**ДО ТАКТИКИ РОЗБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ УЗАГАЛЬНЕНОГО АЛГОРИТМУ
ЕНЕРГООРІЄНТОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ПІДЗЕМНИХ
ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

І. О. Сінчук, А. І. Купін, В. Д. Барановський

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна.

E-mail: lab.133.136@gmail.com, kupin.andrew@gmail.com, vladislav.baranovskiy4@gmail.com

В статті на основі аналізу експериментальних даних обґрунтовано та підтверджено тезу про необхідність енергоорієнтованого керування рівнями споживання електричної енергії в структурах електроенергетичних комплексів: система електропостачання-споживання електричної енергії гірничорудних підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини. Встановлено, що поряд із існуючим позитивним для розробки архітектури керування рівнями споживання електроенергії фактом – обмеженої кількості енергоємних споживачів даних видів підприємств, які споживають біля 80 % від всього обсягу, режими їх функціонування в годинах доби різноманітні. Аналіз варіативності реальних режимів споживання електроенергії в годинах доби свідчать про відсутність з боку підприємств цілеспрямованого керування цим процесом. Згідно запропонованої методики спрогнозовано ефективність керування рівнями споживання електричної енергії в годинах доби при будь-якому варіанті інтеграції добових тарифів. В умовах неординарності та постійної змінності технологічних параметрів гірничого виробництва на основі результатів аналізу стохастичної оптимізації доведено, що навіть за умов застосування доволі незначної кількості ітерацій $N=10$ можливо покращити первинне рішення на понад 60 % (первинне значення цільової функції $I^*=27,7$ та остаточне значення на останній ітерації $I^*=10,7$). Визначено необхідні вектори для встановлення зв'язку добового погодинного видобутку руди (P^*) та відповідного енергоспоживання (E^*), що відповідає субоптимальному значенню цільової функції (I^*). Отримані результати можна застосовувати для рекомендацій з більш раціонального планування роботи підприємства. Запропонований алгоритм при його реалізації в структурі систем керування електроспоживанням дозволяє отримувати кінцевий результат з будь-якою необхідною за рівнем якістю. При потребах збільшення якості отриманих результатів треба лише збільшити кількість ітерацій на 2–3 порядки.

Ключові слова: енергоспоживання, керування, гірничорудні підприємства.

**К ТАКТИКЕ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРЫ ОБОБЩЕННОГО АЛГОРИТМА
ЕНЕРГООРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОМПАНИЙ**

И. О. Синчук, А. И. Купин, В. Д. Барановский

Криворожский национальный университет

ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина.

E-mail: lab.133.136@gmail.com, kupin.andrew@gmail.com, vladislav.baranovskiy4@gmail.com

В статье на основе анализа экспериментальных данных обоснован и подтвержден тезис о необходимости энергоориентированного управления уровнями потребления электрической энергии в структурах электроэнергетических комплексов: система электроснабжения потребления электрической энергии горнорудных предприятий с подземным способом добычи железорудного сырья. Установлено, что наряду с существующим положительным для разработки архитектуры управления уровнями потребления электроэнергии фактом – ограниченного количества энергоемких потребителей данных видов предприятий, потребляют около 80 % от всего объема, режимы их функционирования в часах суток разнообразны. Анализ вариативности реальных режимов потребления электроэнергии в часах суток свидетельствуют об отсутствии со стороны предприятий целенаправленного управления этим процессом. Согласно предложенной методики спрогнозирована эффективность управления уровнями потребления электрической энергии по часам суток при любом варианте интеграции суточных тарифов. В условиях неординарности и постоянной сменности технологических параметров горного производства на основе результатов анализа стохастической оптимизации доказано, что даже в условиях применения довольно незначительного количества итераций $N=10$ возможно улучшить первоначальное решение более чем на 60 % (первичное значение целевой функции $I^*=27,7$ и окончательное значение на последней итерации $I^*=10,7$). Определены необходимые векторы для установления связи суточной почасовой добычи руды (P^*) и соответствующего энергопотребления (E^*), что соответствует субоптимальному значению целевой функции (I^*). Полученные результаты можно применять для рекомендаций по более рациональному планированию работы предприятия. Предложенный алгоритм при его реализации в структуре систем управления электропотреблением позволяет получать конечный результат с любым необходимым по уровню качеством. При потребностях увеличения качества полученных результатов надо только увеличить количество итераций на 2–3 порядка.

Ключевые слова: энергопотребление, управление, горнорудные предприятия.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Україна належить до країн, де встановлені потужності для генерації електричної енергії достатні як для внутрішнього споживання, так і для експорту [1, 2]. Незважаючи на достатні для потреб держави рівні встановлених генеруючих потужностей електростанцій в Україні за останні десятиріччя загострилась електроенергетична проблема, котра є похідною від ряду впливових факторів. З цих причин в дійсний період часу держава існує в полі певної невизначеності перспектив подальшого розвитку енергетики. Про це свідчить і показник енергоємності валового внутрішнього продукту (ВВП), що є узагальнюючим макроекономічним показником (рис. 1).

Рисунок 1 – Первинна енергоємність ВВП України (революційний сценарій)

Енергоємність ВВП України значно вища не лише порівняно з провідними економіками світу, але й з країнами Центральної та Східної Європи [3].

Негативним є не лише висока енергоємність ВВП України, а відсутність вираженої динаміки до її зниження упродовж останніх років.

До основних чинників, які обумовлюють високу енергоємність виробництва в Україні, слід віднести: неефективне й марнотратне споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), зокрема, внаслідок недотримання чинних вимог щодо технологій та обладнання; застарілість основних фондів і комунікацій та незадовільні темпи їх оновлення; значні втрати енергоресурсів, передусім електроенергії під час її транспортування й розподілу; низький рівень впровадження енергоефективних технологій та обладнання (впровадження нових технологічних ресурсозберігаючих процесів, які в дійсний період часу здійснюють не більше 3 % загальної кількості промислових підприємств); суттєве технологічне відставання української промисловості від рівня розвинених країн; високий рівень зношеності основних фондів у економіці (74,9 %) і відповідне підвищення питомих витрат ПЕР на виробництво низки важливих видів продукції в ряді галузей; недостатнє використання в промисловості власних ПЕР [3].

