi} \cdot \Pi_i \cdot \left(\frac{V}{\sum_{i=1}^n n_{exi} \cdot \Pi_i} \right), i = \overline{1, n}. \quad (23)$$

Отже, математична модель задачі ефективного розподілення робіт між наявною технікою на об'єкті відновлення з урахуванням заданої кількості екскаваторів кожного типу та часу простою екскаваторів, викликаним обмеженням кількості транспортних засобів, має вигляд:

$$t = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{x_i}{\Pi_i} + T_{\text{простої}} + \frac{L}{v} \right\} \rightarrow \min \quad (24)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot x_i + n_{\text{exi}} \cdot c_i^{\text{неп}} \cdot L) \rightarrow \min \quad (25)$$

при

$$\sum_{i=1}^n x_i = V; x_i \geq 0, i = \overline{1, n}. \quad (26)$$

Таким чином, залежності (17) та (18) для $n = 2$ будуть виглядати:

$$t = \max \left\{ (\alpha V + (1-\alpha)x_{1A}) \cdot f_1 + \frac{L}{v}, (1-\alpha)x_{2A} \cdot f_2 + \frac{L}{v} \right\} \rightarrow \min \quad (27)$$

$$Z = C_1 \cdot (\alpha V + (1-\alpha)x_{1A}) + C_2 \cdot (1-\alpha)x_{2A} + \sum_{i=1}^n (n_{\text{exi}} \cdot c_i^{\text{неп}} \cdot L) \rightarrow \min, \quad (28)$$

де $f_i = \left(\frac{1}{n_{\text{exi}} \Pi_i} + \frac{1}{N_{\text{Adi}}} \cdot H \left(N_{Ai} - \text{floor} \left[\frac{N_{\text{Adi}}}{n_{\text{exi}}} \right] \right) \cdot \frac{t_{\text{цикли}}}{g_i \cdot 1,1} \right), \forall i = \overline{1, 2}.$

В загальному випадку (коли $n > 2$), розв'язування задачі (24)-(26) необхідно проводити за наступним алгоритмом:

1) Наявні види екскаваторів нумеруються за порядком зростання вартості виконання робіт, тобто, щоб $C_i \leq C_{i+1}$ для всіх $i = \overline{1, n}$.

2) Визначається необхідна кількість автосамоскидів для кожного типу екскаватору за формулою (7). Якщо є заданим вектор кількості допустимих автосамоскидів $\overline{N_{Ad}}$, тоді залучається формула (19).

3) Визначаються координати точки А за залежностями (16), при наявності вектору кількості допустимих автосамоскидів $\overline{N_{Ad}}$ залучається формула (23).

4) Визначаємо ефективні розв'язки в параметричній формі за залежностями, представленими в множині:

$$AB = \left\{ x \in R^n : x_1 = \alpha V + (1-\alpha)x_{1A}, x_i = (1-\alpha)x_{iA}, 0 \leq \alpha \leq 1, \forall i = \overline{2, n} \right\}.$$

5) Будуємо залежності вартості від часу за формулами (27)-(28) та об'ємів робіт між собою $i = \overline{1, n}$:

$$t = \max \left\{ (\alpha V + (1-\alpha)x_{1A}) \cdot f_1 + \frac{L}{v}, (1-\alpha)x_{iA} \cdot f_i + \frac{L}{v} \right\} \rightarrow \min \quad (29)$$

$$Z = C_1 \cdot (\alpha V + (1-\alpha)x_{1A}) + \sum_{i=2}^n C_i \cdot (1-\alpha)x_{iA} + \sum_{i=1}^n (n_{\text{exi}} \cdot c_i^{\text{неп}} \cdot L) \rightarrow \min. \quad (30)$$

де $f_i = \left(\frac{1}{n_{\text{exi}} \Pi_i} + \frac{1}{N_{\text{Adi}}} \cdot H \left(N_{Ai} - \text{floor} \left[\frac{N_{\text{Adi}}}{n_{\text{exi}}} \right] \right) \cdot \frac{t_{\text{цикли}}}{g_i \cdot 1,1} \right), i = \overline{1, n}.$

При обмеженості одного з показників якості процес вибору ефективного розв'язку з множини наступний: задається необхідна вартість виконання робіт (час виконання робіт), за залежністю (30) ((29)) обчислюється параметр α та підставляючи його у залежність (29) ((30)) обчислюється відповідне значення часу виконання робіт (вартості виконання робіт).

