

БЕРІДЗЕ ТЕТЯНА

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2509-3242>e-mail: beridzet2016@gmail.com

КАСАТКІНА ІРИНА

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8967-6442>e-mail: ms.irina.vital@gmail.com

БОЙКО СЕРГІЙ

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9778-2202>e-mail: bsn1987@i.ua

ВИШНЕВСЬКИЙ СВЯТОСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2159-603X>e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com

СИСТЕМНО-ПАРАМЕТРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

Узагальнено й досліджено складові електроспоживання залізородними підприємствами. На засадах системності побудовано математичну модель, яка дозволяє розробити методiku щодо оцінювання ефективності споживання ЕЕ при трьох зонній тарифній сітці. Математичне моделювання споживання ЕЕ залізородними підприємствами, як складного об'єкту дає можливість чисельно з'ясувати вплив величини значень спожитої ЕЕ на вартість електроспоживання залізородним підприємством. Такий підхід дав можливість отримати кількісні показники щодо ефективності споживання ЕЕ на конкретних залізородних підприємствах. Набула подальшого розвитку методика оцінювання ефективності електроспоживання на залізородних підприємствах. Вперше сформульована та побудована модель щодо оцінювання ефективності електроспоживання при трьох зонній тарифній сітці. Запропонована методика може бути покладена в основу уніфікації кількісного оцінювання ефективності електроспоживання. Аналіз результатів дає можливість провести кількісну й якісну оцінку ефективності процесів споживання електричної енергії на засадах системно-параметричного моделювання для залізородних підприємств. Розроблена методика може бути уніфікована щодо впровадження на залізородних підприємствах національної економіки. Існує доцільність включення розробленої моделі в практику відповідних розрахунків економічної діяльності залізородних підприємств.

Ключові слова: електроспоживання, електропостачання, вартість електричної енергії, моделювання, залізородне підприємство, ефективність електроспоживання

BERIDZE TETIANA, KASATKINA IRINA, BOYKO SERHIY

National university "Zaporizhzhia polytechnic"

VYSHNEVS'KYY SVIATOSLAV

Vinnytsia National Technical University

SYSTEM-PARAMETRIC ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY IRON ORE ENTERPRISES

The components of electricity consumption by iron ore enterprises are generalized and studied. On the basis of systematicity, a mathematical model has been built that allows developing a methodology for assessing the efficiency of electricity consumption under a three-zone tariff grid. The mathematical modeling of electricity consumption by iron ore enterprises as a complex object makes it possible to numerically determine the impact of the value of electricity consumption on the cost of electricity consumption by an iron ore enterprise. This approach made it possible to obtain quantitative indicators of the efficiency of electricity consumption at specific iron ore enterprises. The methodology for assessing the efficiency of electricity consumption at iron ore enterprises was further developed. For the first time, a model for assessing the efficiency of electricity consumption under a three-zone tariff grid was formulated and built. The proposed methodology can be used as a basis for unifying the quantitative assessment of electricity consumption efficiency. The analysis of the results makes it possible to conduct a quantitative and qualitative assessment of the efficiency of electricity consumption processes on the basis of system-parametric modeling for iron ore enterprises. The developed methodology can be unified for implementation at iron ore enterprises of the national economy. It is advisable to include the developed model in the practice of relevant calculations of the economic activity of iron ore enterprises.

It has been established that in the current conditions of functioning of iron ore enterprises it is advisable to study the consumption of electricity as a systemic complex object. The carried out analysis made it possible to build an objective function that takes into account the consumption of electricity by ore intake devices depending on the time of day

Keywords: electricity consumption, electricity supply, cost of electricity, modeling, iron ore enterprise, the efficiency of electricity consumption

Вступ

Залізородна промисловість займає важливе місце в економіці України. У світі постійно триває конкурентна боротьба за ринки збуту залізородної сировини (ЗРС). Глибини видобутку ЗРС з роками збільшуються, що логічно, тягне у себе збільшення собівартості видобутку цього виду корисних копалин. Особливістю залізородних підприємств є їхня значна енергоємність. Слід зазначити, що понад 30% собівартості видобутку ЗРС сучасними підприємствами з підземними способами видобутку є енерговитрати, де, своєю чергою, частка електричної енергії – 90% [1]. Сьогодні обмежуватися лише контролем за рівнем

споживання електроенергії недостатньо – необхідно керувати цим процесом. При цьому система управління повинна превентивно реагувати на виникнення відповідних факторів, що обурюють, у технології змін режимів функціонування електроприймачів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Результати досліджень [2] свідчать про наявність багатьох альтернатив щодо підходів до підвищення електроенергоефективності гірничих підприємств. Але у цих дослідженнях підхід обмежувався лише рівнем вибору структур систем електропостачання підземних гірничих підприємств. Тому, враховуючи нові тимчасові тенденції, у роботі [3] було сформовано та розглянуто проблему необхідності управління енергопотоками гірничих підприємств. У той же час, конкретних рішень у цих дослідженнях не вистачало. Погіршення технологічних умов зі збільшенням глибини видобутку ЗРС ставить проблему необхідності підвищення енергоефективності видобутку ЗРС на новий ступінь пошуку. Це додатково підтверджується і тим, що більшість відомих досліджень [4] велися для умов видобутку ЗРС на глибинах до 1000 м. Нині ці позначки вже перетнули рубежі 1500–2100 м. Зрозуміло, що обсяги споживання електроенергії (ЕЕ) на таких глибинах, а отже, і рівень впливу на загальні показники собівартості видобутку ЗРС, виростили та зростатимуть. Усе це дозволяє стверджувати, що у сучасних умовах доцільна оцінка ефективності споживання ЕЕ залізрудних підприємств із підземним способом видобутку ЗРС.

Метою статті є – висвітлення запропонованого авторами системно-параметричного оцінювання ефективності споживання електричної енергії залізрудними підприємствами.

Результати дослідження

Відповідно до визначеної мети та завдань необхідно організувати такий режим роботи залізрудного підприємства загалом та процесу забору руди окремо, щоб вибрати заданий обсяг рудної маси. При цьому мінімізувати вартість споживання електроенергії, яка витрачається на заданий обсяг. На підґрунті системно-параметричного моделювання постановка задачі запишеться наступним чином [5].

