

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-86>

УДК 330.46:622

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДРОБАРНИХ ФАБРИКАХ В УМОВАХ БАГАТОЗОНАЛЬНОГО ТАРИФУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ

OPTIMIZATION OF ELECTRICITY COSTS AT CRUSHING FACTORIES IN CONDITIONS OF MULTI-ZONE TARIFF FOR ELECTRICITY

Кочура Денис Віталійович

аспірант,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-6578>

Kochura Denys

National Technical University "Dnipro Polytechnic"

Стаття присвячена актуальним питанням оптимізації витрат електроенергії на дробарних фабриках в умовах багатозонального тарифу на електроенергію. Мета статті – економіко-математичне моделювання та оптимізація процесів постачання та дроблення руди за критерієм сумарних витрат на постачання та витрат на електроенергію при дробленні руди в умовах однозонного та багатозонного тарифів на електроенергію. Дослідження базується на використанні методів дослідження операцій та теорії управління запасами при побудові економіко-математичних моделей. Оптимізація моделей виконана класичними методами пошуку екстремуму функцій за критерієм мінімальних сумарних витрат на постачання та витрат на електроенергію при дробленні руди. За результатами дослідження запропоновані економіко-математичні моделі комплексної оптимізації процесів постачання та дроблення руди в умовах однозонного та багатозонних тарифів на електроенергію. Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше одержано економіко-математичні моделі комплексної оптимізації процесів постачання та дроблення руди в умовах багатозонного тарифу на електроенергію. Встановлено, що оптимальна партія поставки руди нелінійно залежить від плану постачання руди, собівартості постачання та дроблення руди, зонального тарифу на електроенергію та часу його дії. Практична цінність статті полягає у розробці методики визначення оптимального плану постачання руди гірничо-транспортним комплексом на дробарну фабрику, а саме: оптимальної партії та періоду постачання в умовах багатозонного тарифу на електроенергію, що дозволяє мінімізувати сумарні витрати на постачання та дроблення руди.

Ключові слова: оптимізація витрат, енергозбереження, дробарні фабрики, економіка підприємства, логістика, тарифи.

The article is devoted to the topical issues of optimization of electricity costs at crushing plants in the conditions of a multi-zonal electricity tariff. Therefore, there is a problem of determining the optimal batch and period of supply of raw materials in the conditions of a multi-zonal tariff for electricity based on the criterion of minimizing the total cost of delivering ore and electricity for its processing. The purpose of the article is economic-mathematical modeling and optimization of ore supply and crushing processes based on the criterion of total supply costs and electricity costs during ore crushing under the conditions of single-zone and multi-zone electricity tariffs. The research is based on the use of operations research methods and the theory of inventory management in the construction of economic and mathematical models. Optimization of the models was carried out by classical methods of finding the extremum of functions according to the criterion of minimum total supply costs and electricity costs during ore crushing. Based on the results of the research, economic and mathematical models of complex optimization of ore supply and crushing processes in the conditions of single-zone and multi-zone tariffs for electricity are proposed. The scientific novelty of the research lies in the fact that for the first time economic and mathematical models of complex optimization of ore supply and crushing processes have been obtained in the conditions of a multi-zone electricity tariff. It was established that the optimal batch of ore supply depends non-linearly on the ore supply plan, the cost of ore supply and crushing, the zonal electricity tariff and its duration. According to the results of the study, it

was established: with a multi-zone tariff for electricity, the optimal batch of raw materials supply non-linearly depends on the planned demand for raw materials, the cost of processing and supply, the zonal tariff for electricity and the time of its operation; when planning the supply of raw materials under conditions of a multi-zone tariff for electricity, the number of deliveries and the delivery period are determined separately for each zone of validity of the tariff for electricity. The practical value of the article lies in the development of a methodology for determining the optimal plan for the supply of ore by the mining and transport complex to the crushing plant, namely the optimal batch and period of supply under the conditions of a multi-zone electricity tariff, which allows to minimize the total costs of ore supply and crushing.