Чисельний приклад. Нехай є один об'єкт відновлення з об'ємом робіт $V = 80000 \text{ м}^3$ та в підрозділі є три види екскаваторів: HYUNDAI R260LC-9S – 3 од., HYUNDAI R170W-7 – 2 од. та EOB-4421 – 2 од. Продуктивність даних екскаваторів становить $\Pi_1 = 170 \text{ м}^3/\text{год}$, $\Pi_2 = 150 \text{ м}^3/\text{год}$ та $\Pi_3 = 110 \text{ м}^3/\text{год}$ відповідно. Об'єми їх ковшів становлять $g_1 = 1,46 \text{ м}^3$, $g_2 = 1,05 \text{ м}^3$ та $g_3 = 0,65 \text{ м}^3$ відповідно. Відстань до об'єкта $L = 185 \text{ км}$ та середня швидкість пересування до нього $v = 35 \text{ км/год}$. Дальність транспортування ґрунту на об'єкті $l = 5 \text{ км}$. Для перевезення ґрунту задіяні автосамоскиди: BMC з кузовом $U_1 = 18 \text{ м}^3$ ($N_{Ad1} = 10$), MAZ з кузовом $U_2 = 15,4 \text{ м}^3$ ($N_{Ad2} = 9$) та автосамоскиди КраЗ-65055 з кузовом $U_3 = 10,5 \text{ м}^3$ ($N_{Ad3} = 8$).

Для вище перелічених екскаваторів та автосамоскидів задані наступні характеристики:

- вартість виконання робіт екскаваторами: $c_1 = 80 \text{ грн/м}^3$, $c_2 = 80 \text{ грн/м}^3$ та $c_3 = 200 \text{ грн/м}^3$;

- вартість транспортування одним транспортним засобом: $c_1^m = 8 \text{ грн/км}$, $c_2^m = 7,5 \text{ грн/км}$ та $c_3^m = 10 \text{ грн/км}$ відповідно;

- вартість пересування екскаваторів до об'єкту відновлення: $c_1^{\text{пер}} = 25 \text{ грн/км}$ (для його перевезення необхідно задіяти тягач з тралом), $c_2^{\text{пер}} = 18 \text{ грн/км}$ та $c_3^{\text{пер}} = 11 \text{ грн/км}$;

- швидкість руху порожніх автосамоскидів $v_{\text{пх1}} = 70 \text{ км/год}$, $v_{\text{пх2}} = 65 \text{ км/год}$ та $v_{\text{пх3}} = 60 \text{ км/год}$ відповідно;

- швидкість руху завантажених автосамоскидів $v_{\text{зх1}} = 50 \text{ км/год}$ та $v_{\text{зх2}} = 45 \text{ км/год}$, $v_{\text{зх3}} = 40 \text{ км/год}$ відповідно;

- час одного циклу екскаваторів становить: $t_{\text{цик1}} = 15 \text{ с}$, $t_{\text{цик2}} = 14 \text{ с}$ та $t_{\text{цик3}} = 16 \text{ с}$.

Для чисельних розрахунків розглянутої задачі побудовано програму за запропонованим алгоритмом в системі аналітичних розрахунків Maple.

В результаті реалізації програми з заданими вихідними даними отримано залежність вартості виконання робіт від часу виконання завдання, яка представлена на рис. 5.

