

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента

кандидата технічних наук, доцента **Осадчука Юрія Григоровича**

на дисертацію **Кобеляцького Даніїла Віталійовича**

на тему: «Енергоефективне керування процесом споживання електроенергії приймачами з рівнем напруги живлення до 1000 В залізорудних шахт»
подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 – «Електрична інженерія», спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Ознайомлення з текстом дисертації, анотації та переліком опублікованих праць підтверджує, що автор провів комплексний та детальний аналіз обраної теми. У дисертаційному дослідженні переконливо аргументовано наукову новизну, а також системно викладено основні положення та підсумкові висновки, що пропонуються до захисту. Це свідчить про повне виконання завдань роботи на належному теоретичному та методологічному рівні. Загалом дослідження цілком відповідає нормативним вимогам, які ставляться до робіт такого рівня за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена високою енергоємністю підприємств, в тому числі з підземними способами видобутку залізної руди, в умовах яких теоретичне обґрунтування та розробка формату системи енергоефективного керування процесом споживання електроенергії приймачами з напругою живлення до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт, з урахуванням умов технологічної невизначеності в часі режимів їх роботи, є важливим науковим завданням для підвищення електроенергоефективності видобутку залізної руди.

Економічна стабільність України значною мірою залежить від розвитку гірничо-металургійної галузі, яка наразі потерпає від енергодефіциту та складнощів із реалізацією планових показників видобутку. Підземні залізорудні підприємства є зразками високоенергоємних виробництв, індивідуальна технологічна специфіка яких безпосередньо і часто негативно позначається на стані їхньої електроенергетики. Протягом останніх десятиліть процес стримування темпів зростання електроенергоємності видобутку залізної руди суттєво сповільнився через вичерпність тривіальних заходів підвищення енергоефективності. Окремою проблемою є те, що споживачі з напругою живлення до 1000 В, які отримують живлення від дільничних підземних підстанцій і споживають до 30% електроенергії шахти, залишаються найменш дослідженим сегментом. Наявні на сьогодні заходи з оптимізації та підвищення енергоефективності саме цієї групи електроприймачів є здебільшого псевдоактивними та не дають бажаного результату. Вирішення цієї проблеми потребує нових підходів, зокрема створення автоматизованих систем багатокритеріального керування режимами електроспоживання, що в перспективі відповідатимуть концепції Smart Grid. Для розбудови логістики

функціонування такої системи, необхідним є отримання нових доповнень до існуючих методів дослідження стохастичних процесів електроспоживання з урахуванням технологічної невизначеності роботи шахтних приймачів.

Таким чином, теоретичне обґрунтування та розробка формату системи енергоефективного керування споживанням електроенергії приймачами до 1000 В є надзвичайно актуальним і своєчасним завданням для подолання проблеми високої енергоємності гірничих підприємств.

2. Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації, їх наукова новизна

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, що викладені в дисертації, базуються на системності у постановці дослідницьких завдань, залученні математичного апарату, а також на широкому використанні детальної статистичної інформації та результатів тривалих експертних експериментів безпосередньо в умовах діючих шахт Кривбасу. Сформовані авторегресійні й стохастичні математичні моделі у часовій області, застосування методів теорії ймовірностей, математичної статистики та апарату аналізу розмірностей дозволили з високим рівнем адекватності дослідити якість електроспоживання й специфіку стохастичних коливань навантаження підземних мереж. Логіка побудови дослідження поєднує теоретичні викладки із розробкою евристичного алгоритму адаптивно-превентивного керування комутацією електроприймачів напругою до 1000 В на основі генетичного алгоритму. Достовірність отриманих результатів додатково підтверджується високим індексом детермінації побудованих моделей за шкалою Чеддока, позитивними висновками всебічної апробації матеріалів дисертації на міжнародних конференціях, а також практичним впровадженням розробок у виробничу діяльність профільних підприємств.

Новизна отриманих наукових результатів дисертаційної роботи Кобеляцького Даніїла Віталійовича полягає в наступних положеннях:

- розроблено, на основі відомих локальних рішень, концепцію, котра узагальнює та розширює межі можливостей реалізації заходів щодо підвищення рівня електроенергоефективності комплексів: електропостачання – електроспоживання підприємств із підземними способами видобутку залізної руди; проведено еквіполентування вхідних параметрів для формування схеми алгоритму керування процесом функціонування комплексом: електропостачання – електроспоживання;

- обґрунтовано та сформовано, як ефективний в своїй варіативності, новий формат підвищення покрової досяжності електроенергоефективності підземних залізрудних підприємств шляхом керованості режимами роботи локальних споживачів електроенергії з відповідним централізованим управлінням рівнями споживання ними електроенергії, з залученням до цього процесу сегмента споживачів з напругою живлення до 1000 В дільничних підземних підстанцій – складових узагальненого електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання аналізованих видів гірничих підприємств;

