

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.77>

УДК 621.316.1:004.023:004.896

До проблеми «розумного» керування живленням приймачів до 1000 В підземних гірничорудних підприємств

Сінчук Олег Миколайович¹⁾

Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Електричної інженерії

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9078-7315>, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095

Михайленко Олексій Юрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Електричної інженерії

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-6652>, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215

Кобеляцький Даниїл Віталійович¹⁾

Аспірант каф. Електричної інженерії

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-7426>, dan150899@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 58645269300

¹⁾ Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50027, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається «розумне» керування електроспоживанням електроприймачів напругою до 1000 В підземного залізрудного підприємства для оптимізації добових витрат на електроенергію. Актуальність роботи обумовлюється високим рівнем енерговитрат на ведення гірничих процесів при підземному способі видобутку залізрудної сировини. Так як графік роботи електроприймачів до 1000 В не жорстко фіксований, то це дозволяє гнучко керувати електроспоживанням враховуючи погодинну зміну тарифів на електроенергію на протязі доби. Запропоновано евристичний підхід до «розумного» керування електроспоживанням на основі генетичного алгоритму, що є гарною альтернативою класичним підходам, як-то, наприклад, змішане цілочисельне лінійне програмування, яке обмежене до застосування в онлайн режимі через свій офлайн характер та неможливість обробки складних обмежень. Об'єктом дослідження є електроспоживання електроприймачів кількох блоків горизонту залізрудної шахти, що включають як постійно (вентиляція, водовідлив), так і змінно (бурові верстати, лебідки) працюючі у часі навантаження. Цільова функція була сформульована таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати на електроенергію підземного залізрудного підприємства на протязі доби шляхом оптимізації розподілу часу підключення до електромережі кожного приймача. Під час дослідження були проаналізовані три параметри налаштування генетичного алгоритму: обсяг популяції, вид функції схрещування та кількість елітних фенотипів. Найменші витрати на електроенергію (41454,99 грн) були досягнуті при розмірі популяції 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів в кожній популяції і функції схрещування Лапласа. Такі витрати були на 4,86% нижчими за найгірший результат (43470,55 грн), котрий мав місце при популяції 200 фенотипів, 0 елітних фенотипів і однокочковому виді схрещування. Виявилось, що число елітних фенотипів суттєво покращує якість роботи генетичного алгоритму та прискорює швидкість оптимізації. Перехід від 0 до 20 елітних фенотипів скоротило кількість поколінь необхідних для мінімізації витрат на електроенергію з 300 до 91 (на 69,7%). Також було встановлено, що мінімальні витрати на електроенергію підземного гірничорудного підприємства не завжди співпадають з найнижчими значеннями середньоквадратичної потужності, так як тут найважливішим є розподіл електроспоживання відносно часу коли діють пікові тарифи. Найбільш ефективні налаштування генетичного алгоритму забезпечили збалансованість споживання електроенергії на протязі доби, уникаючи споживання у часові проміжки, коли тарифи максимальні. Результати дослідження підтвердили доцільність використання генетичного алгоритму під час керування споживанням електроенергії і та інтеграції подібних систем при впровадженні smart grid-технологій у промислові енергосистеми.

Ключові слова: розумна електромережа; підземне гірничорудне підприємства; витрати на електроенергію; генетичний алгоритм; оптимізація

Системи електропостачання (СЕП) гірничих підприємств з підземними способами видобутку залізної руди (ЗР) з аналогами – підземними підприємствами (шахтами) в яких видобуваються такі види корисних копалин як вугілля, марганцева руда, кам'яна сіль тощо. Така різниця є результатом застосування різних варіантів з когорта підземного способу підземного видобутку того, чи іншого виду корисних копалин.

Та повертаючись до СЕП підземних залізрудних підприємств зазначимо, що їх специфіка лежить в площині не стільки їх структури, скільки в рівнях робочої напруги живлення споживачів електричної енергії (ЕЕ) та режимів роботи відповідальних машин і механізмів в форматі технології видобутку ЗР. Як встановлено [1] режими споживання ЕЕ приймачами даних видів підземних підприємств носять характер поточної стохастичності та потенціальної непрогнозуємі в обсягах споживання.