Keywords: cost optimization, energy saving, crushing plants, enterprise economy, logistics, tariffs.

Постановка проблеми. Україна має великі поклади руд чорних та кольорових металів, вугілля, нерудних мінералів що є основою економіки України. Підприємства з виробництва залізорудного, марганцевого, титано-магнієвого концентратів, збагаченого вугілля, цементу є дуже енергоємними. Наприклад, вартість електроенергії у структурі виробничої собівартості залізорудного концентрату складає 60–70%.

В умовах енергоємних переробних гірничорудних підприємств сировина подається на переробку залізничним або автомобільним транспортом, а вартість переробки визначається, головним чином, вартістю електричної енергії та доставки сировини.

Крім того, на підприємствах України широко використовують двозонний та тризонний тарифи на електроенергію. Тому виникає проблема визначення оптимальної партії та періоду поставки сировини в умовах багатозонного тарифу на електроенергію за критерієм мінімізації сумарної вартості доставки руди та електроенергії на її переробку.

Питання зниження витрат електроенергії на гірничорудних підприємствах з переробки сировини, особливо в умовах світової енергетичної кризи, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори наукових праць [2; 3] наголошують, що процеси подрібнення руди є найбільш енергоємними і пропонують впровадити більш енергоєфективне дробарне устаткування, дробарки крупношматкового дроблення, млини, а також використовувати нові фізико-технічні принципи для процесів скорочення крупності. Але всі ці заходи потребують значних капітальних вкладень і є дуже затратними. Автори монографії [1] методами імітаційного моделювання досліджують вплив щільності та періоду доставки руди при формуванні енергетичної складової собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонного тарифу на електроенергію, але задача оптимізації витрат на електроенергію не була вирішена. Розглянуті в [1] моделі не дозволяють

виконати комплексну оптимізацію процесів постачання і переробки сировини.

Тому задача управління запасами сировини на переробних енергоємних гірничорудних підприємствах в умовах багатозонного тарифу на електроенергію є актуальною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Загальною проблемою є енергозбереження та енергоєфективність на гірничорудних підприємствах. Невирішеною частиною цієї проблеми є комплексна оптимізація процесів постачання та дроблення руди за критерієм мінімальних витрат на доставку руди та витрат на електроенергію при її дробленні в умовах багатозонного тарифу на електроенергію.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є економіко-математичне моделювання та оптимізація процесів постачання і дроблення руди за критерієм сумарних витрат на постачання та електроенергію при дробленні руди в умовах однозонного та багатозонного тарифів на електроенергію.

Методика дослідження базується на удосконаленні моделей управління запасами з метою їх пристосування до умов гірничорудних підприємств та впровадження в ці моделі нових змінних, а саме: питомих витрат на електроенергію однієї тони руди та багатозонних тарифів на електроенергію.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконаємо моделювання та оптимізацію процесів постачання та переробки сировини за критерієм мінімізації сумарних витрат на ці процеси, що дозволить розробити оптимальні плани постачання сировини з урахуванням вартості її переробки.

Для вирішення цієї задачі доцільно використати загальні моделі управління запасами, зробивши в них відповідну заміну змінних. Як приклад використання моделі Уілсона розглянемо схему подачі руди на дробарну фабрику (рис. 1).

Графік рудопостачання на дробарну фабрику наведено на рис. 2.