- досліджено та проаналізовано показники енергоефективності, вперше виділено взаємопов'язані ланцюги між процесами електропостачання

та електроспоживання в умовах підземного гірничорудного виробництва. На відміну від існуючих наукових підходів запропоновано виділяти інформаційну стохастичну кількісну складову, що є підґрунтям формування емерджентних властивостей комплексу енергоефективності, задля отримання відповідних рекомендацій щодо ефективного керування процесами функціонування систем електропостачання;

- на основі реальних умов функціонування залізрудних підприємств та відповідної статистичної інформації розроблено варіант математичної моделі, відмінність котрої складає факт застосування кусково-постійної функції, що описує залежність ціни електричної енергії від рівнів електроспоживання щодо часу доби;

- уперше розроблено евристичну систему автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними приймачами залізрудних шахт з напругою живлення до 1000 В на основі генетичного алгоритму, що дозволяє залежно від вартості електричної енергії визначати графік роботи споживачів підземних дільничних підстанцій, котрі при дотриманні прийнятих обмежень на погодинну та добову потужність забезпечують мінімізацію витрат на придбання електричної енергії, тим самим зменшуючи собівартість кінцевого продукту підприємства – видобутої залізної руди.

3. Оцінка структури і змісту дисертації, її завершеності в цілому

Дисертаційна роботи складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 216 сторінок, з яких основний зміст викладений на 173 сторінках друкованого тексту, містить 76 рисунків, 28 таблиць. Список використаних джерел складається зі 177 найменувань. Додатки містять додаткові матеріали, що доповнюють основну частину дисертаційної роботи і поглиблюють рівень сприйняття отриманих результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації. Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

У **Вступі** приведено наукову та практичну цінність даного дослідження, викладено логістику наукового пошуку.

У **Розділі 1** наведено результати оцінювання стану та віддзеркалено на їх фоні проблеми та необхідність підвищення електроенергоефективності видобутку залізної руди в умовах гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди. Оцінювання проведено з позицій загальної економіки аналізованих видів гірничих підприємств, фактичного стану та впливу на вищенаведений показник електроенергетики. Проведено зондування та превентивне встановлення реальних можливостей досягнення оптимальних рівнів електроенергоефективності в форматах існуючих технологій ведення гірничих робіт. Визначено стартові позиції та весь формат дослідження.

Доведено, що застосовані перфектні заходи практично вичерпали свій креатив та в значній мірі потенційні можливості і необхідні нові додаткові до відомих варіанти рішень або такі, які ще не вичерпали свій потенціал. Один з таких недостатньо досліджених – керування режимами функціонування

споживачів з напругою живлення 0,4 кВ, як сегмента загальної структури комплексу: електропостачання – електроспоживання підземного гірничорудного підприємства з перспективою включення даної системи, на правах підсистеми, в централізовану структуру АСК електроенергетики даного підприємства.

У **Розділі 2** наведені дослідження формату пошуку та відповідних варіантів схем з підвищення електроенергоефективності вітчизняних підземних залізрудних підприємств. Висвітлено та оцінено параметри впливових факторів на процес споживання електроенергії та показано їх відмінність від підприємств з видобутку інших видів корисних копалин, що віддзеркалює необхідність індивідуалізації пошукової розбудови логістики отримання рішень. Стверджено, що в умовах сучасних технологій видобутку залізної руди підземним способом, в межах існуючих технологій, необхідний новий формат підходу до вирішення проблеми електроенергоефективності даних видів підприємств. Таку можливість дає системний підхід. Для оцінювання рівнів, та отримання ефективних варіантів спрямувань, розроблена дослідницька математична модель, котра дозволила визначатись з відповіддю на це питання.

У **Розділі 3** приведено обґрунтування формату протікання електроенергетичних процесів в комплексі: електропостачання – електроспоживання, як стохастичного виду. Надано результати моделювання електроенергетичних процесів в комплексах СЕП 0,4 кВ. Такий підхід дозволив визначити більш глибокі і в значній мірі системо визначальні характеристики процесу, які пов'язані з випадковістю їх протікання. Це дало можливість побудувати цільову функцію, котра враховує коливання рівнів електроспоживання приймачами в годинах доби, з послідуною розробкою відповідної дослідницької математичної схеми. Важливою особливістю та цінністю для наукового пошуку запропонованої математичної моделі є те, що залежність ціни електроенергії задається як кускова – постійна функція. Отримані теоретичні результати, при порівнянні з реальними даними, дозволило дійти висновку про існування реального резерву при оптимізації рівнів електроспоживання в часі – годинах доби, який є похідним при ефективному обліку відповідних тарифів на електроенергію. Це підтверджується шляхом порівняння реальних витрат з оптимальними при оцінюванні процесу електроспоживання. Для викладеного прикладу економія складає близько 27,4 %.