Обмеження у вигляді необхідного обсягу споживання ЕЕ для вибору заданого обсягу рудної маси

$$\int_0^T W(t)dt = Q_0, \tag{1}$$

де $W(t)$ - активна потужність ЕЕ, що споживається в момент часу t , кВт,

$[0, T]$ - проміжок часу роботи пристрою забору ЗРС, година,

Q_0 - обсяг споживання ЕЕ, що витрачається на забір заданого обсягу ЗРС, кВт-год.

При цьому повинні виконуватися обмеження величини активної потужності ЕЕ, що споживається,

$$0 \leq W(t) \leq W_{max}, \tag{2}$$

де W_{max} – максимальна величина активної потужності ЕЕ, що споживається, кВт.

Мінімізація вартості споживання ЕЕ, що витрачається на забір заданого об'єму ЗРС, формулюється як завдання мінімізації функціоналу по активній потужності ЕЕ $W(t)$, що споживається, за виділений проміжок часу $[0, T]$

$$Z = \int_0^T c(t)W(t)dt \rightarrow \min, \tag{3}$$

де $c(t)$ – ціна спожитої ЕЕ в залежності від часу, грош. один./кВт-год.

Таким чином, умови (1), (2) та (3) визначають математичну постановку задачі мінімізації вартості спожитої ЕЕ за умови заданого обсягу забору ЗРС.

Розглянемо рішення розглянутого завдання, обмежуючись умовою, що вартість активної потужності електроенергії в залежності від часу набуває трьох значень, тобто є кусково-постійною функцією. Одна величина (менша) відноситься до нічного часу, друга величина (середня), напівпікова, відноситься до ранкового часу, третя (велика), пікова, відноситься до денного часу роботи пристрою забору ЗРС.

Функція ціни ЕЕ в залежності від часу доби може бути представлена наступною формулою

$$c(t) = \begin{cases} c_1, & 0 \leq t < t_1 \\ c_2, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ c_3, & t_2 < t \leq T \end{cases} \tag{4}$$

Для вирішення задачі (1), (2), (3) скористаємося видом функції (4). Користуючись лінійністю інтеграла, знаходимо

$$\int_0^T c(t)W(t)dt = c_1 \cdot \int_0^{t_1} W(t)dt + c_2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} W(t)dt + c_3 \cdot \int_{t_2}^T W(t)dt. \tag{5}$$

Введемо позначення

$$Q_1 = \int_0^{t_1} W(t)dt, \quad Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} W(t)dt, \quad Q_3 = \int_{t_2}^T W(t)dt, \tag{6}$$

де Q_1, Q_2, Q_3 – витрати ЕЕ на ділянках часу, де вартість електроенергії c_1, c_2 і c_3 , відповідно.

Тоді функціонал (3) з урахуванням (6) запишеться так

$$Z = c_1 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_2 + c_3 \cdot Q_3. \tag{7}$$

У свою чергу, обмеження (1) можна записати у вигляді

$$\int_0^T W(t)dt = \int_0^{t_1} W(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} W(t)dt + \int_{t_2}^T W(t)dt,$$

або, з урахуванням (1) та (6),

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_0. \tag{8}$$

Обмеження (2) на першому проміжку часу шляхом інтегрування представиться у вигляді

$$0 \leq \int_0^{t_1} W(t)dt \leq \int_0^{t_1} W_{max}dt. \tag{9}$$

Відповідно до (6) нерівність (9) запишеться у вигляді

$$0 \leq Q_1 \leq \int_0^{t_1^f} W_{max} \cdot dt \quad (10)$$

Обчислюючи інтеграл у правій частині нерівності (10), знаходимо обмеження витрат ЕЕ на ділянці часу, де вартість електроенергії c_1 ,

$$0 \leq Q_1 \leq \bar{Q}_1, \quad (11)$$

де $\bar{Q}_1 = W1_{max}$.

Обмеження (2) на другому проміжку часу $[t_1, t_2]$ шляхом інтегрування представиться у вигляді

$$0 \leq \int_{t_1}^{t_2} W(t) dt \leq \int_{t_1}^{t_2^f} W_{max} \cdot dt \quad (12)$$

Відповідно до (6), нерівність (12) після інтегрування запишеться у вигляді

$$0 \leq Q_2 \leq \bar{Q}_2, \quad (13)$$

де $\bar{Q}_2 = W2_{1max}$.

Обмеження (2) на третьому проміжку часу $[t_2, T]$ шляхом інтегрування представиться у вигляді

$$0 \leq \int_{t_2}^T W(t) dt \leq \int_{t_2}^{T^f} W_{max} \cdot dt \quad (14)$$

Відповідно до (6), нерівність (14) після інтегрування запишеться у вигляді

$$0 \leq Q_3 \leq \bar{Q}_3, \quad (15)$$

де $\bar{Q}_3 = W2_{max}$.

Враховуючи отримані результати, завдання мінімізації енергоспоживання (1), (2), (3) з урахуванням (11), (13) та (15) записується у вигляді

$$Z = c_1 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_2 + c_3 \cdot Q_3 \rightarrow \min_{Q_1, Q_2, Q_3}, \quad (16)$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_0, \quad (17)$$

$$0 \leq Q_1 \leq \bar{Q}_1, \quad (18)$$

$$0 \leq Q_2 \leq \bar{Q}_2, \quad (19)$$

$$0 \leq Q_3 \leq \bar{Q}_3. \quad (20)$$

Аналіз задачі (16), ..., (20) показує, що це завдання відноситься до задач лінійного програмування [6]. Таке завдання можна вирішити геометрично.

Перш, ніж вирішувати завдання (16), ..., (20), необхідно визначити умови, за яких рішення існує. Це стосується обмежень (18), (19) та (20). Обмеження (18), (19), (20) визначається трьома змінними Q_1 , Q_2 і Q_3 , тому завдання зручно вирішувати геометрично. Переходимо до двох змінних, користуючись рівністю (17), знаходимо

$$Q_3 = Q_0 - Q_1 - Q_2. \quad (21)$$

Тоді, з урахуванням (21), функціонал (7) прийме вигляд

$$Z = c_1 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_2 + c_3 \cdot (Q_0 - Q_1 - Q_2). \quad (22)$$

Після перетворень (22), отримуємо

$$Z = (c_1 - c_3) \cdot Q_1 + (c_2 - c_3) \cdot Q_2 + c_3 \cdot Q_0. \quad (23)$$

Користуючись (23), знаходимо вираз функціонала, який залежить тільки від двох змінних

$$Z_1 = (c_1 - c_3) \cdot Q_1 + (c_2 - c_3) \cdot Q_2, \quad (24)$$

де $Z_1 = Z - c_3 \cdot Q_0$.