Разом з тим згідно національної енергетичної стратегії (НЕС) зниження енергоємності ВВП доцільно досягти за рахунок зменшення споживання всіх типів енергоресурсів, окрім електроенергії (ЕЕ),

оскільки використання є більш ефективним в порівнянні з іншими видами [3, 4].

В значній мірі енергетичні показники держави в цілому визначаються станом внутрішньої енергетики споживачів і особливо енергоємних їх видів. Саме до такого класу підприємств відносяться підприємства гірничо-металургійного комплексу (ГМК), які споживають 55 % електроенергії від загальнодержавного промислового рівня, а 35 % від цього обсягу лежить в сфері суто гірничорудного виробництва [5]. До цього додамо, що як свідчать показники, знизити рівні споживання ЕЕ підприємств ГМК поки що в рамках існуючих технологій проблематично [6].

При цьому вимальовується двоєдина стратегічна задача для гірничорудних підприємств (ГРП) – збільшення обсягів виробництва та зниження їх енергоємності [7].

Залишаючи першу частину вищевикладеної тези для аналізу іншими за фахом науковцями, зупинимось на другій складовій.

Перед формуванням наукових задач для їх вирішення в структурі другої з вищезгаданих складових в підвищенні енергоефективності підприємств ГРП, зазначено важливий аспект в цій проблемі, який стосується того, що ситуація в економічних відносинах між постачальниками та споживачами ЕЕ в Україні періодично змінюється.

Так, згідно протоколу виконання пунктів одного з останніх Законів України «Про ринок електричної енергії» [8] з 01.01.2019 р. в рамках підготовки до запуску процесу його реалізації, існуючі територіальні обленерго реформовані на дві різні структури – оператор системи розподілу та постачальник електроенергії. Кінцевою системою такого анбандінгу, на думку ідеологів проекту, є повне відсторонення власника розподільчих електромереж від процесу зміни постачальника споживачем.

Поміж тим іншою, але не меншою щодо позитиву, стороною вищезгаданого Закону є «залучення» споживачів ЕЕ до активізації пошуку шляхів зменшення енергоємності власної продукції.

Нажаль, вітчизняні ГРП – споживачі ЕЕ зі свого боку мало-що змінили в своїй діяльності в напрямку пошуку особистих позитивних зрушень згідно даного Закону. Більш того, в їх діяльності слабо прослідковується відповідна до ситуації позиціонування власного енергетичного комплексу.

Як доповнення до цього ствердження додамо, що в реальному часі гірничі підприємства, в більшості своїй, не достатньо приділяють увагу питанням модерації потенціалу досяжності в оптимізації рівнів сплати за кВт·год. спожитої ЕЕ. Між тим, як свідчать результати досліджень, це спрямування в умовах гірничорудних підприємств, як енергоємних видів, що функціонують в безперервному в годинах доби режимі достатньо ефективно і реально може бути реалізовано в короткі інвестиційні періоди часу. Це ствердження базується на тому, що лінійка

енергоємних споживачів цих підприємств зовсім не типова і навпаки вельми обмежена в кількості – як правило не більш п'яти, і, які споживають біля 85 % електроенергії від загально спожитого обсягу підприємством [9].

Тобто, як апіорно, так і базуючись на підґрунті оцінювання стану енергетики гірничорудних підприємств, можна і необхідно стверджувати, що для конче необхідного та очікуваного як підприємствами галузі, так і на державному рівні, процесу зменшення енергоємності видобутку залізорудної сировини (ЗРС) необхідне наукове обґрунтування та формування «дорожньої карти» досягності результатів цього процесу.

Одним із негативних факторів взаємовідношень між споживачами ЕЕ та її постачальниками є непостійність тарифів на кВт·год. спожитої енергії. Так до 2019 р. існував 3-х тарифний добовий варіант, а з 2019 р. існує погодинний тариф, при якому ціна формується упереджено на добу наперед і електрична енергія відпускається генеруючими організаціями підприємствам згідно їх попередніх заявок на обсяги поставки. По факту реалій ціна на ЕЕ в годинах формується не тільки в годинах доби, а й в годинах більш тривалого часу – місяць, рік. В такому варіанті допущення тривіальності в процесі сплати з боку споживачів призведе до значних з їх сторони необґрунтованих економічних втрат.

Більш того «ручний формат» керування цим процесом, як способу прогнозного оцінювання рівнів споживання ЕЕ в часі та відповідної вартісної цільової складової цього процесу як для енергетичної складової, так і для економіки підприємства в цілому, не може дати бажаного ефекту. Необхідно створити «АСК електроспоживання», алгоритм функціонування якої дозволить моніторити та вести електроенергетичний прогноз з наданням поточних рішень по рівням очікуваного споживання ЕЕ згідно поточних варіативних змін техніко-економічних та технологічних параметрів підприємств в процесі видобутку ЗРС. В свою чергу ефективність функціонування такої АСК буде всіяко залежати від рівня відповідності реалізації алгоритму керування критеріям змінності вищезгаданих параметрів.

Питанням керування електроенергоспоживанням промислових підприємств взагалі, і енергоємних в тому числі, приділялась і приділяється значна увага як науковцями України, так і закордонними дослідниками. В переліку відомих досліджень, на суб'єктивну думку автора, гідної уваги заслуговують перш за все праці [10–21].

В роботах [10–12] наведено погляди авторів на підвищення енергоефективності функціонування конкретних підприємств: вугільного розрізу та нафтохімічного, системи охолодження повітря та вентиляції в шахті. Наведені моделі керування енергоспоживанням цих підприємств. Але ці моделі представлені у вигляді підсистем, що потім можуть інтегруватись в єдину систему оперативного

керування енергоспоживанням конкретного підприємства.

В [13–15] приведені оптимальні моделі керування енергоспоживанням конкретних видів енергоємних споживачів – конвеєрів та вентиляційних установок в умовах шахт.

В [16] приведено оцінку енергоефективності на рівні електричних машин, що функціонують в технологічному циклі підприємства.

Мета досліджень в [17] полягає в оцінюванні енергоефективності використання ЕЕ гірничовидобувної промисловості в Південній Африці.

В [16–20] викладені теоретичні аспекти розбудови тактики економічного керування підприємствами.

Певні досягнення в питаннях керування енергоспоживанням підприємств має і наукова спільнота нашої держави [22–25].