Такий характер функціонування СЕП формують як енергоємні приймачі ЕЕ з рівнем напруги живлення вище 1000 В., так і з напругою до 1000 В. При цьому, незважаючи на те, що встановлені електричні потужності останніх нижчі від попередньо зазначених, але

кількість їх значна, що в кінцевому варіанті впливає на процес формування графіка електричних навантажень даного виду гірничого підприємства.

Сьогодні через потребу в економії енергоресурсів гостро постає питання оптимізації споживання електроенергії на гірничорудних підприємствах, особливо для електроприймачів напругою до 1000 В, робота яких не прив'язана до строгого графіку. Це робить тему дослідження актуальною, зокрема в контексті інтеграції smart grid-технологій.

Для таких задач часто застосовують метод змішаного цілочисельного лінійного програмування [2], який відрізняється високою точністю та швидкістю розв'язання. Проте його ефективність знижується за наявності жорстких обмежень, а також у реальному часі – що критично частин smart grids у промислових енергосистемах. На відміну від задачі цілочисельного лінійного програмування, генетичні алгоритми, що належать до класу еволюційних методів, краще справляються з подібними умовами завдяки механізмам селекції, схрещування та мутації, імітуючи природну еволюцію. Вони ефективно застосовуються для задач оптимізації витрат на ЕЕ [3, 4].

У цій роботі запропоновано евристичну систему керування споживанням електроенергії на залізрудній шахті коли задача цілочисельного лінійного програмування вирішується з використанням генетичного алгоритму (ГА). Об'єктом дослідження виступає електрообладнання кількох блоків розробки залізрудного горизонту гірничорудного підприємства, що мають або незмінний (вентилятори, водовідлив, освітлення) графік роботи або змінний у часі (бурові верстати, лебідки та інше електрообладнання).

Цільова функція, екстремум якої потрібно визначити, має таку форму:

$$\underbrace{\arg \min}_{x_{ij}} J = \sum_{i=1}^{N_{год}} B_i \sum_{j=1}^{N_{cn}} P_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

де N_{cn} – число споживачів горизонту шахти; $N_{год}$ – кількість годин; i – номер години; j – споживач; x_{ij} – стан підключення j -го електроприймача до мережі в i -у годину; B_i – тариф на електроенергію в i -у годину, грн/кВт·год; P_{ij} – потужність електроприймача, кВт.

Згідно цільової функції (1) оптимізаційний алгоритм встановлює графік електричних навантажень шахтної підстанції, який забезпечить мінімум добових витрат на придбання електроенергії в електропостачальній компанії.

На графіках (рис. 1–5) наведені результати оптимізації за (1) витрат на ЕЕ в СЕП підземного гірничорудного підприємства. Під час експериментів змінювалися три параметри: величина популяції (100 або 200 фенотипів), вид функції схрещування (одноточкова, двоточкова або Лапласа), а також число елітних фенотипів (0, 5, 10 або 20). Метою рішення задачі було мінімізувати добові витрати на ЕЕ у грн. Також виявлялося покоління, у якій було досягнуто кінця роботи алгоритму, а також статистичні характеристики потужності, що споживають електроприймачі до 1000 В у кВт: мінімальна, максимальна і середньоквадратична.

Найнижчі витрати на ЕЕ, а саме 41454,99 грн/добу, фіксувалися при популяції у 100 фенотипів, кількості елітних фенотипів 10 і використанні схрещування Лапласа. Найвищі витрати 43470,55 грн/добу спостерігалися при величині популяції 200, 0 елітних фенотипів і одноточковому варіанті схрещування. Різниця між найгіршим і найкращим оптимізаційними результатами склало 2015,56 грн/добу, що становило 4,86 % від найліпшого значення. Це вказувало на те, що параметри ГА суттєво впливали на якість оптимізації функції (1).

