

# ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗКРОЮ МЕТАЛОПРОКАТУ НА ЛЕТЮЧИХ НОЖИЦЯХ

Фонотов А.М., Папко Т.О.

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
кафедра інформаційних управляючих систем і технологій

E-mail: papko\_t\_a@mail.ru  
stas@nedra.dn.ua

## Abstract

*Fonotov A.M., Papko T.O. The optimization of the cutting plan of roll metal on the flying shears. The article proposes principle of definition stock cutting plan optimization criterion. The modified genetic algorithm is offered for the described problem solving. Results of the modeling of technological process and functioning of the cutting out optimization system resulted and analysed.*

## Загальна постановка проблеми.

Проблема оптимального використання сировини має велике значення для підприємств металургійної промисловості, де відходи виробництва складають значну частину собівартості вироблюваної продукції. Одним з найважливіших чинників, що забезпечують економію прокату чорних металів шляхом мінімізації відходів виробництва, є їх раціональний розкрій.

Розглядається розкрій металу летючими ножицями в технологічній лінії безперервно-заготовочного стану (БЗС) «730/500» [1] (рисунок 1). Металопрокат певного перетину, що пересувається зі швидкістю до 6м/с, підлягає розкрою на заготовки мірної довжини. Довжина задається діапазоном (10.9-11.8м для БЗС «730/500»). Розрахунок плану розкрою має виконуватися в режимі реального часу, коли на момент прибуття металу до лінії летючих ножиць точна його довжина ще не відома, оскільки прокатка не завершена. Цей параметр залежить від сортаменту прокату, режиму прокатки, від випадкових чинників сумарних обжимань прокату валками стану під час прокатки.

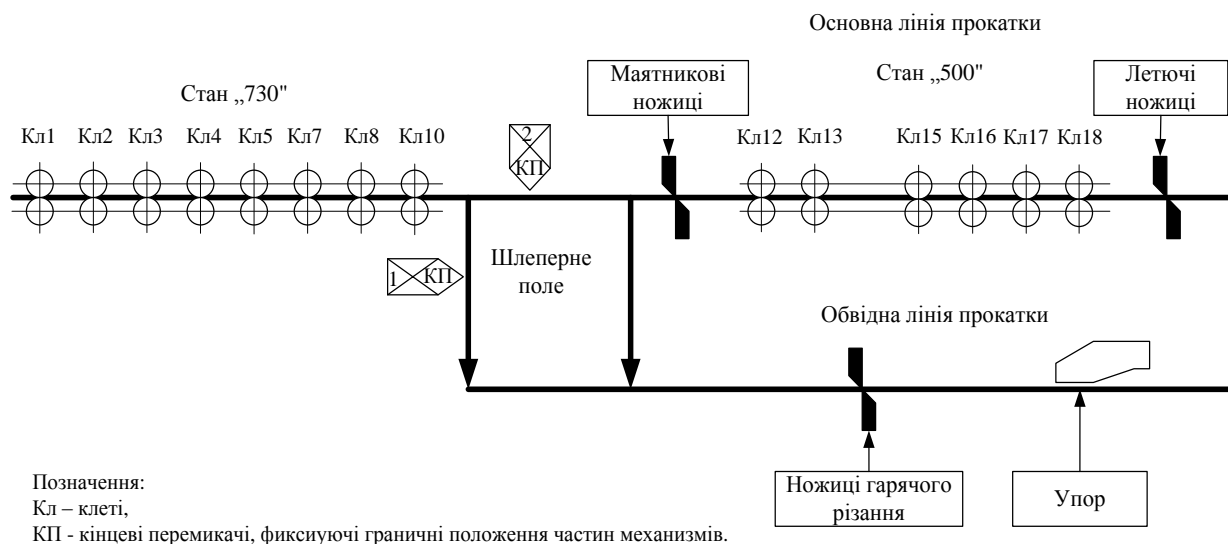


Рисунок 1 – Схема устаткування БЗС «730/500»

Сучасне обладнання, технології прокатки та методи автоматизації дозволяють значно розширити критерії оптимізації, вдосконалити існуючі методи прогнозування довжини металопрокату [2] та визначення динамічного оптимального плану розкрою для мінімізації збитків.