Аналізуючи блок вищезгаданих досліджень, зауважимо, як факт, що всі вони (дослідження) базувалися та обмежувалися, як правило, конкретним об'єктом тим чи іншим підприємством, що мінімізує можливість використання та перекладення результатів їх досліджень для умов вітчизняних гірничорудних підприємств.

В дослідницьких працях наших співвітчизників з аналізованої проблеми в епіцентрі, як правило, стояли проблеми розбудови енергоменеджменту тих чи інших видів підприємств [22–25]. При цьому ряд підходів виглядають вельми позитивно.

Відзначаючи значимість для проблеми підвищення енергоефективності підприємств шляхом застосування процесу керуваності рівнями споживання ЕЕ, зазначимо, що згідно зформованої дослідниками мети досліджень, в контексті їх робіт, прослідковується певна одновекторність систем досліджень, що є достатньою для даного дослідницького варіанту, але не є такою для застосування в інших умовах, в тому числі для підприємств зі змінними параметрами технології ведення робіт.

В попередніх роботах авторів даної статті [6, 7, 26] розглядались варіанти розбудови архітектури алгоритму функціонування «АСК енергоефективності» для умов 3-х та 2-х тарифних варіантів. Але в нині існуючих умовах цього недостатньо, оскільки функціональні можливості алгоритму роботи такої АСК обмежені і мають перспективи лише в своїй базовості при зміні варіантів структур тарифів. В умовах сьогодення і для сьогодення необхідно створення алгоритму узагальненого управління з можливістю внесення відповідних змін в його архітектуру.

Водночас в вищезгаданих працях зазначалася необхідність розбудови унікального узагальнюючого алгоритму керування електроспоживанням без обмеження технологічних умов його функціонування згідно того чи іншого тарифного формату.

В цілому, згідно з баченням авторів даної статті, для розбудови сучасної системи керування електроенергетичним комплексом гірничого підприємства в умовах обмеженості централізованого потенціалу енергоресурсів та невизначеності перспективно-контрольних рівнів споживання ЕЕ, необхідно розробити принципи формування енергоорієнтованої системи, змодельовати рівень та можливий потенціал досяжності її ефективності.

Мета роботи – обґрунтування критеріїв та формалізація структури узагальненого алгоритму енергоорієнтованого керування електро-споживанням підземних гірничовидобувних підприємств.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

На рис. 2 показана динаміка усереднених коливань сегмента електричної енергії в собівартості видобутку 1 т залізорудної сировини підземними гірничо-рудними підприємствами України.

Рисунок 2 – Динаміка усереднених коливань сегмента електричної енергії в собівартості видобутку 1 т залізорудної сировини підземними гірничо-рудними підприємствами України: план–прогноз

На рис. 3 для наочності наведено, як приклад, графіки споживання ЕЕ протягом конкретних діб ряду років. Як свідчать результати аналізу цих процесів, то рівні споживання носять різноколивальний характер.

Для подальшого поглибленого аналізу, з метою формалізації факторів впливу на рівні споживання ЕЕ були проаналізовані середньодобове споживання і вартість ЕЕ (табл. 1).

Аналіз змісту табл. 1 дає наступні результати. Середньодобове споживання ЕЕ з 2013 по 2020 роки коливається по рокам як в одну, так і в іншу сторони. Середньодобова розрахункова вартість електроенергії на даних підприємствах зросла. Змінився і такий цікавий та вельми показовий фактор, як середньодобова питома вартість ЕЕ.

Так, діапазон зростання цього показника склав інтервал 33 %–63 %. Для подальшого розуміння процесів споживання ЕЕ цікавим вбачається проведення кореляційного зв'язку показників табл. 1. Результати аналізу наведені в табл. 2.

а)

б)

в)

г)

Рисунок 3 – Погодинні в добу графіки споживання електричної енергії споживачами залізорудних шахт Криворізького регіону за:

а) 23 квітня 2012 р.; б) 24 квітня 2013 р.;

в) 23 квітня 2015 р.; г) 23 квітня 2020 р.

Відповідно до отриманих кількісних кореляційних показників маємо зазначити наступне, а саме: щодо шахти Гігант-Глибока практично відсутній зв'язок між середньодобовою вартістю електроенергії (грн.) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год). Можна вважати сутнісним зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовою вартістю електроенергії (грн.), але цей зв'язок зворотній, тобто із зростанням значення одного показника значення другого відповідного зменшується.

Таблиця 1 – Середньодобове споживання і вартість електроенергії за роками шахт Криворізького залізничного басейну

№ з/п	Показники	Назва шахт	Роки					
			2013	2015	2017	2018	2019	2020
1	Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	Тернівська	1863	1587	1545	–	1305	1147
		Гвардійська	1027	1026	717	–	754	748
		Родіна	3096	3278	3405	–	2631	2572
		Октябрська	1512	1662	1143	–	752	739
		Гігант-Глибока (виведена із промислової експлуатації)	2302	–	–	2124	2405	1863
2	Середньодобова вартість електроенергії, грн.	Тернівська	1207	1303	1110	–	1042	1229
		Гвардійська	701	397	316	–	367	754
		Родіна	1778	2345	2989	–	2672	3774
		Октябрська	1731	1378	1352	–	705	935
		Гігант-Глибока	1245	–	–	2016	2961	2664
3	Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	Тернівська	0,648	0,821	0,719	–	0,799	1,071 >на 40 %
		Гвардійська	0,682	0,387	0,440	–	0,487	1,008 >на 33 %
		Родіна	0,574	0,715	0,878	–	1,016	1,467 >на 60 %
		Октябрська	0,483	0,829	1,183	–	0,937	1,265 >на 62 %
		Гігант-Глибока	0,541	–	–	0,949	1,231	1,430 >на 63 %

Таблиця 2 – Результати аналізу дослідження

шахта Тернівська			
Показники	Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	Середньодобова вартість електроенергії, грн.	Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год
Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	1		
Середньодобова вартість електроенергії, грн.	0,237487	1	
Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	–0,85945	0,268227	1
шахта Гвардійська			
Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	1		
Середньодобова вартість електроенергії, грн.	0,222175	1	
Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	–0,20312	0,900807	1
шахта Родіна			
Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	1		
Середньодобова вартість електроенергії, грн.	–0,46242	1	
Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	–0,72658	0,943611	1
шахта Октябрська			
Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	1		
Середньодобова вартість електроенергії, грн.	0,426153	1	
Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	–0,67607	0,359935	1
шахта Гігант-Глибока			
Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	1		
Середньодобова вартість електроенергії, грн.	–0,15039	1	
Середньодобова питома вартість електроенергії, грн./кВт·год	–0,49731	0,931178	1

Шахта Тернівська відповідно: відсутній зв'язок між середньодобовою вартістю електроенергії (грн.) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год), а також між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год). На відміну від ш. Гігант кореляційний зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год) є достатньо суттєвим і має від'ємне значення, тобто, по суті, є зворотнім.