Співставляючи вплив виду схрещування (рис. 1) на витрати на ЕЕ підземного гірничорудного підприємства на добу при фіксації інших параметрів, було виявлено перевагу схрещування методом Лапласа. Наприклад, при розмірі популяції 100 і 10 елітних фенотипах, схрещування Лапласа забезпечило витрати на ЕЕ 41454,99 грн/добу, що дало змогу зменшити витрати на ЕЕ на 287,61 грн/добу (або на 0,68 %) і на 1135,24 грн/добу (2,67%), якщо співставляти, відповідно, з одноточковим і двоточковим видами схрещування.

Така сама тенденція здебільшого виявлялася і при інших налаштуваннях ГА. Схрещування Лапласа переважно давало ліпші результати. Але були і протилежні випадки. Так, коли розмір популяції був 100, а елітних фенотипів 5, то найнижчі витрати на ЕЕ (42337,16 грн) були зафіксовані при одноточковому виді схрещування, що було на 0,38 % (42499,92 грн) і 0,81 % (42681,84 грн) нижче за схрещування Лапласа і двоточкове схрещування, відповідно.

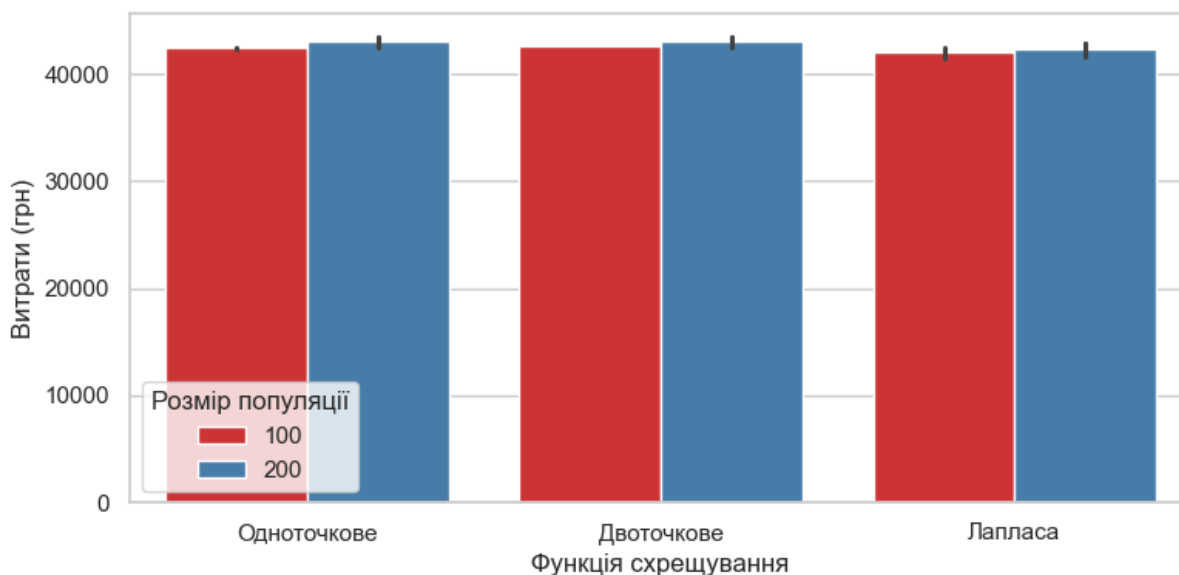


Рис. 1. Витрати на електроенергію від виду схрещування та розміру популяції

Вплив числа елітних фенотипів також виявився суттєвим (див. рис. 2). Коли при оптимізації популяція становила 200 фенотипів при 0 елітних фенотипів, це витрати на ЕЕ на добу були найбільшими і складали 43259,67 грн. Коли число елітних фенотипів зросло до 20, то витрати на ЕЕ скоротили до 42231,77 грн, що дало економію у 2,38 %. При встановленні розміру популяції на рівні 100 фенотипів, то також нижчими витрати на ЕЕ були тоді, коли в налаштуванні ГА були елітні фенотипи, а саме 10 елітних фенотипів. Проте, різниця у витратах на ЕЕ між оптимізацією ГА з 5 і 10 елітними фенотипами була незначною, лише 0,3% в середньому.