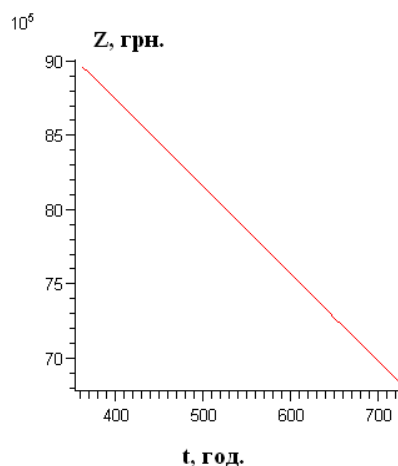


Рисунок 5 – Залежність вартості виконання робіт від часу виконання завдання для розглянутого прикладу

Взаємозалежність об'ємів земляних робіт трьох екскаваторних комплексів, яка являє собою множину ефективних розв'язків, представлена на рис. 6.

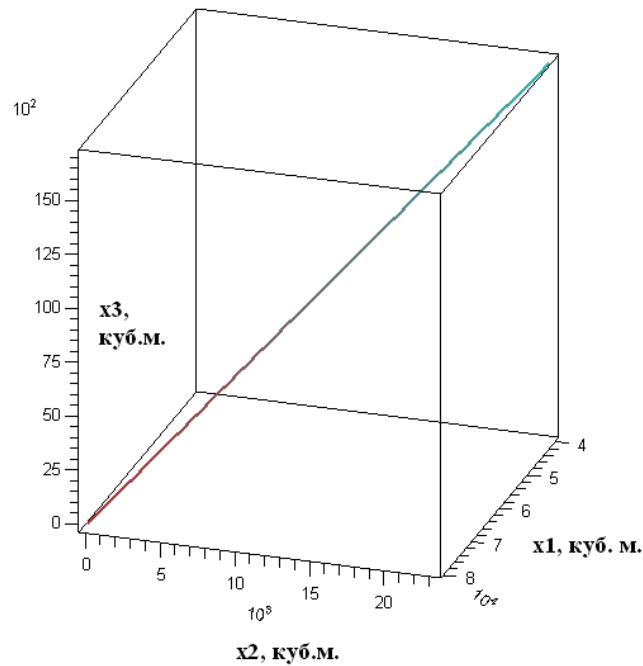


Рисунок 6 – Залежність об'ємів земляних робіт трьох екскаваторних комплексів

6. Обговорення

Наукову новизну результатів дослідження та їх практичне значення підтримано у ході дискусії науково-педагогічного складу науково-дослідного центру Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського, зокрема: Віктором Голубом – доктором технічних наук, професором та Святославом Сєдовим – кандидатом технічних наук, старшим дослідником.

7. Висновки

1. В роботі побудовано математичну модель задачі ефективного розподілу робіт між наявною технікою на одному об'єкті відновлення при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.
2. В моделі враховано задані кількості видів екскаваторів та кожного з видів екскаваторів, умову обмеженості кількості транспортних засобів для кожного виду екскаваторів, яка породжує час простою останніх.
3. Побудована модель являє собою задачу лінійного програмування з двома показниками якості: час та вартість виконання завдань.
4. Для розглянутої задачі побудовано множину припустимих об'ємів робіт кожного екскаваторного комплексу, яка являє собою відрізок в просторі.
5. В якості чисельного прикладу розглянуто задачу з трьома видами екскаваторів. Для його розв'язування побудовано програму для розрахунку в системі аналітичних розрахунків Maple, за допомогою якої визначено множину ефективних розв'язків (графічну і аналітичну залежність об'ємів робіт трьох екскаваторних комплексів між собою), графічну і аналітичну залежність вартості виконання робіт від часу, витраченого для цього.
6. Результати проведеного дослідження доцільно застосовувати при плануванні роботи по відновленню об'єктів транспортної інфраструктури та об'єктів критичної інфраструктури, які пов'язані з переміщенням великих об'ємів земляних мас.

7. Подальші дослідження необхідно проводити у напрямку розгляду ситуації, коли екскаваторні комплекси працюють для відновлення декількох об'єктів відновлення з різними умовами виконання робіт.

8. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

9. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Про Державну спеціальну службу транспорту: Закон України від 5 лютого 2004 року № 1449-IV. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1449-15#Text>
2. Босов А. А. Формування варіантів раціональної мережі ліній високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія, 2004. 144 с.
3. Босов А. А. Научные основы решения задач проблемы обновления локомотивного парка железных дорог Украины, 2004. 382 с.
4. Главацький К. Ц. (2008). Організація процесу ущільнення відсипаної призьми земляного полотна комплектом машин. Підйомно-транспортна техніка, 2, С. 62 – 69.
5. Горяїнов О. М. Транспортні технології і логістика. Книга 1. Теорія і практика дисципліни «Вантажні перевезення» (для транспортних технологів), 2013. 490 с.
6. Богомаз В.М., Петрунько В.О. (2022). Про однорідну задачу ефективного розподілу об'ємів робіт для екскаваторних комплексів підприємства. Тези 1-ої Всеукраїнської наукової конференції «Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів, загроз», 28 жовтня 2022, с. 105-108.
7. Богомаз В. М., Боренко М.В., Борисенко А.М. (2022). Алгоритм побудови ефективного розподілу об'ємів робіт

References

1. Pro Derzhavnu spetsial'nu sluzhbu transportu: Zakon Ukrainy 05.02.2004 № 1449-IV. Available from : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1449-15#Text>
2. Bosov A. A. Formuvannya variantiv ratsional'noyi merezhi liniy vysokoshvydkisnoho rukhu poyizdiv v Ukraini [Formation of options for a rational network of high-speed train lines in Ukraine]: monohrafiya, 2004. 144 p.
3. Bosov A. A. (2004). Nauchnye osnovy reshenyya zadach problemy obnovenyya lokomotyvnoho parka zheleznykh doroh Ukrainy [Scientific basis for solving the problem of the renewal of the locomotive fleet of Ukrainian railways], 2004. 382 p.
4. Hlavats'kyi K. TS. (2008). Orhanizatsiya protsesu ushchil'nennya vidsypanoyi pryzmy zemlyanoho polotna komplektom mashyn [Organization of the process of compaction of the loose ground surface prism with a set of machines]. *Pidymno-transportna tekhnika*, 2, p. 62 – 69.
5. Horyayinov O. M. Transportni tekhnolohiyi i lohistyka. Knyha 1. Teoriya i praktyka dystsypliny "Vantazhni perevezennya" (dlya transportnykh tekhnolohiv) [Transport technologies and logistics. Book 1. Theory and practice of the discipline "Freight transportation" (for transport technologists)], 2013. 490 p.
6. Bohomaz V. M., Petrun'ko V. O. (2022). Pro odnoridnu zadachu efektyvnoho rozpodilu ob'yemiv robit dlya ekskavatornykh kompleksiv

для техніки підприємства. *Математичне і програмне забезпечення інтелектуальних систем*, Рр. 36-37.

8. Тактико-спеціальна підготовка. Метод. рекомендації для проведення практичних занять та виконання курсової роботи «Організація та технічне забезпечення робіт із відновлення об'єктів національної транспортної системи». 2021 Ч.1., 45с., Ч.2., 27с.
7. Bohomaz V. M., Borenko M. V., Borysenko A. M. (2022). Alhorytm pobudovy efektyvnoho rozpodilu ob'yemiv robit dlya tekhniky pidpryyemstva. Matematychnе i prohramne zabezpechennya intelektual'nykh system [Algorithm for building an effective distribution of work volumes for the company's equipment. Mathematical and software support of intelligent systems], P. 36-37.
8. Takyko-spetsial'na pidhotovka. [Tactical and special training]. Metod. rekomendatsiyi dlya provedennya praktychnykh zanyat' ta vykonannya kursovoyi roboty «Orhanizatsiya ta tekhnichne zabezpechennya robit iz vidnovlennya ob'yektiv natsional'noyi transportnoyi systemy». 2021. P.1., 45 p., P.2., 27 p.
- pidpryyemstva [On the homogeneous task of effective distribution of work volumes for the enterprise's excavator complexes]. Tezy 1-oyi Vseukrayins'koyi naukovoyi konferentsiyi «Lohistyka i transportna bezpeka: problemy ta perspektyvy rozvytku v konteksti analizu suchasnykh vyklykiv, zahroz», 28 zhovtnya 2022, s. 105-108.