Для шахти Гвардійська маємо зазначити несуттєвий зв'язок між середньодобовою вартістю електроенергії (грн.) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год) та між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) і середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год). Суттєвим є зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) й середньодобовою вартістю електроенергії (грн.).

Аналіз отриманих кореляційних зав'язків щодо шахти Родіна дозволяє дійти наступних висновків: не суттєвим можемо вважати зв'язок між середньодобовою вартістю електроенергії (грн.) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год). Зворотнім суттєвим є зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год), тобто із зростанням значення одного показника зменшується другий. Існує суттєвий позитивний зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) і середньодобовою вартістю електроенергії (грн.), що означає – із зростанням значення одного показника зростає значення іншого.

Для шахти Октябрська маємо зазначити наступне. Суттєвим зворотнім зв'язком є зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год), інші значення кореляційних показників вважаються не суттєвими.

Таким чином, загальним для шахт Родіна, Гвардійська, Гігант-Глибока суттєвим є зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовою вартістю електроенергії (грн.).

Для шахт Тернівська, Родіна, Октябрська суттєвим зворотнім є зв'язок між середньодобовою питомою вартістю електроенергії (грн./кВт·год) та середньодобовим споживанням електроенергії (кВт·год).

Аналізуючи вищевведені ствердження, зазначимо вельми важливий висновок – узагальнюючого кореляційного зв'язку між обсягами споживання ЕЕ та технологічними параметрами, загальними для всіх шахт, не існує, що повинно лягти в логіку послідовних досліджень

щодо розбудови алгоритму керування електроенергопотоками конкретних суб'єктів – споживачів електроенергії.

Розглянемо можливості побудови узагальненого алгоритму АСК енергопотоками для двох актуальних зараз випадків: 1 – вибіркового тарифу з обмеженнями на добове енергоспоживання на підставі угод, або 2 – «плаваючий» тариф (наприклад, погодинно/24).

Алгоритм (рис. 4). Перший блок інформує про початок роботи системи.

Рисунок 4 – Алгоритм роботи нечіткої «АСК електроенергоспоживання»

В блоці № 2 здійснюється актуалізація чинної нормативно-правової бази України у сфері споживання та постачання електроенергії. Також тут здійснюється введення первинної інформації (поточних параметрів) відповідно до існуючих критеріїв керування та постановки завдання (1)–(10).

Умовний блок № 3 перевіряє, чи є на підприємстві чинна угода (договір) з енергогенеруючою компанією на постачання електроенергії. Якщо така угода є, то дія алгоритму продовжується з наступного блока (№ 4). В протилежному випадку (угоди немає) дія цього алгоритму припиняється, та подальші розрахунки можна буде здійснювати на загальних підставах або ініціювати укладання в подальшому такої угоди.

Аналогічно умовний блок № 4 перевіряє, чи є на підприємстві чинна угода (договір) з енерготранспортуючою компанією на транспортування електроенергії. Якщо така угода є, то дія алгоритму продовжується з наступного блока (№ 5). В протилежному випадку (угоди немає) дія цього алгоритму припиняється, та подальші розрахунки можна буде здійснювати на загальних підставах або ініціювати укладання в подальшому такої угоди.

Блок № 5 дозволяє обрати категорію промислового споживача (зараз це категорії «А» або «Б»). Тобто, Кат = {«А», «Б»}.

У блоці № 6 передбачається можливість підприємству обрати (замовити у енергогенеруючої компанії) необхідний тариф на добу (T_d) та плануємий обсяг споживання електроенергії. Замовлений обсяг бажано витримати максимально точно, бо недовиконання чи навпаки – перевиконання замовленого обсягу може бути пов'язано з потенційними економічними втратами підприємства.

З урахуванням вимог виконання заявленого енергоспоживання у блоці № 7 формується комплексний оціночний показник (T_Σ), що враховує фактичне споживання електроенергії та спеціальну функцію «штрафу». Корисною властивістю останньої є те, що значення штрафу має наближатися до 0 («штрафу» немає, або він мінімальний), якщо зазначених відхилень немає. У протилежному випадку (позитивне або негативне відхилення) функція починає різко зростати (тобто «штраф» максимізується). Прикладом штрафної функції є

$$f^{ump} = r \sum_{i=1}^{NS} \left[\frac{|\bar{T}_i - T_i^{don.}| + (\bar{T}_i - T_i^{don.})}{2} \right]^2, \quad (1)$$

де $\bar{T}_i$ – середньодобове значення i -го тарифу; $T_i^{don.}$ – обмеження на відхилення у споживанні електроенергії при застосуванні i -го тарифу в системі; NS – кількість встановлених тарифних інтервалів; r – коефіцієнт штрафу (ціле число, що обирається емпірично).

$$I = [Ed + f^{ump}(T_d, RE, HT)] \rightarrow MIN, \quad (2)$$

де I – результуюча функція мети; Ed – оцінка фактичного споживання електроенергії; T_d – тариф.

Блок № 8 фактично призначений для вибору оптимальної стратегії (s) керування енергоспоживанням через вирішення оптимізаційної задачі з певними параметрами векторів станів типу (4), (13), (14). Фактичним рішенням з урахуванням базових алгоритмів (рис. 4) будуть такі параметри рудопотоків, повітря, водовідведення та вентиляції (P, B, B_o, B_m), за яких досягається мінімальне значення цільового функціоналу (2)

$$s = \underset{P, B, B_o, B_m}{ArgMIN} [I], \quad (3)$$

де s – це номер оптимальної стратегії керування відповідно до алгоритму (рис. 4).

Завершальний блок № 9 алгоритму фактично зупиняє роботу відповідного розрахунку та дозволяє в подальшому реалізувати більш складні інтелектуальні підходи до керування процесом електроенергоспоживання. Подальшій розробці підлягає друга складова рішення проблеми – вибір пристроїв та параметрів керування.