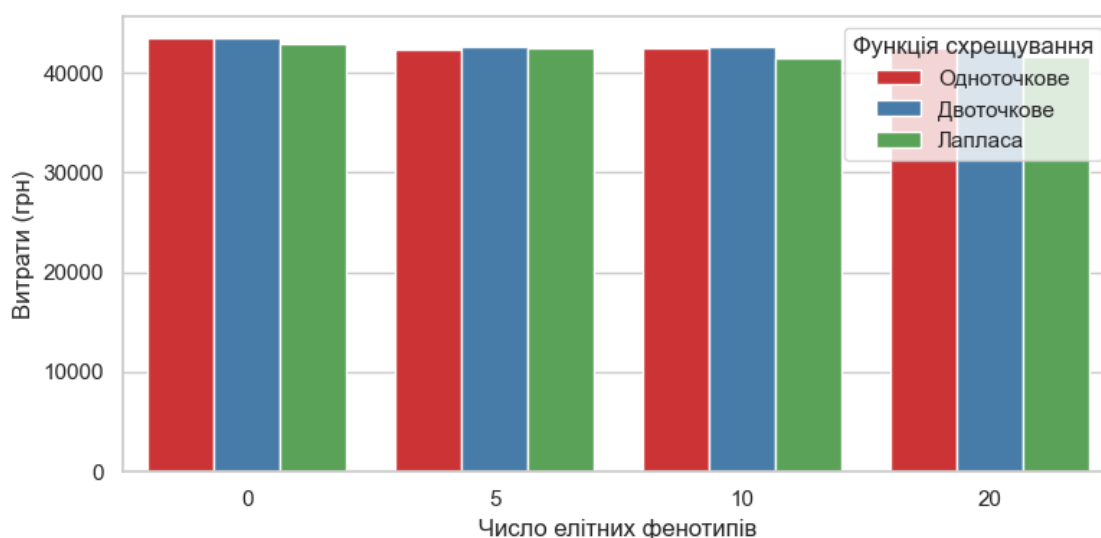


Рис. 2. Витрати на електроенергію від виду схрещування та числа елітних фенотипів

Розглядаючи (рис. 3) швидкість оптимізації ГА, а саме кінцеве покоління, коли досягається максимальне зменшення витрат на ЕЕ підземним гірничорудним підприємством,

то найшвидше оптимізація здійснюється при популяції 100 фенотипів, 5 елітних фенотипах і функції схрещування Лапласа всього тільки через 46 поколінь. Найбільш повільно – при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипах – алгоритм не зміг збігтися раніше за 300 поколінь у трьох розглянутих варіантах. Це вказує на те, що елітні фенотипи не тільки поліпшують якість рішення, але й пришвидшують оптимізацію. Для прикладу, при популяції 200 фенотипів і функції схрещування Лапласа зміна кількості елітних фенотипів від 0 до 20 скоротила кількість поколінь потрібних для оптимізації на 69,7 %.