Користуючись (18), (19), знаходимо обмеження на змінну Q_3 . Дійсно, згідно (20) і (21), послідовно маємо

$$\begin{aligned} 0 &\leq Q_0 - Q_1 - Q_2 \leq \bar{Q}_3, \\ Q_0 &\geq Q_1 + Q_2 \geq Q_0 - \bar{Q}_3. \end{aligned} \quad (25)$$

В результаті функціонал (24) і умови (18), (19) і (25) визначають задачу лінійного програмування для двох змінних з метою його мінімізації.

Умови (18) і (19) визначають прямокутник обмежень на площині в координатах $Q_1 Q_2$. В свою чергу, нерівність (25) виділяє полосу на аналізованій площині. Зрозуміло, що задача буде мати розв'язок, якщо перетин прямокутника, обмеженого нерівностями (18) і (19) та полоси (25) буде непустим, тобто

$$[0; \bar{Q}_1] \cap [0; \bar{Q}_2] \cap [Q_0 \geq Q_1 + Q_2 \geq Q_0 - \bar{Q}_3] \neq \emptyset.$$

В якості прикладу скористаємось геометричним зображенням задачі.

Для цього скористаємось уявленням обмежень (18), (19) та (25) на площині в координатах $Q_1 Q_2$.

Умову існування рішення поставленої задачі можна визначити, як наявність ненульової відстані між кутовою точкою $M(\bar{Q}_1; \bar{Q}_2)$ і прямою, що проходить через точки $(Q_0 - \bar{Q}_3; 0)$ і $(0; Q_0 - \bar{Q}_3)$, тобто рівнянням, що задається у вигляді

$$l): Q_2 + Q_1 = Q_0 - \bar{Q}_3. \quad (26)$$

Цю умову, користуючись методами аналітичної геометрії, можна записати як відхилення точки $M(\bar{Q}_1; \bar{Q}_2)$ від прямої l

$$\rho(M; l) = \frac{\bar{Q}_2 + \bar{Q}_1 - Q_0 + \bar{Q}_3}{\sqrt{2}} < 0,$$

або

$$\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \bar{Q}_3 - Q_0 < 0. \tag{27}$$

Враховуючи (11), (13) і (15), нерівність (27) можна записати у вигляді

$$W_{\max} \cdot t_1 + W_{\max} \cdot (t_2 - t_1) + W_{\max} \cdot (T - t_2) < Q_0,$$

або, після алгебраїчних перетворень,

$$W_{\max} < \frac{Q_0}{T}. \tag{28}$$

Таким чином, умова (28) визначає умову відсутності розв'язання задачі (18), (19) і (20).

Розглянемо геометричне рішення задачі (16),..., (20) за умови існування рішення, тобто виконання умови

$$W_{\max} \geq \frac{Q_0}{T}. \tag{29}$$

На рис.3 представлено графічне уявлення ситуації за існування рішення. Більш товстими лініями виділено область можливого існування рішення. Разом з тим, враховуючи обмеження (17) у вигляді рівності, можна стверджувати, що рішення має перебувати на відрізку $[M_1 M_2]$. Для знаходження конкретного значення скористаємося умовою (24). Напрямок найбільш швидкого зростання функціоналу Z_1 визначається його градієнтом, який записується у вигляді

$$\text{grad } Z_1 = \left(\frac{\partial Z_1}{\partial Q_1}, \frac{\partial Z_1}{\partial Q_2} \right). \tag{30}$$

Враховуючи вид функціоналу Z_1 (24), знаходимо, згідно (30)

$$\text{grad } Z_1 = (c_1 - c_3, c_2 - c_3). \tag{31}$$

На рис. 3 показано відповідно (31) напрям градієнта Z_1 за умови, що $c_1 - c_3 < c_2 - c_3$ (це відповідає співвідношенню вартості електроенергії в нічний, ранковий і денний часи). Рухаючись у напрямку, протилежному напрямку градієнта Z_1 , знаходимо найменшу величину функціоналу Z_1 . Ця величина буде досягнута у точці

$$M_1 (Q_0 - \bar{Q}_3 - \bar{Q}_2 \cdot \bar{Q}_2). \tag{32}$$

При цьому мінімальна величина цільового функціоналу Z_1 становитиме

$$Z_{1\min} = (c_1 - c_3) \cdot (Q_0 - \bar{Q}_3 - \bar{Q}_2) + (c_2 - c_3) \cdot \bar{Q}_2. \tag{33}$$

Враховуючи (24), маємо

$$Z_{\min} = c_1 \cdot (Q_0 - \bar{Q}_2 - \bar{Q}_3) + c_2 \cdot \bar{Q}_2 + c_3 \cdot \bar{Q}_3. \tag{34}$$

Таким чином, оптимальні величини електроспоживання при трьохзонній тарифній сітці становлять

$$\hat{Q}_1 = Q_0 - \bar{Q}_2 - \bar{Q}_3, \quad \hat{Q}_2 = \bar{Q}_2, \quad \hat{Q}_3 = \bar{Q}_3. \tag{35}$$

Подальші дослідження вимагають залучення статистичних даних з споживання ЕЕ на окремих підприємствах із підземним способом видобутку ЗРС для підтвердження одержаних результатів.

В якості прикладу, для наочності, наведемо дослідження споживання ЕЕ підземними підприємствами ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат», Україна. Електрогенеруючі підприємства (обленерго), прагнучі до ідеального добового вирівнювання обсягів «виробництво-споживання» ЕЕ, стимулюють споживачів. Цінова політика генеруючих підприємств відносно споживачів ЕЕ відповідає часовим проміжкам, які утворюють зонні тарифи споживання ЕЕ. В табл. 1 приведені відповідні дані для трьохзонних тарифів споживання ЕЕ. Аналіз даних табл. 1 показує, що ціна спожитої ЕЕ змінюється протягом доби.