Визначимо потенційно можливі критерії керування:

$$Z^e = F(RE, HT) \Rightarrow \min; \quad (4)$$

$$P \Rightarrow \max; \quad (5)$$

$$B \Rightarrow \max; \quad (6)$$

$$B_o \Rightarrow \max; \quad (7)$$

$$B_m \Rightarrow \max, \quad (8)$$

де Z^e – загальні витрати підприємства за використану електроенергію (погодинно, подовово), грн.; RE – витрати електроенергії (погодинно, подовово), кВт; HT – діючий тариф на електроенергію, грн./кВт; $F(\bullet)$ – деяка встановлена функціональна залежність; P – виробіток рудної маси на підприємстві (погодинно, подовово), т; B – подача повітря (погодинно, подовово), м³; B_o – об'єм відкачуваних шахтних вод (погодинно, подовово), м³; $B_m \Rightarrow \max$ – вентиляція (погодинно, подовово), м³.

З огляду на потенційну складність вирішення подібних багатокритеріальних завдань, деякі з вищенаведених мінімаксних критеріїв можна в перспективі замінити обмежувачами типу:

$$P \geq P^{\min}; \quad (9)$$

$$B \geq B^{\min}; \quad (10)$$

$$B_o \geq B_o^{\min}; \quad (11)$$

$$B_m \geq B_m^{\min}, \quad (12)$$

де $P^{\min}$, $B^{\min}$, $B_o^{\min}$, $B_m^{\min}$ – деякі граничні значення відповідних параметрів (наприклад, добові планові значення).

Значення витрат електроенергії в системі в цілому або в окремих межах із локального критерію цільової функції (4) таким чином можна аналогічно перевизначити у вигляді:

$$RE = f(P, B, B_o, B_m), \quad (13)$$

де $f(\bullet)$ – деяка функція або апроксимація.

Розробка алгоритму керування енергоспоживанням на основі нечіткої логіки (FL - Fuzzy Logic). З урахуванням вищеописаних передумов в умовах нелінійних характеристик, часто неповної інформації, багатоканальності в реальних виробничих ситуаціях, досить перспективним підходом є застосування сучасних інтелектуальних підходів для реалізації автоматизованого керування на основі нечіткої логіки (Fuzzy logic) [6, 7].

На основі такого підходу розроблений і реалізований програмно алгоритм роботи нечіткої системи керування (рис. 5, 6), який реалізує декілька стратегій керування (тобто багатоканальність):

$$S = \{P, P + B_m, P + B_o, B_m, 0, B_o + B_m, B_o, P + B_m + B_o\}. \quad (14)$$

Рисунок 5 – Алгоритм роботи нечіткої «АСК електроенергоспоживання»

Кожна стратегія визначає кількість можливих керуючих впливів (каналів керування), які потрібно в подальшому реалізувати в АСК. Наприклад, відповідно до певних множин (14) кількість таких параметрів може бути 0 (немає керування або «ручний режим»), 1, 2 або 3. Проте, слід відзначити, що використовуючи таку методику, кількість каналів надалі може бути збільшено при необхідності.

Слід також відзначити, що відповідно (4) й (14) основним керуючим фактором є потенційні витрати підприємства на електроенергію Z^e , які, в свою чергу, залежать від витрат електроенергії RE і годинного тарифу HT .

Логіка роботи алгоритму включає в себе каскад умовних операторів з перевіркою відповідних значень коефіцієнтів кореляції між $[P, B_o, B_m]$ і $[RE]$ (попарно) з наступним агрегуванням зв'язками типу «І/АБО». Перевищення порогового значення (тобто $|r_{xy}| > 0,7$) буде означати необхідність розгляду

цього каналу керування (або керуючого впливу) в результатуючій стратегії. Таким чином, на виході підпрограми визначається конкретна стратегія керування, яка відповідає кількості каналів керування (керуючих впливів): 1, 2 або 3. Наприклад, «по руді», «по руді й воді», «по руді, воді й вентиляції» відповідно.

Другий випадок, що був авансований на початку стосується «плаваючого» добового тарифу, який змінюється кожної години, тобто $NS = 24$ відповідно до (1), (2). Також має присутність обмеження на споживання EE , а саме перевищення заявленого обсягу споживання електричної енергії так само як і зменшене споживання є небажаним («штрафується»).

Проведений аналіз показав, що для цього випадку в якості базового показника цільової функції (2) доцільно брати значення питомого енергоспоживання з розрахунку на 1 т видобутої гірничої маси (руди), тобто з урахуванням (4)–(8)

$$I = \frac{RE}{P} + f^{imp}(RE, HT), \quad (15)$$

де $RE = \{E_1, E_2, \dots, E_{24}, E_\Sigma, E_\Sigma^{don}\}$ – відповідно множина показників енергоспоживання за 1-шу годину доби, 2-гу, ..., 24-ту; $E_\Sigma = E_1 + E_2 + \dots + E_{24}$ – сумарне споживання електричної енергії на добу; E_Σ^{don} – обмеження добового енергоспоживання (фактично замовлення); $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{24}, \bar{P}\}$ – множина показників видобутку руди (погодинно за 1-шу годину доби, 2-гу, ..., 24-ту), $\bar{P}$ – середньодобовий видобуток; $HT = \{T_1, T_2, \dots, T_{24}, \bar{T}\}$ – тарифи на споживання електричної енергії по годинам доби (погодинно за 1-шу годину доби, 2-гу, ..., 24-ту), $\bar{P}$ – середньодобовий тариф.