### Постановка задачі розкрою металопрокату.

Система управління розкром металопрокату на летючих ножицях видає сигнал на виконавчий механізм ножиць – реалізує певний план розкрою. Критерієм оптимальності плану розкрою є наявність та величина залишку металу. Залишок може бути обумовлений характеристиками самого плану, або неточністю його виконання. Існуюча система розкрою металу [3] забезпечує прогнозування довжини прокату та мінімізацію можливого залишку.

Пропонується розрахунок розкрійного плану з врахуванням додаткових критеріїв оптимальності, обумовлених наступними особливостями технологічного процесу.

Після різання на летючих ножицях середньосортного стану штанги або продаються як заготовки, або ж прокатуються на дрібносортовому стані до стану кінцевої продукції. У другому випадку штанги перед прокаткою розігріваються в печі, ширина якої відповідає максимальній довжині заготовки. При відхиленні довжини заготовки від максимальної зменшується ефективність використання печі, що призводить до появи додаткових збитків. Отож доцільно максимізувати середню довжину штанги.

Розігріті штанги далі прокатуються на дрібносортовому стані. Довжина заготовки після дрібносортового стану збільшується пропорційно зменшенню перетину, тобто залежить від перетину та від початкової довжини заготовки. Далі залежно від потреб замовника метал ріжеться на смуги довжиною від 4 до 30 метрів [1]. Таким чином, довжина штанги, відрізаної летючими ножицями у технологічному процесі середньосортного стану, впливає на розкрій та залишок металу кінцевого перетину. Тому, крім точності виконання розкрійного плану, дуже важливою є його оптимальність з точки зору зменшення вартості збитків у подальшому технологічному процесі.

Крім того, при неможливості розкрити заготовку без залишку план розкрою повинен задовольняти наступним вимогам: заборона залишків, які не транспортуються; заборона довжини останньої штанги прокату, яка може викликати аварійну ситуацію.

Для розробки сучасної підсистеми оптимізації розкрою необхідна побудова математичної моделі оптимального використання сировини і розробка алгоритмів її рішення.

### Вирішення задачі та результати досліджень.

Наявність і величини об'ємів металу, що не розкраюється без залишку летючими ножицями БЗС «730/500», а також максимальна величина залишку визначаються діапазоном довжин штанг розкрою і залежать від планових значень і величин допусків і погрешностей перетину вхідних злитків (кв.150мм) і вихідних штанг групи «500» БЗС (кв. 62, 80).

Для поточної довжини прокату після стану «500»  $L_{500}$ , яка входить до інтервалу  $[L_{500}^{\min}; L_{500}^{\max}]$  і не розкраюється без залишку, залишок  $L_{зал}$  дорівнюватиме:

$$L_{зал} = L_{500} - \left[ \frac{L_{500}}{l_{\min}} \right] \cdot l_{\max},$$

де  $l_{\min}$  та  $l_{\max}$  – мінімальна та максимальна довжина штанги, що відрізається, тобто

$$l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}, \quad (1)$$

де  $l_i$  – довжина  $i$ -тої штанги.

Довжина чистового металопрокату визначається за формулою:

$$L_{500} = L_{730} \cdot K_{500},$$

де  $L_{730}$  – довжина прокату після стану «730»;  $K_{500}$  – загальний коефіцієнт витяжки клітей стану «500».

Графік залежності залишків від довжини чистового прокату наданий на рисунку 2.

Для кожного плану розкрою повинна виконуватися умова:

$$\sum_i^n l_i \leq L_{500} \quad (2)$$

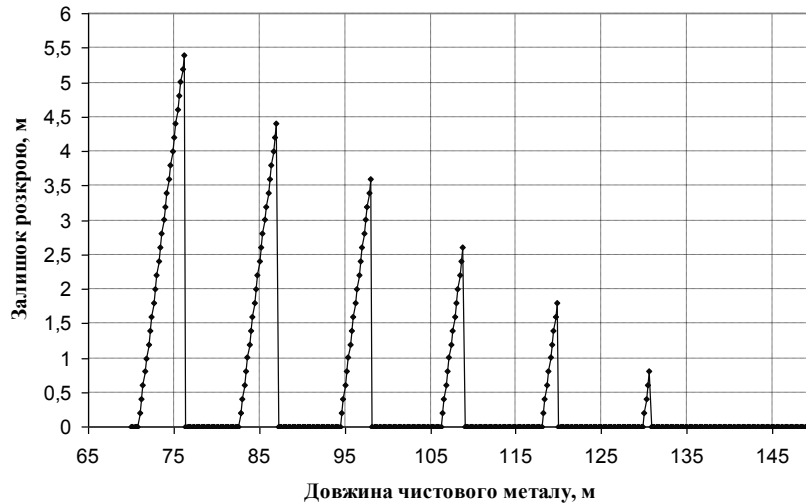


Рисунок 2 – Залежність залишку розкрою від довжини чистового прокату

Критерії оптимізації при визначенні  $l_i$  приймуть наступний вигляд.

Мінімізація залишків металу:

$$L^{зал} = L_{500} - \sum_i^n l_i - L_{обр.}^1 - L_{обр.}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

де  $L^{зал}$  – довжина залишків металу при розкрої заготовки;  $L_{обр.}^1$  та  $L_{обр.}^2$  – величини обрізі переднього та заднього кінця заготовки;  $n$  – число штанг, що розкроюють з заготовки.

Враховуючи (1), маємо

$$\left[ \frac{L_{500}}{l_{\max}} \right] \leq n \leq \left[ \frac{L_{500}}{l_{\min}} \right]$$

Максимізація середньої довжини відрізаної штанги:

$$\sum_{i=1}^n (l_{\max} - l_i) \rightarrow \min$$

Мінімізація залишку виробництва на дрібносортному стані. Для врахування цього критерію необхідно ввести такі параметри, як

$S$  і  $S'$  – кінцевий перетин металопродукту для стану «500» та дрібносортового стану відповідно;  $l'_{\min}$ ,  $l'_{\max}$  – допуски довжини розкрою для дрібносортового стану.

Тоді можна визначити  $L_{др/сорт.}$  – довжину заготовки  $l_i$  після прокатки на дрібносортовому стані:

$$L_{др/сорт.} = l_i \cdot K_{др/сорт.} \quad (4)$$

де  $K_{др/сорт.}$  – загальний коефіцієнт витяжки дрібносортового стану,

$$K_{др/сорт.} = \frac{S}{S'} \quad (5)$$

Тоді, відповідно до (3), можна записати критерій мінімізації:

$$L'_{зал} = L_{др/сорт.} - \sum_j^m l'_j - L'_{обр.} \rightarrow \min \quad (6)$$

або, враховуючи (4) і (5)

$$L'_{зал} = \frac{S}{S'} \cdot l_i - \sum_j^m l'_j - L'_{обр} \rightarrow \min \quad (7)$$

де  $L'_{зал}$  – залишок металу на дрібносортовому стані від штанги  $l_i$ ;  $l'_j$  – довжина штанги, яка розкраюється на дрібносортовому стані ( $l'_{\min} \leq l'_j \leq l'_{\max}$ );  $m$  – кількість штанг, на яку розкраюється заготовка  $l_i$ ;  $L'_{обр}$  – величина обрізи під час прокатки на дрібносортовому стані.

Заборона залишків, які не транспортуються, математично формулюється наступним чином:

$$L^{зал} \notin [L_{\min}^{заборзал.}; L_{\max}^{заборзал.}] \quad (8)$$

де  $L_{\min}^{заборзал.}$ ,  $L_{\max}^{заборзал.}$  – мінімальна та максимальна величина забороненого залишку.

Таким чином, описана задача є задачею перебору. Необхідно підібрати такі цілі значення з заданого діапазону для кожної змінної, щоб значення цільової функції було мінімальним. Проте вирішувати її методом повного перебору не представляється можливим через обмеження часу. За вимогами технологічного процесу план розкрою повинен розраховуватися у режимі реального часу. Тобто використовуваний метод оптимізації повинен знаходити оптимальне або субоптимальне рішення за кінцевий відрізок часу, що не перевищуватиме заданого значення (1,3 сек.).