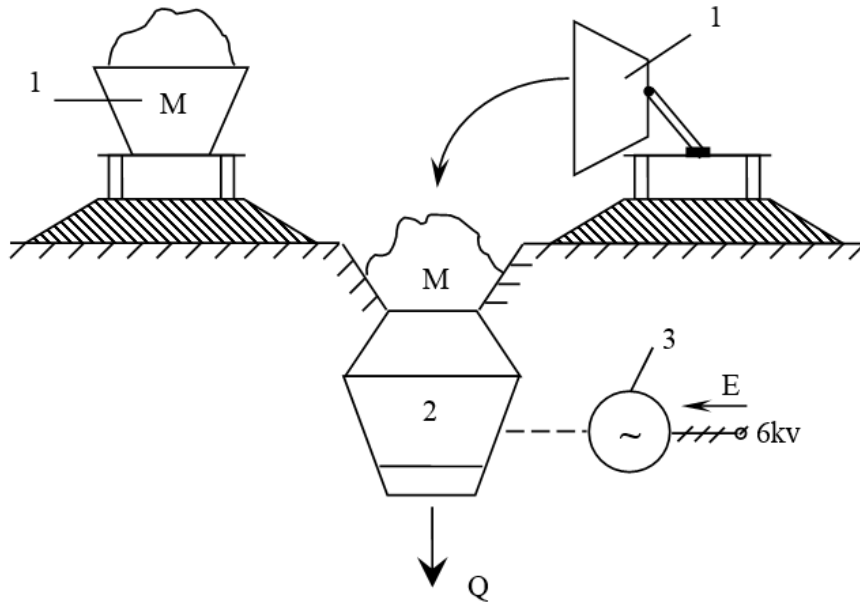


Рис. 1. Схема подачі руди на дробарну фабрику

Умовні позначення: 1 – залізничні друпкари; 2 – дробарка; 3 – електродвигун; М – маса руди; Q – планова кількість дробленої руди, необхідної на певний період (добу, тиждень, місяць); E – електрична енергія.

Джерело: власна розробка автора

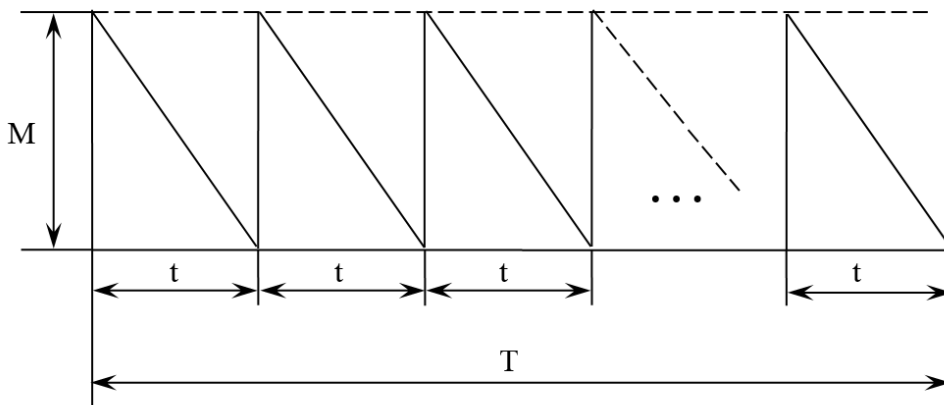


Рис. 2. Графік рудопостачання

Умовні позначення: М – маса руди в залізничному друпкарі; Т – період часу (доба, місяць); t – період переробки дробаркою маси руди М.

Джерело: власна розробка автора

Побудуємо економіко-математичну модель в умовах одноступенчатого тарифу на електроенергію. Нехай C_n – витрати на постачання однієї тони руди на дробарну фабрику; C_E – витрати електроенергії на дроблення однієї тони руди в умовах енергоємного процесу дроблення. Кількість залізничних друпкарів для задоволення потреби дробарної фабрики в руді визначаємо за формулою:

$$n = \frac{Q}{M} = \frac{T}{t}, \quad (1)$$

Витрати на доставку та дроблення руди за період T:

$$W = \left(\frac{M \cdot t}{2} C_E + C_n \right) n = \frac{M \cdot T}{2} C_E + \frac{Q}{M} C_n, \quad (2)$$

За умови постановки задачі

$$W \rightarrow \min, \quad (3)$$

Дослідимо цільову функцію (2) на екстремум:

$$\frac{dW}{dM} = \frac{T}{2} C_E - \frac{Q}{M^2} C_n = 0, \quad (4)$$

Знаходимо оптимальну масу руди, що повинна знаходитися в залізничному вагоні:

$$M_o = \sqrt{\frac{2QC_n}{TC_E}}, \quad (5)$$

Оптимальна кількість залізничних думпкарів, що повинна подаватися на дробарну фабрику:

$$n_o = \frac{Q}{M_o}, \quad (6)$$

Оптимальний період подачі думпкарів:

$$t_o = \frac{T}{n_o}, \quad (7)$$

Параметри рудопостачання (5), (6), (7) використовуються як планове завдання гірничо-транспортному цеху і контролюються диспетчером.