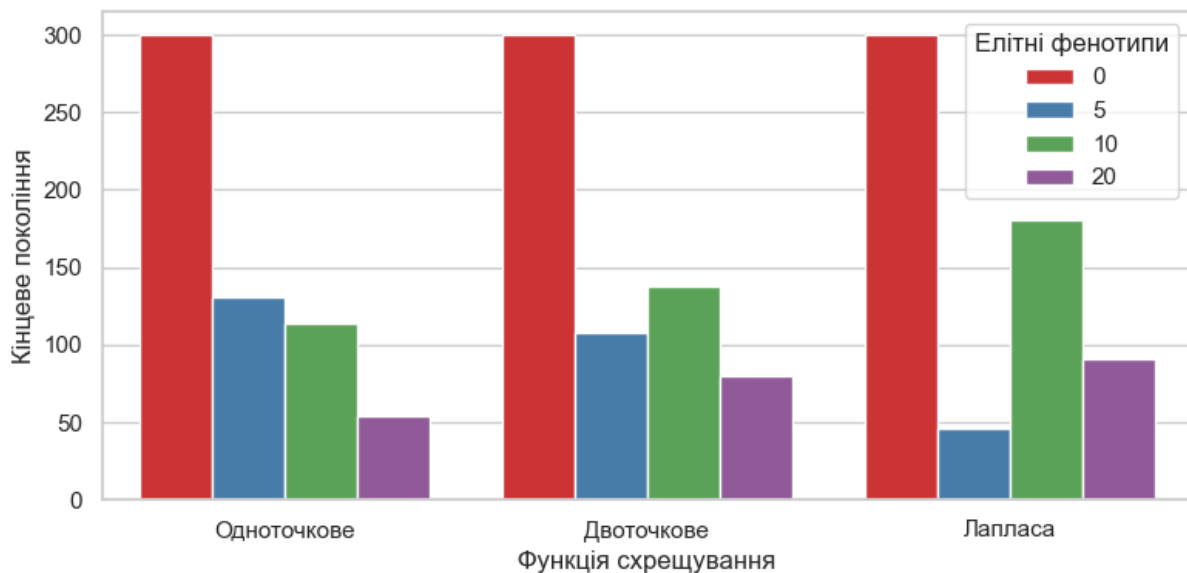


Рис. 3. Швидкість оптимізації від виду схрещування та числа елітних фенотипів

Аналізуючи результати статистичної обробки потужності, котру споживають електроприймачі блоків шахти з напругою до 1000 В, можна побачити, що найнижчу середньоквадратичну потужність, котра доволі часто корелює із витратами на ЕЕ, не завжди співпадає з найменшими витратами на ЕЕ, так як вони залежать також від добового розподілу тарифів.

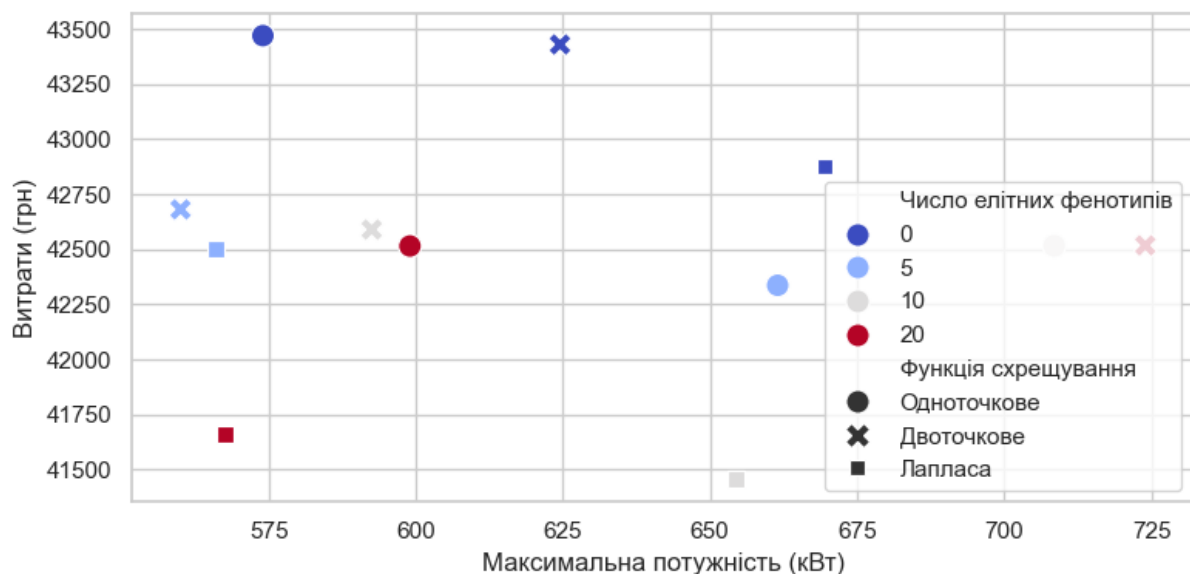


Рис. 4. Залежність витрат на електроенергію підземного гірничорудного підприємства від максимальної потужності

Так, при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипів у популяції при оптимізації ГА середньоквадратичне значення потужності було найнижчим, якщо точно, то у межах 80,14...104,60 кВт в залежності від виду схрещування, але витрати на ЕЕ – найбільші, що свідчило про значні пікові навантаження (гранична максимальна потужність у зазначених варіантах була у межах 574...669,5 кВт).