Рисунок 6 – Алгоритм процедури для вибору стратегії (каналів) керування

Тоді для штрафної функції можемо застосувати вираз

$$f^{шпф}(RE, HT) = r \frac{\bar{T}}{P} \sqrt{\left[\frac{|E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don}| + (E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don})}{2} \right]^2}. \quad (16)$$

З урахування цього отримуємо остаточний вираз для функції мети

$$I = \left[\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{E_i \cdot T_i}{P_i} + r \frac{\bar{T}}{P} \sqrt{\left[\frac{|E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don}| + (E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don})}{2} \right]^2} \right] \rightarrow MIN. \quad (17)$$

Рішенням такої цільової функції будуть деякі вектори P^* , E^* показників видобутку руди та відповідного енергоспоживання типу

$$\begin{aligned} P^* &= \{P_1, P_2, \dots, P_{24}\}; \\ E^* &= \{E_1, E_2, \dots, E_{24}\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Крім того слід врахувати, що, як було доведено в [9], між видобутком та енергоспоживанням в умовах багатьох родовищ існує тісний кореляційний зв'язок. Отже тоді можливо розраховувати ці показники на підставі встановлених регресійних рівнянь типу

$$\begin{aligned} P_i &= f_{pre}(E_i); \\ E_i &= f_{per}(P_i), \end{aligned} \quad (19)$$

де $f_{pre}(E_i)$, $f_{per}(P_i)$ – відповідні регресійні моделі для руди видобутку (на основі енергоспоживання) та/або відповідного енергоспоживання (на основі обсягу видобутої руди). Отже для вирішення завдання оптимізації на підставі функції мети типу (17) та знаходження відповідних векторів (18) треба застосувати певні оптимізаційні методи. Враховуючи доволі значну кількість невідомих (24) точне вирішення такого завдання є доволі складним. Тому для наближеного вирішення застосуємо підхід

стохастичної оптимізації. З урахуванням цього відповідний алгоритм наближеного вирішення завдання оптимізації (17) містить наступні етапи.

1. Початок роботи алгоритму.
2. Задати первинні дані:
 - максимальна кількість ітерацій для алгоритму оптимізації (N_{Σ});
 - максимальне значення погодинного енергоспоживання (E_i^{max}) для генератора випадкових значень;
 - мінімальне значення погодинного енергоспоживання (E_i^{min}) для генератора випадкових значень;
 - допустиме (рекомендоване або оптимальне) значення добового енергоспоживання (E_{Σ}^{don});
 - варіативний коефіцієнт для функції штрафу (r).
3. Ініціалізація первинних значень для робочих даних алгоритму:
 - субоптимальне значення функції мети ($I = +\infty$);
 - субоптимальне значення для питомого погодинного енергоспоживання ($E_i^*/P_i^* = 0$);
 - номер поточної ітерації алгоритму ($j=1$).
4. Генеруємо 24 випадкових значень добового погодинного енергоспоживання ($E_i, [i=1 \div 24]$) з рівномірним законом розподілу $\xi_i = RND(0 \div 1)$ на інтервалі $[0 \div 1]$, а потім «розтягуємо» на необхідний інтервал $[E_i^{min} \div E_i^{max}]$:

$$E_i = E_i^{min} + (E_i^{max} - E_i^{min}) \xi_i, \text{ тобто}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 = E_1^{\min} + (E_1^{\max} - E_1^{\min}) \xi_1 \\ E_2 = E_2^{\min} + (E_2^{\max} - E_2^{\min}) \xi_2 \\ \dots \\ E_{24} = E_{24}^{\min} + (E_{24}^{\max} - E_{24}^{\min}) \xi_{24} \end{array} \right\}.$$

5. Розраховуємо відповідні 24 значень для видобутку руди ($P_i, [i = 1 \div 24]$) на основі відповідних регресійних моделей [1] та (19):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = f_{\beta_{pe}}(E_1) \\ P_2 = f_{\beta_{pe}}(E_2) \\ \dots \\ P_{24} = f_{\beta_{pe}}(E_{24}) \end{array} \right\}.$$

6. Визначаються необхідні усереднені ($\bar{T}, \bar{P}$) та сумарні (E_{Σ}) значення для подальшого розрахунку поточного значення цільової функції:

$$\bar{T} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} T_i;$$

$$\bar{P} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} P_i;$$

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{24} E_i.$$

7. Розраховується нове поточне значення функції мети (I) на підставі виразу (17).

8. Якщо $I < I^*$, то перевизначаємо субоптимальне значення цільової функції $I^* = I$ та відповідних векторів енергоспоживання та видобутку руди:

$$E_i^* = E_i, P_i^* = P_i, i = 1 \div 24.$$

9. Додаємо номер для наступної ітерації $j = j + 1$, якщо $j \leq N_{\Sigma}$, то переходимо до наступного циклу (ітерації) починаючи з блоку № 4. Інакше, це означає, що досягнуто останньої ітерації оптимізації, переходимо до завершального блоку алгоритму.

10. Роздруковуємо (або вносимо до бази даних) субоптимальні значення функції мети, векторів енергоспоживання та видобутку руди:

$$I^*, E_i^*, P_i^*, i = 1 \div 24.$$

11. Завершення роботи алгоритму оптимізації.

На рис. 7–11 наведено результати оптимізації із застосуванням запропонованого алгоритму. Це динаміка зміни значень цільової функції (I, I^*), питомих енерговитрат (E_i^*/P_i^*) та штрафної функції $f^{шп}(\cdot)$ залежно від номеру ітерації (кроку розрахунку j).

Рисунок 7 – Зміна усередненого значення погодинного питомого енергоспоживання в процесі оптимізації

Рисунок 8 – Зміна значень функції штрафу за надмірне або недостатнє споживання ЕЕ

Рисунок 9 – Зміна значень цільової функції (I) та відповідного субоптимуму (I^*)

Рисунок 10 – Значення вектору погодинного (на добу) енергоспоживання (E^*), що відповідає субоптимуму функції мети (I^*) на прикладі статистики шахти «Октябрська»

Рисунок 11 – Значення вектору погодинного (на добу) видобутку руди (P^*), що відповідає субоптимуму функції мети (I^*) на прикладі статистики шахти «Октябрьська»

ВИСНОВКИ. 1. Визначені теоретичні засади дозволяють формувати критерії та структуру узагальненого алгоритму керування електроспоживанням гірничорудних підприємств на основі N -ї кількості варіантів ітерацій.

2. Аналіз результатів стохастичної оптимізації (рис. 7–11) показує, що навіть за умов застосування доволі незначної кількості ітерацій $N_{\Sigma}=10$ можливо покращити первинне рішення на понад 60 % (первинне значення цільової функції $I^*=27,7$ та остаточне значення на останній ітерації $I^*=10,7$). Проведене моделювання дозволяє визначити необхідні вектори для енергоорієнтованого вартісноцільового співвідношення добового погодинного видобутку руди (P^*) та відповідного рівня енергоспоживання підприємства (E^*), що відповідає субоптимальному значенню цільової функції (I^*). Отримані результати пропонуються застосовувати як рекомендації для раціонального планування роботи підприємства.