Розглянемо випадок, коли в результаті недопоставки руди устаткування дробарної фабрики недовантажене та працює частково на холостому ході, що провокує збитки, які характеризуються величиною C_3 на тону руди за одиницю часу. Під час t_1 кожного періоду t рівень запасу матеріалу у дробарці достатній для задоволення попиту на руду, а потім під час t_2 запас відсутній і нестача руди покривається з наступного думпкара. Необхідно визначити масу руди в думпкарі та необхідну масу руди, при яких витрати на доставку та дроблення руди з урахуванням недопоставки руди були б мінімальними. Графік рудопостачання у цьому випадку матиме вигляд, зображений на рис. 3.

Позначення на рис. 3: t_1 – період, у якому кількість руди достатня; t_2 – період, у якому руда відсутня; M – реальна кількість руди, що постачається; V – потрібна кількість руди.

Згідно із графіком на рис. 3:

$$\frac{t_1}{t} = \frac{M}{V}; \quad \frac{t_2}{t} = \frac{V-M}{V}; \quad n = \frac{Q}{V} = \frac{T}{t}; \quad (7)$$

Витрати на дроблення і доставку з урахуванням збитків за період T :

$$W = \left(\frac{Mt_1}{2} C_E + C_n + \frac{(V-M)t_2}{2} C_3 \right) \cdot n = \frac{S^2 T}{2V} C_E + \frac{Q}{V} C_n + \frac{(V-M)^2 T}{2V} C_3 \quad (8)$$

Проведемо дослідження цільової функції (8) на екстремум:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial M} - \frac{MT}{V} C_E - \frac{(V-M)T}{V} C_3 = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial V} - \frac{M^2 TC_E}{2V^2} - \frac{Q}{V^2} C_n + \frac{2(V-M)TV - (V-M)^2 T}{2V^2} C_3 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язавши систему рівнянь (9), одержимо оптимальні значення кількості руди, що постачається та потрібної кількості руди:

$$M_o = \sqrt{\frac{2QC_n C_3}{TC_E(C_E + C_3)}}, \quad (10)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{2QC_n(C_E + C_3)}{TC_E \cdot C_3}}. \quad (11)$$

Оптимальний період постачання руди:

$$t_o = \frac{T \cdot V_o}{Q}. \quad (12)$$

Розглянемо процес подачі та переробки однорідної сировини, наприклад, руди, вугілля залізничними вагонами або автосамоскидами за добу в умовах двозонного тарифу на електроенергію. Графік руху та переробки сировини наведено на рис. 4.