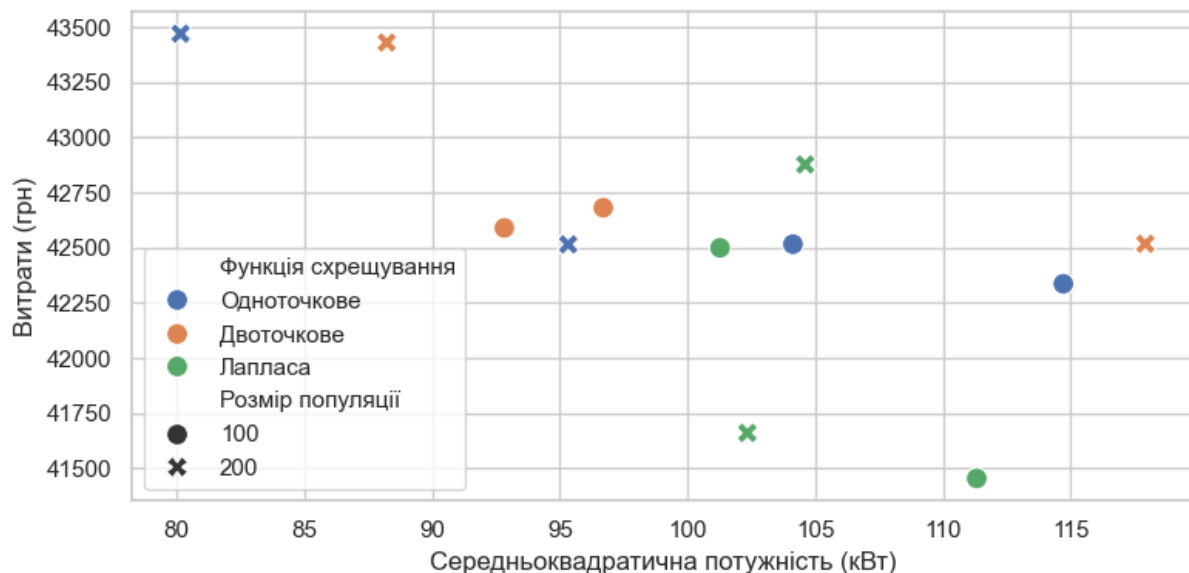


Рис. 5. Залежність витрат на електроенергію підземного гірничорудного підприємства від середньоквадратичної потужності

Навпаки, у найкращому варіанті (популяція 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів, функція схрещування Лапласа) максимальна потужність була на рівні 654,5 кВт, проте мінімальна при цьому становила 199 кВт, і вартість ЕЕ була найнижчою, що вказує на більшу збалансованість добового споживання потужності, коли проводилась оптимізація.

Підсумовуючи вищевикладеною, найефективніше оптимізація витрат на ЕЕ, що споживається електроприймачами шахти досягалася при генетичному алгоритмі з наступними налаштуваннями: популяція 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів, функція схрещування Лапласа. Вони забезпечили не тільки мінімальні витрати на ЕЕ підземного гірничорудного підприємства, але й прийнятну швидкість оптимізації ГА (181 покоління). Це був компромісний варіант між якістю рішення задачі і обчислювальними витратами на її розв'язання.

Висновок. Найбільш ефективними при «розумному» керуванні споживанням електроенергії для досягнення мінімізації матеріальних витрат на її придбання підземним гірничорудним підприємством виявилось застосування генетичного алгоритму з 10% елітних фенотипів у популяції не беручи до уваги її розмір та задіяння функції Лапласа для схрещування фенотипів у поколінні. З підвищенням числа елітних фенотипів зростає швидкість оптимізації генетичним алгоритмом, часто навіть у два рази. Найгіршу якість оптимізації витрат на електроенергію досягався генетичним алгоритмом у якому не було елітних фенотипів. Аналіз погодинного споживання електроенергії в усіх варіантах оптимізації показав, що у жодному з випадків пікова потужність споживачів блоку підземного гірничорудного підприємства не збіглася з проміжками на яких тариф на електроенергію був мінімальним. Разом з тим, мінімум споживання електроенергії забезпечувався генетичним алгоритмом у проміжки з найбільшими тарифами.