Таблиця 1

Зонні тарифи споживання ЕЕ

Зонні тарифи	Ціна, гр./кВт-год	Межі тарифів
c_n (ніч)	0,96	з 24 год. по 7 год.
c_p (ранок), напівпік	1,94	з 7 год по 8 год, з 11 год по 20 год, з 23 год по 24 год
c_d (день), пік	3,43	з 8 год. по 11 год, з 20 год по 23 год

На рис. 1 представлені графіки залежності ціни споживання ЕЕ від часу доби, згідно даних табл.1.

Найбільша ціна спожитої ЕЕ спостерігається вдень, що, пов'язано з великою кількістю електроспоживачів і викликає нестачу ЕЕ. Навпаки, вночі ціна спожитої ЕЕ є найменшою, що пояснюється малою кількістю працюючих електроспоживачів і наявністю зайвої ЕЕ. Таким чином, перед підприємствами взагалі і залізрудними, зокрема, постає проблема розв'язання задачі розподілу споживання ЕЕ в годинах доби з одночасним забезпеченням неперервності технології виробничих процесів.

На рис. 2 представлено добовий графік споживання ЕЕ на аналізованому підприємстві.

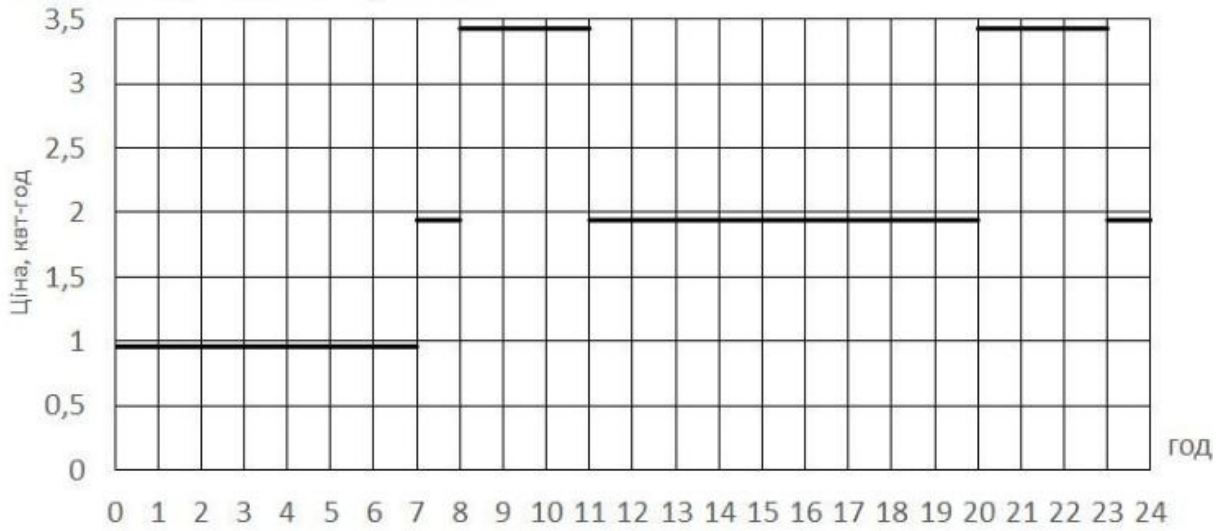


Рис. 1. Залежність ціни споживання ЕЕ від часу

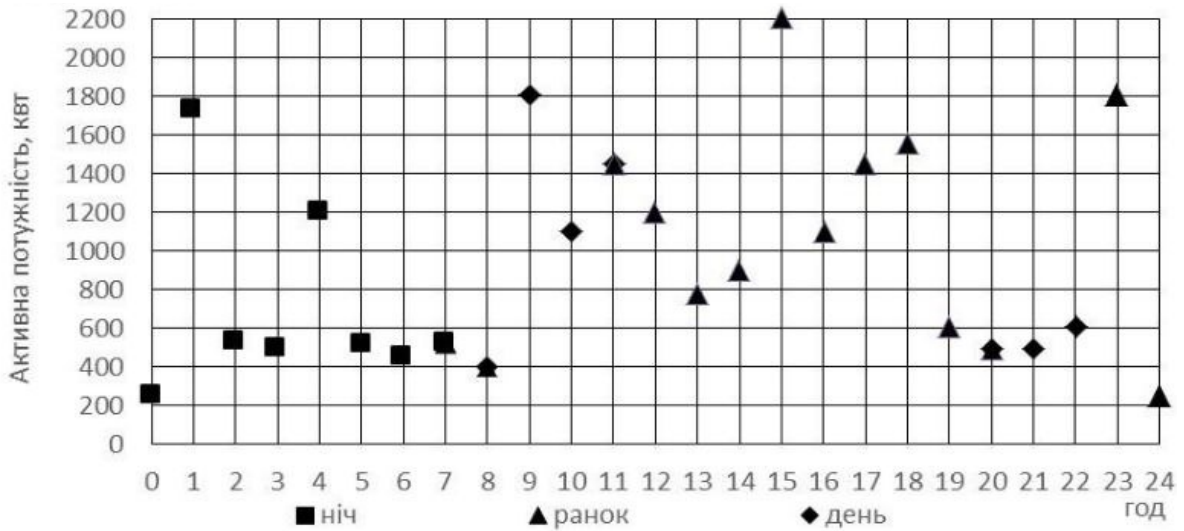


Рис. 2. Добовий графік споживання ЕЕ підземним підприємством

Обчислюємо інтегральні характеристики реального споживання електроенергії. Витрати електроенергії протягом доби становлять величину

$$Q_0 = \int_0^{24} W(t)dt = 23590 \text{ кВт-год.} \tag{36}$$

Згідно (29) визначимо умову існування розв’язання задачі (16),...(20)

$$W \frac{Q_0}{T} \frac{23590}{24} \text{ макс кВт.} \tag{37}$$

Згідно рис.2, можна прийняти, що

$$W_{\text{max}} \text{кВт.} \tag{38}$$

Далі обчислимо затрати на споживання електроенергії, згідно вигляду функціоналу (7). Попередньо знаходимо, згідно (6), споживання електроенергії для зонних тарифів «ніч», «ранок»(напівпік) і «день»(пік), відповідно,