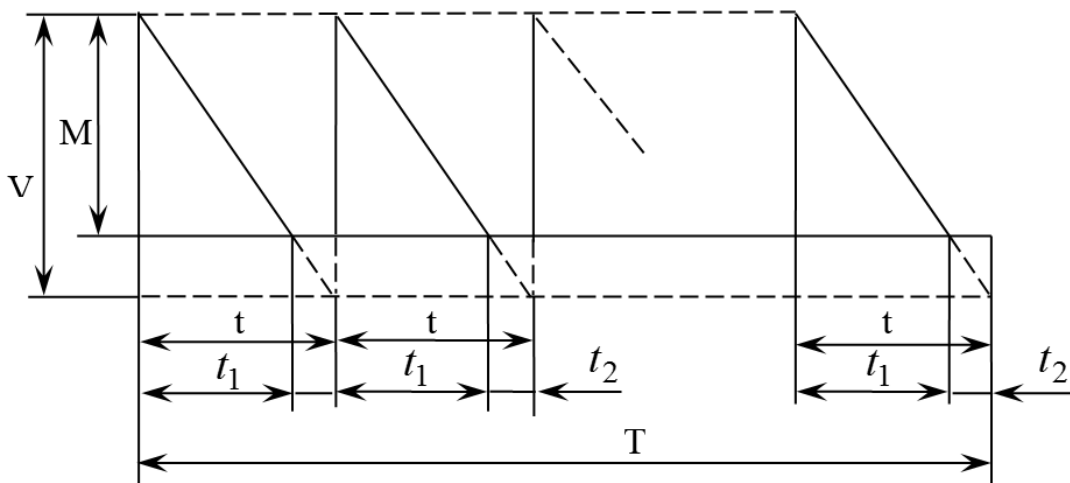


Рис. 3. Графік рудопостачання з урахуванням попиту, що не задовольняється

Джерело: власна розробка автора

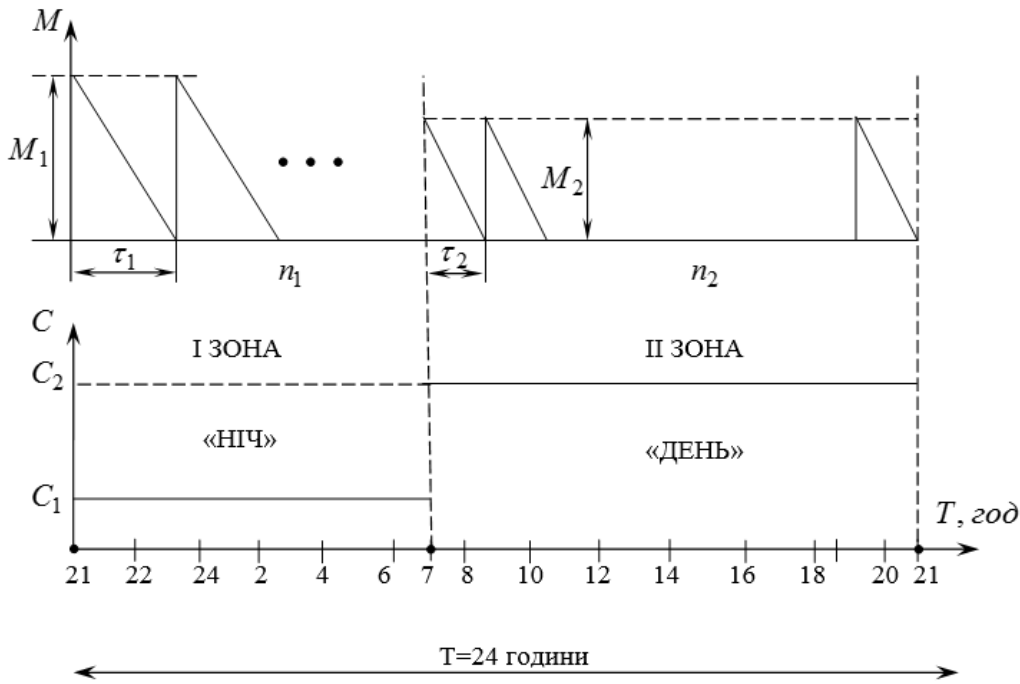


Рис. 4. Графік руху та переробки сировини при двозонному тарифі на електроенергію

Умовні позначення: M – маса сировини; M_1, M_2 – маси поставки, відповідно, у зонах I та II; C – тариф на електроенергію; C_1 – тариф на електроенергію у першій зоні «ніч»; C_2 – тариф на електроенергію у другій зоні «день»; τ_1, τ_2 – час переробки партії сировини, відповідно, у першій та другій зоні; T – період планування – доба, 24 години.

Джерело: власна розробка автора

Розглянемо модель руху та переробки сировини окремо в кожній зоні, зробивши у відомих формулах моделі Уілсона заміну собівартості зберігання сировини на собівартість її переробки в умовах енергоємних підприємств.