У **Розділі 4** викладено логіку розбудови та авторський варіант системи автоматизованого керування споживанням електричної енергії електроприймачами з напругою живлення до 1000 В гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди, що мінімізує витрати на закупівлю електроенергії виробництвом, згідно існуючої в Україні логістики розрахунків – на добу наперед. Задача керування споживанням електричної енергії зведена до бінарної форми змішаного цілочисельного програмування, яка розв'язується з використанням генетичного алгоритму. Проаналізовано вплив налаштувань генетичного алгоритму, як-то число фенотипів у популяції, число елітних фенотипів, які переходять незмінними у наступне покоління, та методу схрещування фенотипів на якість оптимізації процесу енергоспоживання.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням.

У **Загальних висновках** наведено в стислому варіанті результати досліджень та рекомендації щодо їх подальшого використання.

У **томі 2** надано ряд додаткових матеріалів, котрі доповнюють та розширюють логіку основної дослідницької частини наукового пошуку.

4. Практичне значення наукових результатів

Практичне значення дисертаційного дослідження полягає у створенні дієвого науково-прикладного інструментарію для підвищення електроенергоефективності підземних гірничорудних підприємств шляхом раціонального керування їхніми енергопотокami. Розроблена концепція та комплекс математичних моделей дозволяють здійснювати достовірне короткострокове і довгострокове прогнозування стохастичних режимів споживання електричної енергії приймачами з напругою живлення до 1000 В. Сформована на базі генетичного алгоритму евристична система автоматизованого керування забезпечує оптимальний розподіл електричних навантажень дільничних підстанцій з урахуванням багатозонних часових тарифів та технологічних вимог рудозабірних процесів. Застосування цього підходу дає змогу суттєво мінімізувати фінансові витрати на закупівлю електроенергії, що безпосередньо сприяє зниженню енергоємності виробництва та зменшенню собівартості видобутку залізної руди.

Проведені теоретичні дослідження дисертаційної роботи склали підвалини практичного оцінювання отриманих результатів, а саме:

- розроблено та рекомендовано для практичної реалізації концепцію з оцінювання та реалізації заходів щодо підвищення електроенергоефективності електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання гірничовидобувних підприємств;

- сформовано методику з оцінювання існування відповідного резерву при оптимізації рівнів електроспоживання споживачів електроенергетичного комплексу гірничорудних підприємств;

- отримані кількісні оптимізаційні значення витрат на електроспоживання однієї залізрудної шахти протягом доби, які можуть бути зменшені на 27,4 %, при збереженні загального обсягу цього показника і можуть прийматись як взірці для досягнення мети;

- розроблено архітектуру евристичної системи керування споживанням електричної енергії електроприймачами напругою до 1000 В на базі еволюційного логічного алгоритму, котра може бути застосована для оптимізації графіку електричних навантажень трансформаторних підстанцій гірничо-металургійних підприємств, зокрема, залізрудних шахт, що працюють на цьому класі напруги.

Дисертаційне дослідження виконувалось в розрізі науково-дослідних робіт, котрі проводились кафедрою електричної інженерії Криворізького національного університету, в тому числі протягом 2020-2026 років, за пріоритетним напрямом Міністерства освіти і науки України «Енергетика та енергоефективність» та відповідно до завдань держбюджетної науково-дослідної роботи (номер держреєстрації 0121U11709) «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» (Завдання 2). Етап 2, 2022 року «Дослідження можливостей використання

методу рою часток для оптимізації конфігурації включення автономних джерел живлення».

Одержані наукові результати дисертаційної роботи передано ТОВ «Ракурс» (м. Кривий Ріг) для подальшого використання їх при розробці проєктів модернізації систем електропостачання гірничорудних та металургійних підприємств України, що підтверджено актом про впровадження. Результати роботи також використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії при підготовці здобувачів спеціальності G3 – Електрична інженерія за бакалаврським і магістерським рівнями вищої освіти, що підтверджено актом про впровадження.

5. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

Дисертаційна робота Кобеляцького Даніїла Віталійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень, що підтверджується відповідним звітом з подібності. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

6. Зауваження та побажання щодо сутності викладеного матеріалу, оформлення та обсягу дисертації

1. Виявлено помилкове дублювання частини речення на сторінці 65, що є стилістичною та редакторською хибою: «...довжина гнучких кабелів від БРП до найбільш видаленого споживача складає 200-400 м, а довжина гнучких кабелів від БРП до найбільш видаленого споживача складає 200-400 м.».
2. На рисунку 2.8 у діаграмі допущено наступні похибки: некоректно використано подвійні лапки замість апострофа у слові «під'єм» («Скиповий під'єм кВт*год»), а також є орфографічна помилка в слові «Скиповий» (має бути «Скіповий», як це правильно вживається в основному тексті).
3. Виявлено дублювання нумерації формул: формула автокореляційної функції на сторінці 121 має номер (3.59), і одразу після неї математична модель стохастичного часового ряду на сторінці 122 також пронумерована як (3.59), що порушує наскрізну нумерацію в розділі.
4. Під час постановки та вирішення задачі оптимізації вартості спожитої електроенергії автор спирається на використання кусково-постійної функції, яка моделює лише двозонний тариф (умовно «нічний» та «денний» час). Таке допущення значно звужує та обмежує застосовність розробленої математичної моделі в сучасних умовах ринку електричної енергії, де для промислових підприємств актуальними та економічно доцільними є складніші багатозонні тарифи (умовно піковий, напівпіковий, нічний) або механізми динамічного погодинного ціноутворення.
5. Автором розроблено евристичну систему керування на базі генетичного алгоритму, яка формує оптимальний погодинний графік підключення електроприймачів для мінімізації витрат. Проте запропонований алгоритм оперує переважно інтегральними показниками номінальної потужності, залишаючи поза увагою електромеханічні перехідні процеси (наприклад,

пускові струми та зниження коефіцієнта потужності при одночасному включенні кількох потужних агрегатів), ігнорування яких у реальній шахтній мережі може призвести до спрацювань апаратури захисту від струмів короткого замикання або витоків.

6. У другому та третьому розділах роботи, на основі моніторингу та моделювання, автор детально доводить стохастичний характер як активної, так і реактивної потужності, наочно демонструючи на графіках (наприклад, рис. 2.10 на сторінці 74), що в окремі інтервали часу реактивна потужність короткочасно навіть перевищує активну, викликаючи перевантаження устаткування. Зазначається також, що груповий коефіцієнт потужності $\text{tg } \varphi$ для різних ділянок коливається в межах 0,8–0,9. Проте, формулюючи критерій оптимізації (формула 4.1 на сторінка 160) та обмеження (формули 4.2–4.4) для системи керування, автор будує модель виключно на основі активної потужності приймачів та погодинного тарифу на активну енергію. З математичного апарату системи керування повністю вилучено показники реактивного навантаження, коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$) та рівнів напруги. Оскільки для важкої гірничої промисловості плата за перетікання реактивної енергії та штрафи за зниження якості напруги становлять вагомую частку енергетичних витрат, ігнорування реактивної складової у фінальному алгоритмі суттєво знижує реальну економічну ефективність розробленої системи.
7. Кусково-постійна функція ціни (яка винесена в положенні номер 4 наукової новизни). У розділі 3 (с. 144) ціна активної потужності справді задається кусково-постійною функцією. Проте в розділі 4, де реалізовано власне систему керування, вартість електроенергії моделюється вже як нормально розподілена випадкова величина за даними 06.03.2023 (с. 163). Тобто модель ціни, заявлена як елемент новизни, у підсумковому алгоритмі не використана — зв'язок між моделлю розділу 3 і оптимізаційною задачею розділу 4 потребує пояснення.
8. «Покроковість» (яка винесена в положенні номер 2 наукової новизни). Заявлено новий формат покрокового підвищення електроенергоефективності, однак переліку самих кроків, критеріїв переходу між ними та очікуваного приросту на кожному етапі в тексті немає, тож покроковість лишається декларативною.

Загалом зауваження не стосуються основних положень і результатів, не знижують її наукової і практичної цінності і не впливають на загальний позитивний висновок по роботі.

7. Загальний висновок.

Вважаю, що дисертація Кобеляцького Даніїла Віталійовича «Енергоефективне керування процесом споживання електроенергії приймачами з рівнем напруги живлення до 1000 В залізрудних шахт» є завершеною науковою працею, виконана на високому науковому рівні, сукупність теоретичних та практичних результатів якої розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота повністю відповідає чинному законодавству України, а саме: вимогам

наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Кобеляцький Даніїл Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія, за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Рецензент

Кандидат технічних наук,
доцент кафедри електричної інженерії
Криворізького національного університету

Юрій ОСАДЧУК



Підпис	
ЗАСВІДЧУЮ:	
Відділ кадрів Криворізького національного університету	
« 19 »	08 20 26 р.