Розглядається рішення поставленої задачі за допомогою генетичного алгоритму (ГА):

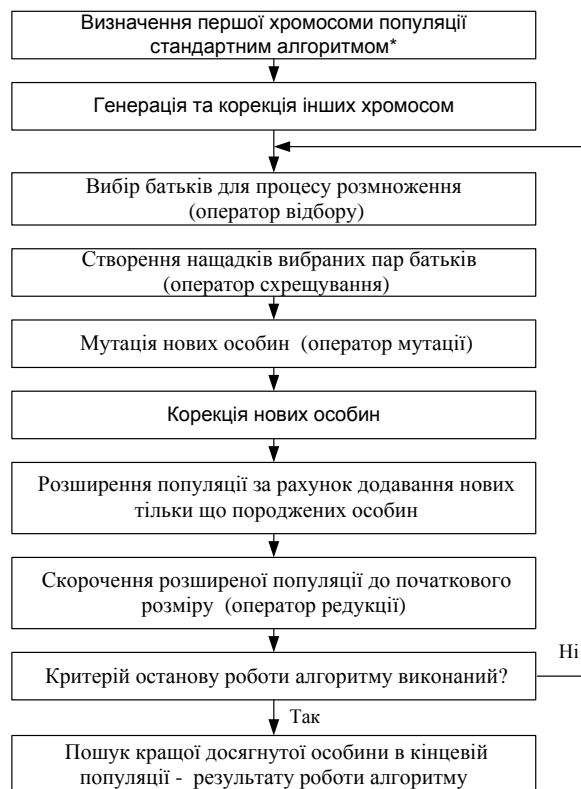


Рисунок 3 – Схема роботи генетичного алгоритму

Задача розкрою прокату має певні особливості: розмірність задачі може змінюватися від 6 до 20 змінних; вигляд цільової функції в значній мірі залежать від параметрів технологічного процесу прокатки і розкрою металу. ГА легко пристосовується до врахування цих особливостей. Крім того у випадку необхідності введення додаткового обмеження або

критерію оптимізації зміни відобразяться тільки на вигляді цільової функції, структура алгоритму, його параметри та схема рішення залишаться без змін.

Пропонується модифікація класичного ГА відповідно до вимог задачі розкрою.

Для ГА план розкрою представляється хромосомою – сукупністю довжин штанг:

$$(l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n),$$

де  $l_i$  – ген хромосоми, ціле число – довжина  $i$ -тої штанги у сантиметрах, що може коливатися у обумовлених технологічним процесом межах;  $n$  – число штанг у плані розкрою.

Згідно (6, 7) цільова функція, що враховує всі критерії оптимізації та вимоги до плану розкрою, має вигляд:

$$f(l_1, l_2, \dots, l_n) = \phi(l_1, l_2, \dots, l_n) \cdot (p_1 \cdot (L_\phi - \sum_{i=1}^n l_i) + p_2 \cdot \sum_{i=1}^n (\frac{S}{S'} \cdot l_i - \sum_{j=1}^{m_i} l_{ij}) + p_3 \cdot \sum_{i=1}^n (l_{\max} - l_i))$$

де  $\phi(l_1, l_2, \dots, l_n)$  – штрафна функція, що дорівнює одиниці, якщо хромосома задовольняє обмеженням (8), в іншому випадку вона приймає досить велике значення;  $p_1$  – ціна вихідного металу стана «500» на одиницю довжини даного перетину;  $L_\phi$  – фактична довжина металопрокату після стана «500»;  $p_2$  – ціна вихідного металу дрібносортового стана у розрахунку на одиницю довжини перетину цього стана;  $l_{ij}$  – довжина  $j$ -тої штанги, отриманої під час розкрою  $i$ -тої заготовки у технологічному процесі дрібносортового стана;  $m_i$  – кількість штанг, отриманих у технологічному процесі дрібносортового стана з  $i$ -тої заготовки;  $p_3$  – ціна нагрівання у печі дрібносортового стана заготовок вихідного металу стана «500» у розрахунку на одиницю довжини перетину.

Корекція хромосоми проводиться для зменшення величин її генів таким чином, щоб їх сума була найбільшою, але не перевищувала значення  $L_{500}$  (2). Тому корекція застосовується в усіх випадках, коли перетворення хромосоми може порушити це обмеження. Корекція хромосоми проводиться комбіновано двома способами: послідовною та рівномірною корекцією.