Оптимальна маса партії сировини у першій зоні під час дії тарифу на електроенергію C_1 становитиме:

$$M_{01} = \sqrt{\frac{2Q_1q_n}{T_1q}}, \quad (13)$$

де Q_1 – планова потреба підприємства у сировині; q_n – собівартість постачання сировини; q – собівартість переробки сировини; T_1 – час дії тарифу C_1 .

Оптимальна партія сировини у другій зоні під час дії тарифу на електроенергію C_2 :

$$M_{02} = \sqrt{\frac{2Q_2q_n}{T_2q}}, \quad (14)$$

де Q_2 – планова потреба підприємства у сировині за час дії тарифу C_2 ; q – собівартість переробки сировини; T_2 – час дії тарифу C_2 .

Оптимальна кількість поставок сировини у першій та другій зонах:

$$n_{01} = \frac{Q_1}{M_{01}}, \quad (15)$$

$$n_{02} = \frac{Q_2}{M_{02}}, \quad (16)$$

Оптимальні періоди подачі транспортних засобів під розвантаження сировини:

$$\tau_{01} = \frac{T_1}{n_{01}}, \quad (17)$$

$$\tau_{02} = \frac{T_2}{n_{02}}. \quad (18)$$

Витрати на доставку та електроенергію при переробці сировини

– у першій зоні:

$$W_1 = \frac{M_{01}T_1}{2}q + \frac{Q_1}{M_{01}}C_n. \quad (19)$$

– у другій зоні:

$$W_2 = \frac{M_{02}T_2}{2}q + \frac{Q_2}{M_{02}}C_n. \quad (20)$$

Загальні витрати за добу при двозонному тарифі на електроенергію:

$$W = \frac{M_{01}T_1}{2}q + \frac{Q_1}{M_{01}}C_{\pi} + \frac{M_{02}T_2}{2}q + \frac{Q_2}{M_{02}}C_{\pi}. \quad (21)$$

В умовах тризонного тарифу на електроенергію (рис. 5) формули розрахунку графіка постачання та переробки сировини будуть аналогічними.

Оптимальна партія сировини, що постачається у зоні дії третього тарифу на електроенергію:

$$M_{03} = \sqrt{\frac{2Q_3q_{\pi}}{T_3q}}. \quad (22)$$

Оптимальна кількість поставок сировини у третій зоні:

$$n_{03} = \frac{Q_3}{M_{03}}. \quad (23)$$

Оптимальні періоди подачі транспортних засобів під розвантаження сировини у третій зоні:

$$\tau_{03} = \frac{T_3}{n_{03}}. \quad (24)$$

Загальні витрати за добу на постачання та переробку сировини при тризонному тарифі на електроенергію:

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \quad (25)$$

де W_1, W_2, W_3 – витрати на електроенергію, відповідно, у першій, другій та третій зонах.

$$W_3 = \frac{M_{03}T_3}{2}q + \frac{Q_3}{M_{03}}C_{\pi}. \quad (26)$$

Планову кількість сировини Q_1, Q_2, Q_3 , що постачається, під час дії відповідних тарифів на електроенергію розраховують за формулами:

$$Q_1 = \frac{Q}{24}T_1, \quad (27)$$

$$Q_2 = \frac{Q}{24}T_2, \quad (28)$$

$$Q_3 = \frac{Q}{24}T_3, \quad (29)$$

де Q – планова добова кількість сировини, що постачається; $T_1 = 7$ год; $T_2 = 8$ год; $T_3 = 9$ год.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено:

- при багатозонному тарифі на електроенергію оптимальна партія поставки сировини нелінійно залежить від планової потреби сировини, собівартості переробки та постачання, зонального тарифу на електроенергію та часу його дії;

- при плануванні поставок сировини в умовах багатозонного тарифу на електроенергію кількість поставок та період постачання визначаються окремо для кожної зони дії тарифу на електроенергію.