$$Q_{\text{ніч}} = 5680 \text{ кВт-год,} \tag{39}$$

$$Q_{\text{ранок(напівпік)}} = 13920 \text{ кВт-год,} \tag{40}$$

$$Q_{\text{день(пік)}} = 3990 \text{ кВт-год.} \tag{41}$$

Підставляємо здобуті результати (39), (40) і (41) в формулу (7) і, користуючись даними табл. 1, знаходимо загальні витрати на електроспоживання за добу в гривнях,

$$Z = c_{\text{ніч}}Q_{\text{ніч}} + c_{\text{ранок}}Q_{\text{ранок}} + c_{\text{день}}Q_{\text{день}} = 0,96 \cdot 5680 + 1,94 \cdot 13920 + 3,43 \cdot 3990 = 46143,3 \text{ грн} \tag{42}$$

Далі визначаємо проміжки часу для зонних тарифів, згідно табл.1,

$$\Delta t_{\text{ніч}} = 7 \text{ годин,} \quad \Delta t_{\text{ранок}} = 12 \text{ годин,} \quad \Delta t_{\text{день}} = 5 \text{ годин.} \tag{43}$$

Враховуючи (38), знаходимо обмеження для зонних тарифів

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{\text{ніч}} &= 2200 \cdot 7 = 15400 \text{ кВт - год,} \quad \bar{Q}_{\text{ранок}} = 2200 \cdot 12 = 26400 \text{ кВт - год,} \quad \bar{Q}_{\text{день}} = \\ &= 2200 \cdot 5 = 11000 \text{ кВт - год} \end{aligned} \tag{44}$$

Розглянемо постановку і розв’язання задачі лінійного програмування в даному випадку. Завдання

мінімізації енергоспоживання запишеться у вигляді

$$Z = 0,96 \cdot Q_{ніч} + 1,94 \cdot Q_{ранок} + 3,43 \cdot Q_{день} \rightarrow \min_{Q_{ніч}, Q_{ранок}, Q_{день}}, \quad (45)$$

$$Q_{ніч} + Q_{ранок} + Q_{день} = 23590, \quad (46)$$

$$0 \leq Q_{ніч} \leq 15400, \quad (47)$$

$$0 \leq Q_{ранок} \leq 26400, \quad (48)$$

$$0 \leq Q_{день} \leq 11000 \quad (49)$$

Переводимо задачу до двох змінних. Спочатку обчислюємо, згідно (44),

$$Q_{ніч} = 23590 - Q_{ранок} - Q_{день} \quad (50)$$

Далі підставляємо (47) в цільовий функціонал (42), що послідовно дасть

$$\begin{aligned} Z &= 0,96 \cdot Q_{ніч} + 1,94 \cdot Q_{ранок} + 3,43 \cdot (23590 - Q_{ніч} - Q_{ранок}), \\ Z - 3,43 \cdot 23590 &= (0,96 - 3,43) \cdot Q_{ніч} + (1,94 - 3,43) \cdot Q_{ранок}, \\ Z - 80913,7 &= -2,47 \cdot Q_{ніч} - 1,49 \cdot Q_{ранок}, \\ Z_1 &= -2,47 \cdot Q_{ніч} - 1,49 \cdot Q_{ранок}, \end{aligned} \quad (51)$$

де $Z_1 = Z - 80913,7$.

Для зручності розрахунків зробимо перетворення

$$Z_2 = 2,47 \cdot Q_{ніч} + 1,49 \cdot Q_{ранок}, \quad (52)$$

де $Z_2 = -Z_1$.

Згідно (51) завдання мінімізації (45) зміниться на завдання максимізації, тобто

$$Z_2 = 2,47 \cdot Q_{ніч} + 1,49 \cdot Q_{ранок} \rightarrow \max_{Q_{ніч}, Q_{ранок}} \quad (53)$$

Згідно умові (25), мають місце обмеження

$$\begin{aligned} 23590 - 11000 &\leq Q_{ніч} + Q_{ранок} \leq 23590, \\ 12590 &\leq Q_{ніч} + Q_{ранок} \leq 23590. \end{aligned} \quad (54)$$

Геометричне зображення задачі (53), (46), (47), (48) і (52) представлено на рис.3. Згідно заданих обмежень чорним кольором виділені обмеження допустимої області розв'язань задачі, яка представляє собою багатокутник. Згідно загальної теорії в одному із кутів цього багатокутника повинно знаходитися оптимальний розв'язок. Для знаходження цього кута скористаємось градієнтом функціонала (52)

$$\text{grad } Z_2 = \left(\frac{\partial Z_2}{\partial Q_{ніч}}; \frac{\partial Z_2}{\partial Q_{ранок}} \right) = (2,47; 1,49). \quad (55)$$