Послідовна корекція (швидке зменшення суми генів). Зменшення відбувається послідовно, починаючи з голови хромосоми:

- перший ген зменшується максимально, щоб покрити перевищення над  $L_{500}$  (у граничному випадку зменшується до мінімального значення);
- різниця між  $L_{500}$  та сумою генів, відповідно зменшується;
- якщо перевищення залишається, то зменшується наступний ген.

Рівномірна корекція:

- розраховується різниця між сумою генів та граничним числом  $L_{500}$ , тобто величина, на яку треба зменшити гени;
- одержана різниця порівну поділяється на кількість генів у хромосомі, отримуємо  $h$  – величину, на яку треба зменшити кожний ген;
- далі проглядаються всі гени: якщо зменшення гена на величину  $h$  не призведе до його виходу з допустимого діапазону, то зменшення відбувається, інакше ген залишається без змін.

Якщо після описаної процедури сума генів знову перевищує  $L_{500}$ , то процедура повторюється.

У процесі розробки модифікованого ГА розглядалася одноточкова та двох точкова мутація. Двохточковий оператор мутації змінює значення двох випадково обраних генів:

- розраховується  $\Delta_{ij}$  – сума перевищення значень обох генів над мінімальним можливим значенням:

$$\Delta_{ij} = l_i + l_j - 2 \cdot l_{\min}$$

одержане значення  $\Delta_{ij}$  розподіляється між генами  $l_i$  та  $l_j$  у пропорції, яка генерується випадково:

$$l_i = \begin{cases} l_{\min} + \xi \cdot \Delta_{i,j}, & \text{якщо: } \xi \cdot \Delta_{i,j} < \Delta l; \\ l_{\max}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}; \quad l_j = \begin{cases} l_{\min} + (1 - \xi) \cdot \Delta_{i,j}, & \text{якщо: } (1 - \xi) \cdot \Delta_{i,j} < \Delta l; \\ l_{\max}, & \text{в іншому випадку} \end{cases};$$

де  $\xi$  – випадкове число, розподілене за рівномірним законом розподілення у діапазоні від 0 до 1.

Такий оператор мутації не може збільшити суму значень генів у хромосомі, тому не потребує додаткової корекції.

Інші генетичні оператори виконуються за стандартною схемою.

Для зупинки процесу пошуку оптимального плану розкрою використовується комбінований критерій зупинки: ГА працює до повторення найкращого значення із заданою точністю заданої кількості разів, та не довше ніж заданий час.

Для визначення значень параметрів ГА були проведені експериментальні дослідження. Для цього визначалися час рішення (t) на кількість поколінь (N) для різних факторів ГА. Результати експерименту, який проводився по 20 разів для кожного набору параметрів, наведені на рисунках 4. Довжина металопрокату, що розкрається задана 18000см.