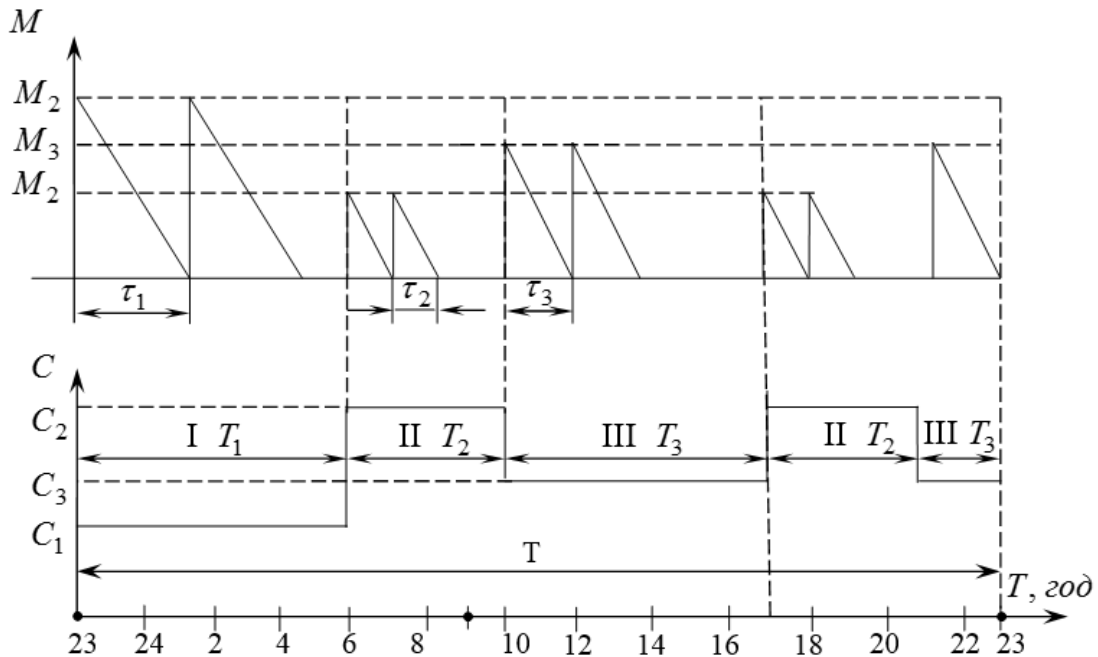


Рис. 5. Графік руху та переробки сировини при тризонному тарифі на електроенергію

Джерело: власна розробка автора

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Горенко А. А., Кочура Є. В. Формування собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонального тарифу на електроенергію. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 146 с.
2. Кравець В. Г., Темченко О. А., Темченко Г. В., Тайєб-Тамаша Я. Економіко-технологічні передумови формування програми енергозбереження на гірничорудних підприємствах. *Вісник НТТУ «КПІ»*. 2015. Вип. 27. С. 66–76.
3. Максимов С. В., Темченко Г. В. Дослідження енергомисткості витрат гірничорудних підприємств. *Економічний вісник НГУ*. 2012. № 2. С. 52–56.

REFERENCES:

1. Horenko, A. A., Kochura, Ye. V. (2012). Formuvannia sobivartosti produktsii drobarnykh fabryk v umovakh bahatozonalnogo taryfu na elektroenerhiiu [Formation of the cost price of products of crushing factories in the conditions of a multi-zonal electricity tariff]. Dnipropetrovsk: National Mining University, 146 p. (in Ukrainian)
2. Kravets, V. H., Temchenko, O. A., Temchenko, H. V., Taiieb-Tamasha, Ya. (2015). Ekonomiko-tekhnologichni peredumovy formuvannia prohramy enerhozberezhennia na hirnychorudnykh pidpriumstvakh [Economic and technological prerequisites for the formation of an energy saving program at mining enterprises]. *Visnyk NTTU «KPI»*, vol. 27, pp. 66–76.
3. Maksymov, S. V., Temchenko, H. V. (2012). Doslidzhennia enerhomistkosti vytrat hirnychorudnykh pidpriumstv [Study of the energy consumption of mining enterprises]. *Ekonomichnyi visnyk NHU*, no. 2, pp. 52–56.