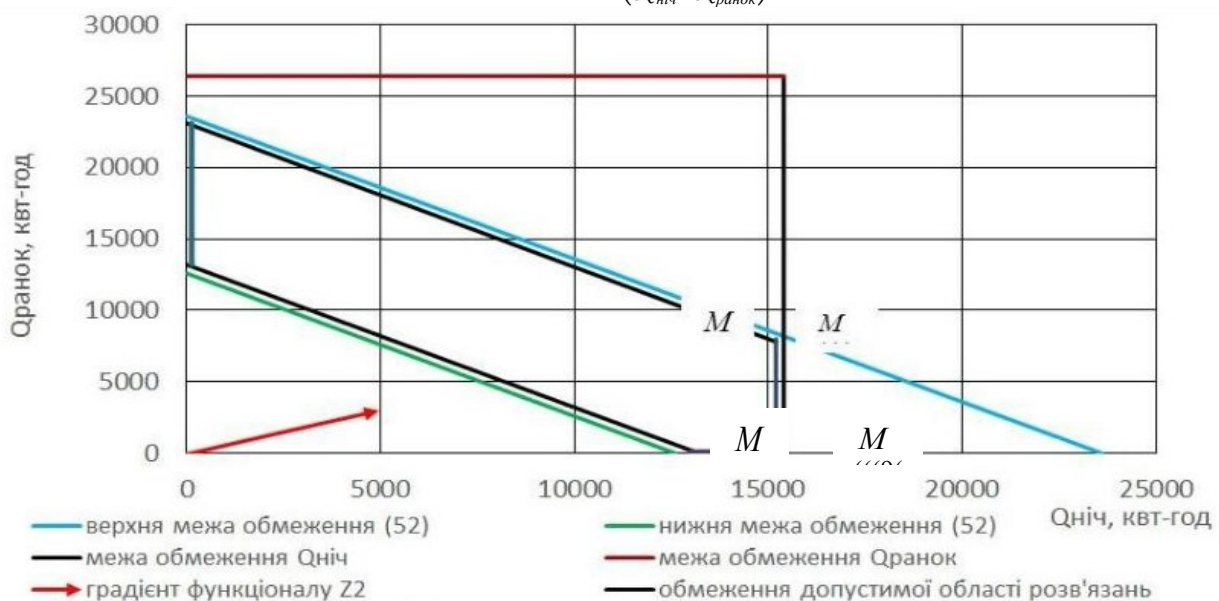


Рис. 3. Геометричне зображення задачі трьох зонної споживання ЕЕ

Рухаючись в напрямку градієнта (55) цільовий функціонал (50) зростає, досягаючи найбільшої величини в кутовій точці $M(15400; 8190)$.

Згідно формулі

$$Z_{\min} - 80913,7 = -2,47 \cdot \hat{Q}_{ніч} - 1,49 \cdot \hat{Q}_{ранок},$$

знаходимо, користуючись координатами точки $M(15400; 8190)$, мінімальну величину шуканого функціонала

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= 80913,7 - 2,47 \cdot 15400 - 1,49 \cdot 8190, \\ Z_{\min} &= 30672,6. \end{aligned} \quad (56)$$

При цьому оптимальні величини споживань ЕЕ склали

$$\hat{Q}_{ніч} = 15400 \text{ грн}, \quad \hat{Q}_{ранок} = 8190 \text{ грн}, \quad \hat{Q}_{день} = 0 \text{ грн}. \quad (57)$$

Таким чином, при розглянутій трьох зонній тарифікації достатньо споживати ЕЕ тільки вночі і вранці,

без її споживання вдень.

Застосування алгоритму мінімізації споживання ЕЕ залізорудних підприємств шляхом застосування трьох зонної тарифікації показав, що в зазначених видах підприємств існує відповідний резерв по оптимізації рівнів споживання ЕЕ, який базується на ефективному врахуванні цих тарифів. Це можна підтвердити шляхом порівняння реальних затрат з оптимальними затратами по споживанню ЕЕ для прикладу, який був розглянутий вище. З огляду на (42) і (54), знаходимо величину відносного зменшення споживання ЕЕ підприємства протягом доби

$$\frac{Z - Z_{\min}}{Z} = \frac{46143.3 - 30672.6}{46143.3} \cdot 100\% \approx 33.53\%. \quad (58)$$

Таким чином, споживання ЕЕ стаціонарних установок однієї залізорудної шахти при трьох зонній тарифікації для рівня активної потужності 2200 кВт протягом доби може бути зменшено на 33.53 %, при збереженні загального обсягу споживання ЕЕ.

Представляється доцільним дослідити, як змінюється розв'язання задачі при трьох зонному тарифі споживання ЕЕ в залежності від величини активної потужності W_{\max} згідно умові (37). В табл. 2 приведені результати відповідних розрахунків.

Таблиця 2

Залежність розв'язання задачі оптимального споживання ЕЕ від рівня активної потужності

W_{\max}	$Q_{\text{ніч}}$	$Q_{\text{ранок}}$	$Q_{\text{день}}$	Z_{\min}	$\frac{Z - Z_{\min}}{Z} \cdot 100\%$
1000	7000	12000	4590	45743.7	0.87
1200	8400	14400	790	38709.7	16.11
1400	9800	13790	0	36160.6	21.63
1600	11200	12390	0	34788.6	24.61
1800	12600	10990	0	33416.6	27.58
2000	14000	9590	0	32044.6	30.55
2200	15400	8190	0	30672.6	33.53

На рис.4 представлені графіки оптимальних величин споживання ЕЕ при трьох зонній тарифікації в залежності від рівня активної потужності, згідно даних табл. 2.

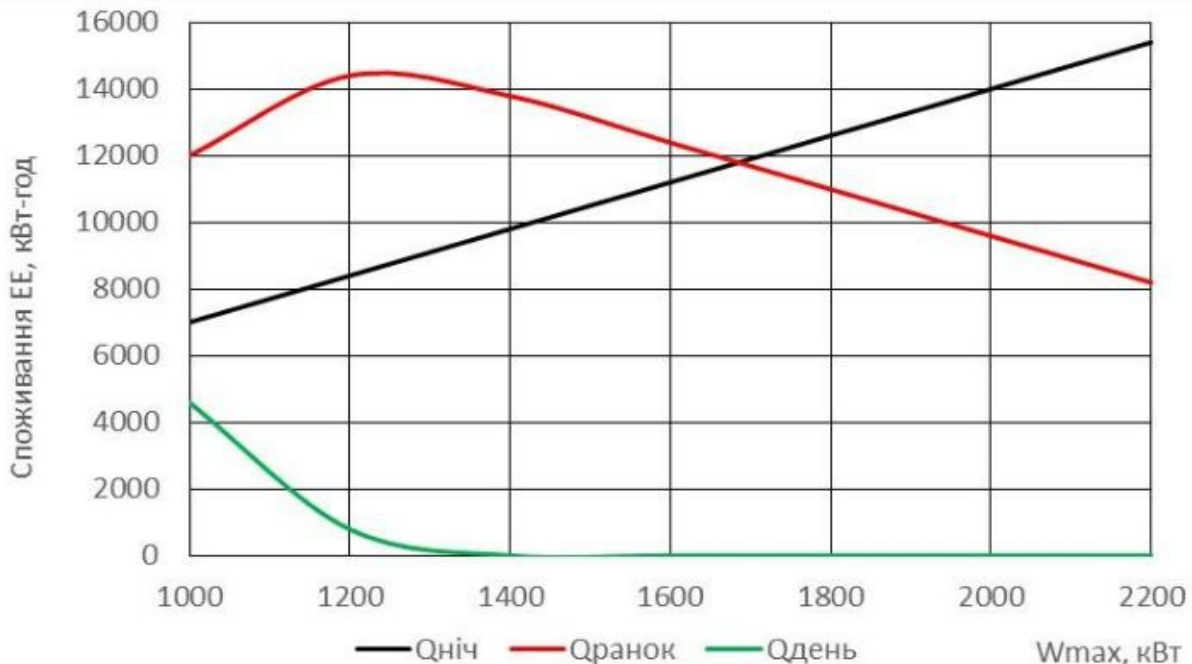


Рис.4. Графіки оптимальних величин споживання ЕЕ при трьох тарифікації в залежності від рівня активної потужності