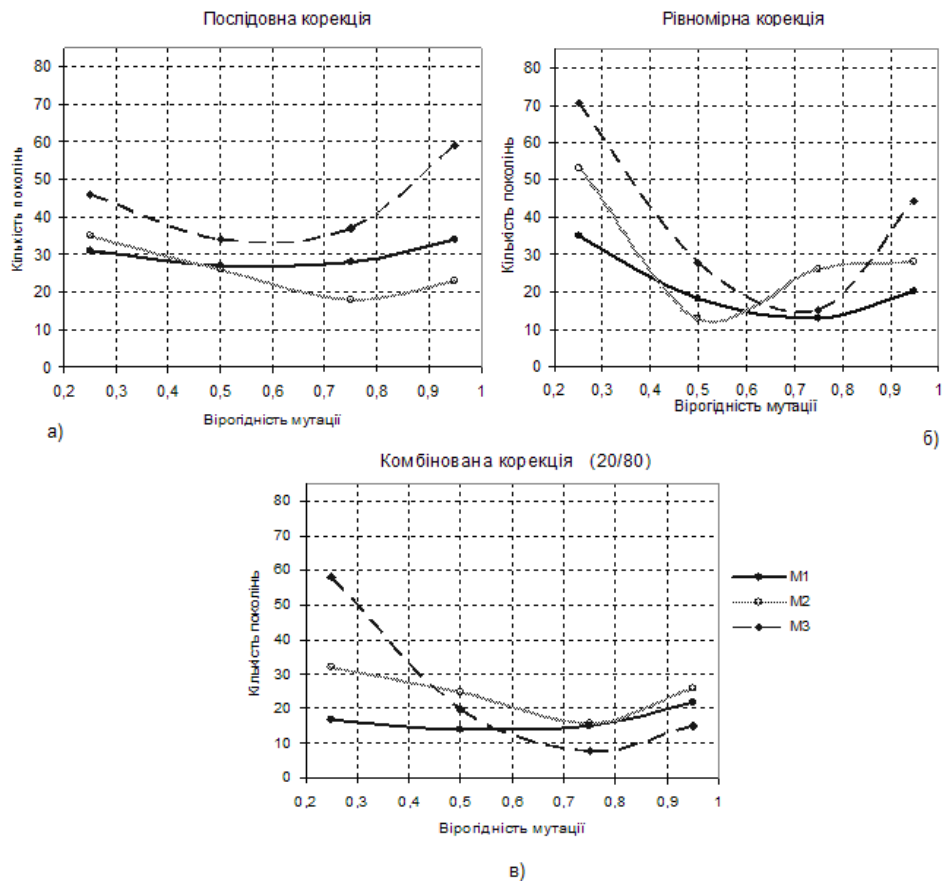


Рисунок 4 – Залежність кількості поколінь генетичного алгоритму від вірогідності мутації при використанні: а) послідовної корекції; б) рівномірної корекції; в) комбінованої корекції

Змінні фактори:

- спосіб корекції: рівномірна, послідовна, комбінована ( 20% – послідовна корекція, 80% – рівномірна);

- спосіб мутації у вигляді вірогідності двох точкової мутації ( 0% – мутація одно точкова (M1), 50% – комбінована мутація (M2), 100% – стовідсоткова двохточкова мутація (M3));

- вірогідність мутації ( від 0,25 до 0,95).

Аналізуючи результати експерименту, можна зробити висновки, що алгоритм швидше досягає кращих значень при високих значеннях вірогідності мутації. Дана ситуація не характерна для більшості реалізацій ГА, оскільки в них вибираються низькі значення вірогідності. У даному ж випадку ефективність алгоритму найбільша при вірогідності 0,5-0,75. Подальше збільшення цього показника знову зменшує ефективність рішення. Це може свідчити про те, що одноточкова мутація для моделей даної задачі недостатньо ефективна і низька вірогідність мутації не робить необхідного впливу на роботу алгоритму.

При використанні комбінованої корекції у долі 20% послідовної та 80% рівномірної, ефективність генетичного алгоритму збільшується до 9 поколінь у даному прикладі. Найкращий результат при цьому забезпечує двох точкова мутація з вірогідністю 0,75.

Також експериментально були встановлені оптимальні значення інших параметрів ГА: вірогідність оператора схрещування – 60%; потужність ГА 30-40 особин; зупинка процесу рішення – через 1200мс роботи, або через 25 повторень найкращого плану з точністю 1 (1 см у розкрійному плані).

Розроблений ГА задовольняє вимогам технологічного процесу щодо часу рішення.

Для дослідження роботи ГА як системи оптимізації розкрою металу на летючих ножицях була розроблена модель технологічного процесу прокатки металу, та модель системи стеження за ходом технологічного процесу. За допомогою імітації системи управління розкром прокату, в якій виділяється підсистема розрахунку оптимального плану розкрою, була проаналізована ефективність системи (рисунок 5).



Рисунок 5 – Взаємодія підсистеми оптимізації плану розкрою з системою розкрою металопрокату

Для порівняння ефективності існуючої та модифікованої систем розкрою у економічному розрізі розглядаються плани розкрою, отримані різними методиками. Параметри дослідження наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 Умови дослідження

Довжина прокату	18000см
Діапазон розкрою заготовок:	1090 – 1180 см
Перетин металопрокату після стана «500»	80 x 80 мм
Щільність сталі даної марки	7,85 кг/м <sup>3</sup>
Вартість металопрокату після стана «500»	3150 грн/т
Вартість нагрівання металу в печі	200 грн/т
Вартість металопрокату після дрібно сортового стана	4300 грн/т
Діапазон розкрою металопрокату після дрібносортового стана:	1160 –1200 см
Перетин металопрокату після дрібносортового стана	28 x 28 мм

На рисунку 6 представлені результати дослідження – графік залежності вартості планів розкрою від довжини металопрокату. Великими крапками позначені ситуації виникнення залишків, що не транспортуються. Вартість таких планів умовно вважається рівною 100 грн. Такі випадки цілком виключаються, коли план оптимізується ГА.