Проведене дослідження показало, що «розумна» система керування підключенням електроприймачів блоків підземного горизонту шахти напругою до 1000 В до електромережі може дозволити визначити оптимальний графік електроспоживання, котрий мінімізуватиме

матеріальні витрати на електроенергію, тим самим знизивши енергетичну складову собівартості продуктів видобутку підземного гірничорудного підприємства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sinchuk O. M., Rogoza M. V., Mykhailenko O. Yu., Kobeliatskyi D. V., Fedotov V. O. “Heuristic control of power consumption by up to 1000 V electrical loads at mining enterprises”. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024; 1: 84–92. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/084>.
2. Babu K. V. S. M., Chakraborty P., Pal M. “Demand Response Optimization MILP Framework for Microgrids with DERs”. *arXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08764>
3. Ashraf M., Ashraf M., Raza B., Haider Zaidi S.S., Alam F. “Genetic Algorithm-Based Load Balancing for Effective Demand Response with Renewable Energy Integration in Residential Settings”. *21st International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. Murree, Pakistan. 2024. p. 433–437. DOI: <https://doi.org/10.1109/IBCAST61650.2024.10877026>.
4. Witharama W. M. N., Bandara K. M. D. P., Azeez M. I., Bandara K., Logeeshan V., Wanigasekara C. “Advanced Genetic Algorithm for Optimal Microgrid Scheduling Considering Solar and Load Forecasting, Battery Degradation, and Demand Response Dynamics”. *IEEE Access*. 2024; 12: 83269–83284. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3412914>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.77>

UDC 621.316.1:004.023:004.896

“Smart” power control for receivers up to 1000 V at underground mining enterprises

Oleh M. Sinchuk¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9078-7315>, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095

Oleksii Yu. Mykhailenko¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-6652>, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215

Danyil V. Kobeliatskyi¹⁾

Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-7426>, dan150899@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 58645269300

¹⁾ Kryvyi Rih National University, 11, Vitaliy Matusevych Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

The paper considers “smart” control of power consumption by electrical receivers with a voltage of up to 1000 V in an underground iron ore enterprise to optimize daily power costs. The relevance of the work is determined by the high level of energy costs for mining processes in underground iron ore extraction. Since the operating schedule of electrical receivers up to 1000 V is not strictly fixed, this allows for flexible control of power consumption, taking into account hourly changes in power tariffs throughout the day. A heuristic approach to “smart” power consumption control based on a genetic algorithm is proposed, which is a good alternative to classical approaches, such as mixed integer linear programming, which is limited to online use due to its offline nature and inability to handle complex constraints. The object of the study is the power consumption of electrical receivers of several blocks of an iron ore mine, including both permanently (ventilation, water drainage) and variably (drilling rigs, winches) operating during the load time. The objective function was formulated in such a way as to minimize the total power costs of an underground iron ore enterprise over a 24-hour period by optimizing the distribution of the connection time to the power grid for each receiver. During the study, three parameters of the genetic algorithm were analyzed: population size, type of crossover function, and number of elite phenotypes. The lowest energy costs (41,454.99 UAH) were achieved with a population size of 100 phenotypes, 10 elite phenotypes in each population, and the Laplace crossover function. These costs were 4.86% lower than the worst result (43,470.55 UAH), which occurred with a population of 200 phenotypes, 0 elite phenotypes, and a single-point crossover type. It turned out that the number of elite phenotypes significantly improves the quality of the genetic algorithm and speeds up optimization. The transition from 0 to 20 elite phenotypes reduced the number of generations required to minimize power costs from 300 to 91 (by 69.7%). It was also found that the minimum power costs of an underground mining enterprise do not always coincide with the lowest values of the root mean square power, since the most important factor here is the distribution of power consumption relative to the time when peak tariffs are in effect. The most effective genetic algorithm settings ensured balanced power consumption throughout the day, avoiding consumption during periods when tariffs are highest. The results of the study confirmed the feasibility of using a genetic algorithm to manage power consumption and integrate similar systems when implementing smart grid technologies in industrial power systems.

Keywords: Smart grid; underground mining enterprises; electricity costs; genetic algorithm; optimization