Аналіз графіків, приведених на рис. 4, показує, що при зростанні активної потужності W_{\max} монотонно зростає споживання ЕЕ вночі, споживання ЕЕ вранці спочатку зростає, досягаючи найбільшої величини при $W_{\max} = 1300$ кВт, а потім монотонно спадає. В свою чергу, вдень споживання ЕЕ зменшується, а, починаючи з 1300 кВт, взагалі відсутнє.

На рис. 4 представлений графік залежності мінімальної вартості споживання ЕЕ від рівня активної потужності, згідно табл. 2.

Аналіз графіка на рис.8 показує, що мінімальна вартість споживання ЕЕ монотонно спадає при зростанні рівня активної потужності.

Особливістю методу розв'язування задачі, що рекомендується, є те, що залежність ціни споживання ЕЕ

від часу задається у вигляді кусково-постійної функції. Внаслідок цього, ціна споживання ЕЕ задається кусково-постійної функцією з трьома значеннями.

В порівнянні з існуючою практикою оцінювання рівнів споживання ЕЕ створено підґрунтя для забезпечення можливості застосування аналітичних методів для аналізу вартісно-цілових характеристик рівнів споживання ЕЕ на гірничодобувних підприємствах. Обмеження при цьому визначаються величиною активної потужності ЕЕ, що обумовлено характеристиками досліджуваного об'єкта.

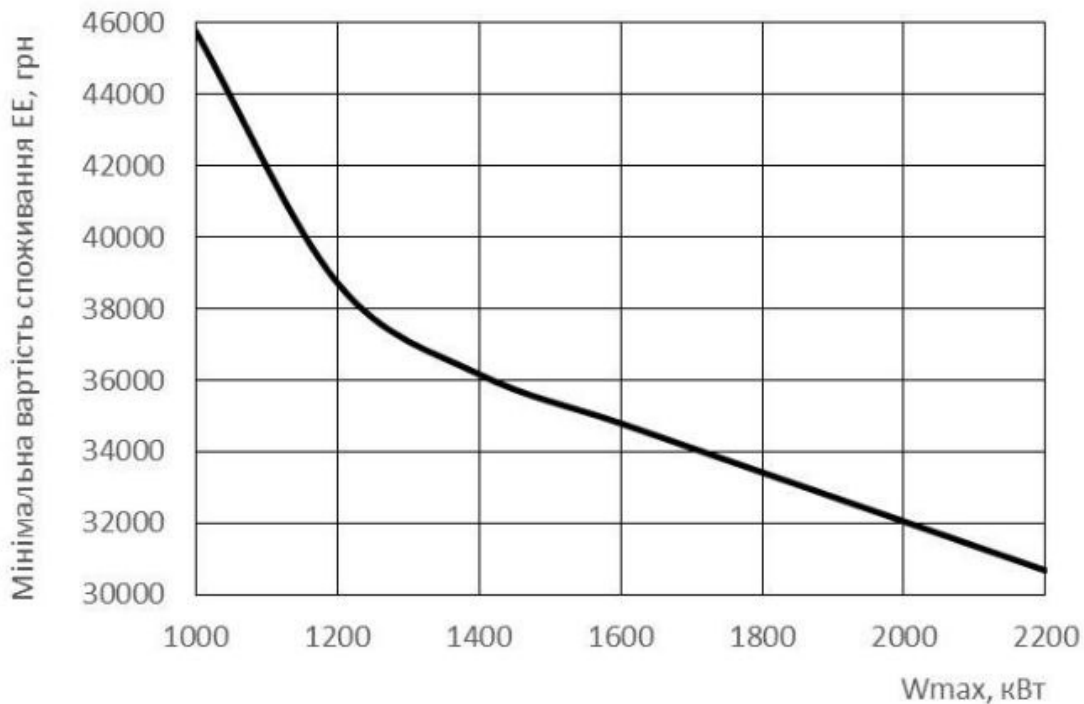


Рис. 5. Залежність мінімальної вартості споживання ЕЕ від рівня активної потужності

На рис.6 представлений графік залежності відносного зменшення споживання ЕЕ підприємства протягом доби, згідно даних табл.2.

Аналіз графіка, приведеного на рис.7, показує, що відносне зменшення споживання ЕЕ протягом доби в залежності від рівня активної потужності зростає. Характерно, що до 1300 кВт активної потужності ЕЕ відносне зменшення споживання ЕЕ зростає з більшою швидкістю, ніж при значеннях активної потужності ЕЕ, більше 1300 кВт. Разом з цим, розглянуті відрізки зростання відносного споживання ЕЕ мають лінійний характер.