3. Запропонована модель дозволяє отримувати кінцевий результат з будь-якою необхідною за рівнем якістю. При такій необхідності треба лише збільшити кількість ітерацій на 2–3 порядки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Енергетична стратегія України : офіц. текст. Київ : Міненерго України, 2005. 35 с.
2. Стогній Б. С. та ін. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 275 с.
3. Миколюк О. А. Стратегізація енергетичної безпеки України за умов євроінтеграційних викликів. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. № 4. С. 17–24.
4. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44–50.
5. Wikipedia. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki> (дата звернення: 10.06.2014).
6. Sinchuk I. Harmonization of modeling systems for assessing the electric- power consumption levels at mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. № 12 (4). P. 100–107.
7. Sinchuk O., Sinchuk I., Kozakevych I., Fedotov V., Serebrenikov V., Lokhman N., Beridze T., Boiko S., Pyrozhenko A., Yalova A. Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises. *Eastem-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 6 (3). P. 20–27.
8. Про ринок електричної енергії. Закон України від 13.04.2017 р. № 27-28. Дата оновлення: 01.01.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення: 20.04.2021).
9. Sinchuk O., Kupin A., Sinchuk I., Kozakevich I., Dozorenko O. Optimization of power consumption in conditions of iron ore mine on the basis of fuzzy logic applicatio. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2019. № 3 (47). С. 58–65.
10. Wu T., Shieh S., Jang S., Liu C. Optimal energy management integration for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005. Vol. 20 (3). P. 1431–1439. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.852063.
11. Patterson S., Kozan E., Hyland P. An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions. *International Journal of Production Research*. 2016. Vol. 54 (14). P. 4213–4227. DOI: 10.1080/00207543.2015.1117150.
12. Brand H. G., Vosloo J. C., Mathews E. H. Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry. *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy: international conference, Cape Town, 2015*. P. 17–22. DOI: 10.1109/ICUE.2015.7280241.
13. Middelberg A., Zhang J., Xia X. An optimal control model for load shifting – With application in the energy management of a colliery. *Applied energy*. 2009. Vol. 86 (7). P. 1266–1273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.09.011.
14. Souza E. De. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. P. 1092–1097. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.048.
15. Gundersen R. E., Von Glehn F. H., Wilson R. W. Improving the efficiency of mine ventilation and cooling systems through active control. *8th International Mine Ventilation Congress*. Brisbane, 2005. P. 13–18.
16. Cupek R., Duda J., Zonenberg D., Chlopas L., Dziedziel G., Drewniak M. Data mining techniques for energy efficiency analysis of discrete production lines. *9th International Conference ICCCI 2017*. Nicosia, 2017. part II. P. 292–301. DOI: 10.1007/978-3-319-67077-5_28.
17. Mare P., Kriel C. J. R., Marais J. H. Energy efficiency improvements through the integration of underground mine water reticulation and cooling systems. *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy*. Cape Town, 2016. P. 112–117.

18. Кокшаров В. А. Управление энергопотреблением промышленного предприятия : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2015. 170 с.

19. Матвейкин В. Г., Муромцев Д. Ю. Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения. Москва : Машиностроение-1, 2007. 110 с.

20. Ивашенко В. А. Теоретико-методологические основы, методы и математические модели управления электропотреблением промышленных предприятий. *Вестник СГТУ*. 2005. № 2 (7). С. 100–113.

21. Koksharov V. A. Theoretical-methodological basis of formation of the enterprise strategy improving energy efficiency. *European Science and Technology : materials of the X International research and practice conference (Munich, May 28th-29th, 2015)*. Munich, 2015. Vol. I. P. 143–148.

22. Праховник А. В., Розен В. П., Майстренко В. С. Вирівнювання графіків електричних потужностей енергосистем за допомогою споживачів-регуляторів дискретної дії.

Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці : тези доповідей 1-ої міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 19-22 вересня 1995 р. Львів, 1995. С. 269–270.

23. Розен В. П., Прокопенко В. В., Майстренко В. Е. Тарифы на электрическую энергию как средства выравнивания графиков нагрузки энергосистем. *Кризисные ситуации в энергетике : экономическая оценка и моделирование решений по их нейтрализации*: тезисы докл. Киев, 1994. С. 38–39.

24. Давиденко Л. В. Формалізація задачі багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2010. Вип. 101. С. 19–21.

25. Випанасенко С. І. Системи енергоменеджменту вугільних шахт : монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2008. 106 с.

ON TACTICS OF DEVELOPING ARCHITECTURE OF THE GENERALIZED ALGORITHM OF ENERGY-ORIENTED POWER CONSUMPTION CONTROL AT IRON ORE UNDERGROUND MINING COMPANIES

I. Sinchuk, A. Kupin, V. Baranovskyi

Kyryvi Rih National University

vul. Vitalia Matushevicha, 11, Kyryvi Rih, 50027, Ukraine.

E-mail: lab.133.136@gmail.com, kupin.andrew@gmail.com, vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Purpose. The article substantiates and confirms the thesis about the need for energy-oriented power consumption control levels in power complexes: the system of power supply at iron ore underground mining enterprises on the basis of experiment data analysis. **Methodology.** It is estimated that along with the current positive trend suitable for developing architecture of power consumption control levels when a limited number of energy-intensive enterprises consume about 80 % of the total power produced, their functioning modes in day hours vary. Analysis of varied real-time modes of power consumption in hours indicates absence of enterprises' control over this process. **Results.** The suggested methods enable forecasting efficiency of power consumption control in hours in any variant of time-of-day tariff integration. In non-standard and changeable conditions of technological parameters in mining production, on the basis of the results of stochastic optimization analysis, it is proven that even when applying a small number of iterations $N = 10$, it is possible to improve the initial solution by over 60 % (the initial value of the objective function is $I^* = 27.7$ and the final value on the last iteration is $I^* = 10.7$). There are determined required vectors to specify a connection of the time-of-day tariff of ore mining (P^*) and the corresponding power consumption (E^*) which corresponds to the suboptimal value of the objective function (I^*). The obtained results can be applied to developing recommendations for a more efficient planning of an enterprise's performance. **Practical value.** The suggested algorithm implemented in power consumption control systems enables receiving a final result with any quality required for the level. If the quality of the obtained results needs improving, the number of iterations is to be increased by two or three orders of magnitude. Figures 11, tables 2, references 25.