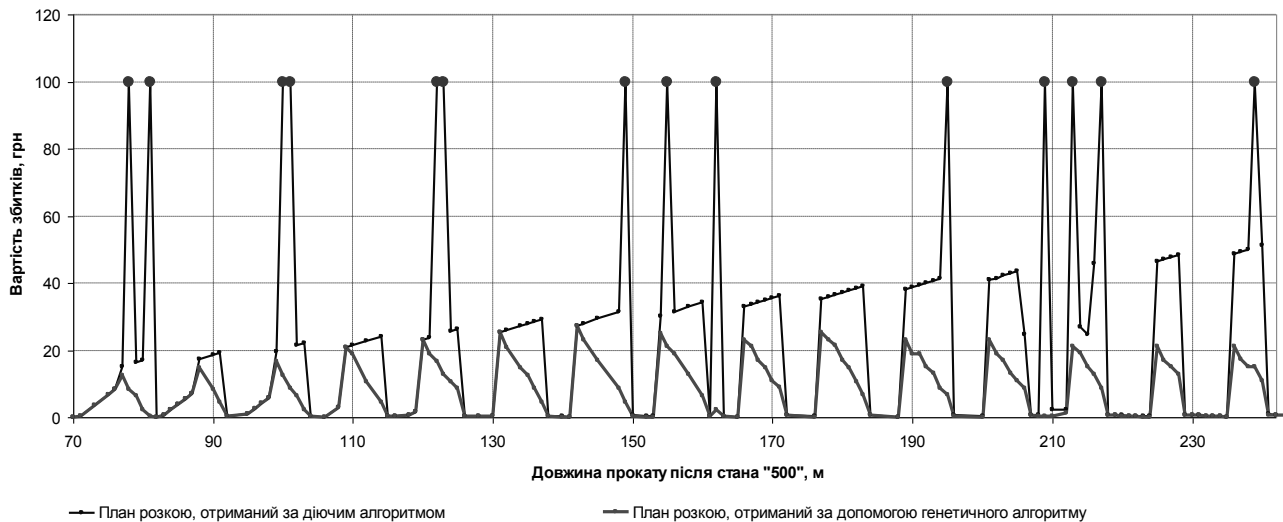


Рисунок 6 – Залежність вартості планів розкрою від довжини металопрокату після стану «500»

Тобто, є діапазони довжини металопрокату, що розкраюється, для яких початковий план, отриманий стандартним методом, є оптимальним. У таких випадках плани розкрою, отримані різними методиками, мають однакову ефективність. Проте є діапазони, у яких різниця вартості планів відрізняється значною мірою. Економія від планів розкрою з урахуванням збитків дрібно сортових станів збільшується зі збільшенням довжини, яка розкраюється. Економія наведена на одну заготовку, час прокатки якої залежно від довжини коливається у діапазоні 1-2 хвилини.

#### Висновки.

1. Запропоновано новий підхід визначення критеріїв оптимальності плану розкрою металу, що має спрямованість на комплексну оптимізацію.
2. Для вирішення поставленої задачі розроблена підсистема оптимізації розкрою на летючих ножицях яка передбачає розрахунок оптимального розкрійного плану за допомогою генетичного алгоритму.
3. Для дослідження роботи підсистеми розроблена та програмно реалізована модель технологічного процесу та модель підсистеми.

#### Перелік посилань

1. Прокатка слитков и производство заготовок в цехе Блюминг №1. Технологическая инструкция./ Криворожский горно-металлургический комбинат «Криворожсталь», Кривой Рог, 1998г.
2. Бабенко М.А., Носиков В.Л., Герасимчук В.П и др. Модернизация системы безотходного раскроя металла на летучих ножницах стана 500 цеха блюминг-1 КГГМК «Криворожсталь» // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №2.2001г.
3. Гусев Б.С., Шевченко О.Г., Нечипоренко В.А. и др. Автоматизированная система управления раскромом проката для непрерывно-заготовочного стана // *Металл и литье Украины*. 1999. №5-6. С.28-31.