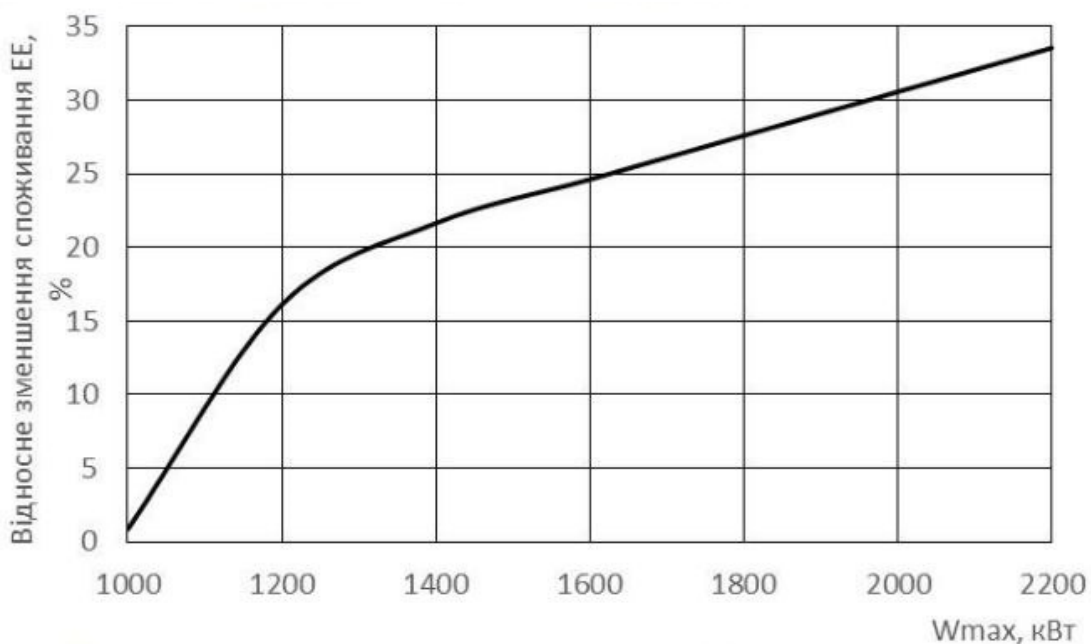


Рис.7. Графік відносного зменшення споживання ЕЕ протягом доби в залежності від рівня активної потужності

Висновки

1. Встановлено, що в сучасних умовах функціонування залізородних підприємств доцільно дослідити споживання ЕЕ, як системного складного об'єкта. Проведений аналіз дав можливість побудувати цільову функцію, що враховує споживання ЕЕ рудозабірними пристроями залежно від часу доби.

2. Виходячи з реальних умов функціонування залізородних підприємств, побудовано математичну модель, що дозволяє досліджувати залежність добових рівнів споживання ЕЕ у функції добових цін за спожити ЕЕ. Особливістю запропонованої математичної – залежність ціни за спожити ЕЕ задається кусково-постійною функцією.

3. Теоретичні результати аналізу побудови системно-параметричної моделі оцінювання ефективності споживання ЕЕ в порівнянні з реальними даними, дали підстави стверджувати щодо існування відповідного резерву при відповідній оптимізації рівнів споживання ЕЕ, на засадах ефективного обліку тарифів.

Література

1. Синчук И. О., Гузов Э.С., Яловая А.Н., Бойко С.Н.; под редакцией доктора техн. наук, профессора О.Н. Синчука. Электроэффективность производства с подземными способами добычи. / Монография Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 351 с.

2. Шидловський, А.К. Геоeкономiка та геополiтика України Навчальний посiбник. / А.К. Шидловський, Г.Г. Пiвняк, М.В. Рогоза, С.І. Випанасенко. – Д.: Нацiональний гiрничий унiверситет, 2002. – 282 с.

3. Бабець Є. С., Мельникова І. Є., Гребенюк С. Я., Лобов С. П.; за ред. Є. С. Бабця Дослідження технiкоeкономiчних показникiв гiрничодобувних пiдприємств України та ефективностi їх роботи в умовах змiнної кон'юнктури свiтового ринку залiзорудної сировини / Монографiя; НДГРi ДВНЗ «КНУ». Кривий Рiг: вид. Р. А. Козлов, 2015. 391 с

4. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. та ін. Основні параметри енергозабезпечення національної eкономiки на перiод до 2020 року // К.: Вид. Ін-ту електродинамiки НАН України, 2011. 275 с

5. Єгоршин О.О., Малиарець Л.М. Математичне програмування. Ч.: ВД «ІНЖЕК», 2006. 384с.

6. T. Beridze, Z. Baranik, S. Tkachenko, N. Kutova, O. Korolenko (2023). Investment principles in value-target processes of electricity consumption at iron ore enterprises. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. № 6, pp. 169-175

7. Лаврінeнко Н.М., Латинiн С.М., Фортунa В.В., Бескровний О.І. Основи eкономiко-математичного моделювання. Львiв: «Магнолiя 2006», 2010. 540с.

References

1. Synchuk Y. O., Huzov Э.С., Yalovaia A.N., Boiko S.N.; pod redaktsiei doktora tekhn. nauk, professora O.N. Synchuka. Elektroeffektivnost proyzvodstva s podzemnyimi sposobamy dobychy. / Monohrfyia Yzd. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 351 s.

2. Shydlovskiy, A.K. Neoeconomika ta heopolityka Ukrainy Navchalnyi posibnyk. / A.K. Shydlovskiy, H.H. Pivniak, M.V. Rohoza, S.I. Vypanasenko. – D.: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 2002. – 282 s.

3. Babets Ye. S., Melnykova I. Ye., Hrebenuk S. Ya., Lobov S. P.; za red. Ye. S. Babtsia Doslidzhennia tekhnikoekonomichnykh pokaznykiv hirnychodobuvnykh pidpriemstv Ukrainy ta efektyvnosti yikh roboty v umovakh zminnoi koniunktury svitovoho rynku zalizorudnoi syrovyny / Monohrafiia; NDHRI DVNZ «KNU». Kryvyi Rih: vyd. R. A. Kozlov, 2015. 391 s

4. Stohnii B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnyk A.V., Denysiuk S.P. ta in. Osnovni parametry enerhozabezpechennia natsionalnoi ekonomiky na period do 2020 roku // K.: Vyd. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. 275 s

5. Iehorshyn O.O., Maliarets L.M. Matematychnе prohramuvannia. Ch.: VD «ІNZhEK», 2006. 384s.

6. T. Beridze, Z. Baranik, S. Tkachenko, N. Kutova, O. Korolenko (2023). Investment principles in value-target processes of electricity consumption at iron ore enterprises. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. № 6, rr. 169-175

7. Lavrinenko N.M., Latynin S.M., Fortuna V.V., Beskrovnyi O.I. Osnovy ekonomiko-matematychnoho modeliuvannia. Lviv: «Mahnoliia 2006», 2010. 540s.