Key words: power consumption, control, mining enterprises.

REFERENCES

1. *Yenergetychna strategiya Ukrainy [Energy strategy of Ukraine]*. (2005). Kyiv: Minenergo Ukraini. [in Ukrainian]

2. Stogniy, B. S., Kirilenko, O. V., Prakhovnik, A. V. & Denisyuk, S. P. (2011). *Osnovni parametri energozabezpechennya natsionalnoi ekonomiki na period do 2020 roku [Main parameters of energy security of the national economy for the period until*

2020]. Kyiv: Institut elektrodinamiky NAN Ukrainy. [in Ukrainian]

3. Mikolyuk, O. A. (2018). Strategizatsiya energetichnoi bezpeki Ukraini za umov evrointegratsiynikh viklikiv. *Visnik Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Yekonomichni nauki*, 4, 17–24. [in Ukrainian]

4. Stogniy, B. S., Kirilenko, O. V. & Denisyuk, S. P. (2010). *Intelektualni elektrichni merezhi*

elektroenergetichnikh sistem ta ikhne tekhnologichne zabezpechennya. *Tekhnichna elektrodinamika*, 6, 44–50. [in Ukrainian]

5. Wikipedia (2014). Retrieved from <http://en.wikipedia.org/wiki>

6. Sinchuk, I. (2018). Harmonization of modeling systems for assessing the electric-power consumption levels at mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 100–107. [in Ukrainian]

7. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Kozakevych, I., Fedotov, V., Serebrenikov, V., Lokhman, N., Beridze, T., Boiko, S., Pyrozhenko, A. & Yalova, A. (2018). Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises. *Eastem-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3), 20–27. [in Ukrainian]

8. *Pro rynek elektrichnoi energii: Zakon Ukrainy [About the electric power market. Ukrainian law]* (2017), № 27–28, update date 2021. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> [in Ukrainian]

9. Sinchuk, O., Kupin, A., Sinchuk, I., Kozakevich, I. & Dozorenko, O. (2019). Optimization of power consumption in conditions of iron ore mine on the basis of fuzzy logic application, *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy*, 3 (47), 58–65. [in Ukrainian]

10. Wu, T., Shieh, S., Jang, S. & Liu, C. (2005). Optimal energy management integration for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (3), 1431–1439. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.852063.

11. Patterson, S., Kozan, E. & Hyland, P. (2016). An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions. *International Journal of Production Research*, 54 (14), 4213–4227. DOI: 10.1080/00207543.2015.1117150.

12. Brand, H. G., Vosloo, J. C. & Mathews, E. H. (2015). Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry. *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy: international conference*. Cape Town. DOI: 10.1109/ICUE.2015.7280241.

13. Middelberg, A., Zhang, J. & Xia, X. (2009). An optimal control model for load shifting – With application in the energy management of a colliery. *Applied energy*, 86 (7), 1266–1273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.09.011.

14. Souza, E. De. (2015). Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1092–1097. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.048.

15. Gundersen, R. E., Von Glehn, F. H. & Wilson, R. W. (2005). Improving the efficiency of mine ventilation and cooling systems through active control. *8th International Mine Ventilation Congress, Brisbane*, 13–18.

16. Cupek, R., Duda, J., Zonenberg, D., Chlopa, L., Dziedziel, G. & Drewniak, M. (2017). Data mining techniques for energy efficiency analysis of discrete production lines. *9th International Conference ICCCI*

2017. Nicosia, part II, 292–301. DOI: 10.1007/978-3-319-67077-5_28.

17. Mare, P., Kriel, C. J. R. & Marais, J. H. (2016). Energy efficiency improvements through the integration of underground mine water reticulation and cooling systems. *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy, Cape Town*, 112–117.

18. Koksharov, V. A. (2015). *Upravlenie energopotrebleniem promyshlennogo predpriyatiya: monografiya [Management of energy consumption of an industrial enterprise: monograph]*. Yekaterinburg: UrGUPS. [in Russian]

19. Matveykin, V. G. & Muromtsev, D. Yu. (2007). *Teoreticheskie osnovy energosberegayushchego upravleniya dinamicheskimi rezhimami ustanovok proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya [Theoretical foundations of energy-saving control of dynamic modes of industrial and technical installations]*. Moscow: Mashinostroenie-1. [in Russian]

20. Ivashchenko, V. A. (2005). Teoretiko-metodologicheskie osnovy, metody i matematicheskie modeli upravleniya elektropotrebleniem promyshlennykh predpriyatiy. *Vestnik SGTU*, 2 (7), 100–113. [in Russian]

21. Koksharov, V. A. (2015). Theoretical-methodological basis of formation of the enterprise strategy improving energy efficiency. *European Science and Technology: materials of the X International research and practice conference, May 28th-29th 2015, Munich*, I, 143–148.

22. Prakhovnyk, A. V., Rozen, V. P. & Maistrenko, V. Ie. (1995). Vyrivniuvannya hrafikiv elektrychnykh potuzhnosti enerhosystem za dopomohoiu spozhyvachiv-rehulatoriv dyskretnoi dii. *Matematychni modeliuvannya v elektrotekhnitsi y elektroene-rhetytsi: tezy dopovidei 1-oi mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf.*, 19-22 September 1995, Lviv, 269–270. [in Ukrainian]

23. Rozen, V. P., Prokopenko, V. V. & Maistrenko, V. E. (1994). Tarifnyi na elektricheskuyu energiyu kak sredstva vyiravnivaniya grafikov nagruzki energosistem. *Materialy konf. Krizisnye situatsii v energetike: ekonomicheskaya otsenka i modelirovanie resheniy po ih neytralizatsii*, Kiev, 38–39. [in Ukrainian]

24. Davydenko, L. V. (2010). Formalizatsiya zadachi bagatokriteriynogo keruvannya elektrosposhyvannyam sistem vodopostachannya ta vodovidvedennya. *Visnik KhNTUSG im. P. Vasilenka. Tekhnichni nauky. «Problemy energozabezpechennya ta energozberezhennya v APK Ukraini»*, 101, 19–21. [in Ukrainian]

25. Vypanasenko, S. I. (2008). *Systemy enerhomenedzhmentu vuhilnykh shakht: monografiya [Energy management systems in coal mines: monograph]*. Dnipropetrovsk, Natsionalniy girnichiy universitet. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 22.03.2021.