

БЕНЧМАРКІНГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

В. П. Розен

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
вул. Борщагівська, 115, корп. 22., м. Київ, Україна, 03056. E-mail: auek@ukr.net

Л. В. Давиденко, В. І. Волинець

Луцький національний технічний університет
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018. E-mail: L.Davydenko033@gmail.com; vvi76@i.ua

В. А. Давиденко, Н. В. Давиденко

Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028. E-mail: v.a.davydenko@nuwm.edu.ua; n.v.davydenko@nuwm.edu.ua

Запропоновано процедуру бенчмаркінгу енергоефективності, засновану на багатомірному порівнянні об'єктів із застосуванням ранжування за правилом Борда, яка передбачає врахування інтенсивності технологічного процесу та умов функціонування вугільної шахти. Об'єкти дослідження описано показниками, що характеризують ефективність електроспоживання, та технологічними параметрами. Для врахування умов функціонування об'єктів дослідження застосовано підхід, який базується на попередній їх класифікації за технологічними показниками та формуванні однотипних груп. Сформовані з урахуванням характеру показника (стимулятор, чи дестимулятор) еталони енергоефективності (граничний, середній, ідеальний), застосовано для ідентифікації розриву з кращою практикою. Показано, що процедура ранжування за правилом Борда дає змогу позиціонувати об'єкти, їх групи і об'єкти в межах кожної групи, встановити еталони ефективності електроспоживання та визначити лідерів і аутсайдерів за рівнем енергоефективності. Використання запропонованої процедури дає змогу виявити кращі практики ефективного електроспоживання та встановити досяжні орієнтири для підвищення рівня енергоефективності вугільних шахт, що функціонують в певних умовах.

Ключові слова: вугільна шахта, бенчмаркінг, ранжування, правило Борда, еталон енергоефективності.

БЕНЧМАРКІНГ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В. П. Розен

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ул. Борщаговская, 115, корп. 22., Г. Киев, Украина, 03056. E-mail: auek@ukr.net

Л. В. Давыденко, В. И. Волинец

Луцкий национальный технический университет
ул. Львовская, 75, м. Луцк, Украина, 43018. E-mail: L.Davydenko033@gmail.com; vvi76@i.ua

В. А. Давыденко, Н. В. Давыденко

Национальный университет водного хозяйства и природопользования
ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028. E-mail: v.a.davydenko@nuwm.edu.ua; ninadavydenko1992@gmail.com

Предложена процедура бенчмаркинга энергоэффективности, основанная на многомерном сравнении объектов с применением ранжирования по правилу Борда, которая предполагает учет интенсивности технологического процесса и условий функционирования угольной шахты. Объекты исследования описаны показателями, характеризующими эффективность электропотребления, и технологическими параметрами. Для учета условий функционирования объектов исследования применен подход, основанный на предыдущей их классификации по технологическим показателям и формировании однотипных групп. Сформированные с учетом характера показателя (стимулятор, или дестимулятор) эталоны энергоэффективности (предельный средний, идеальный), применены для идентификации разрыва с лучшей практикой. Показано, что процедура ранжирования по правилу Борда позволяет позиционировать объекты, их группы и объекты в пределах каждой группы, установить эталоны эффективности электропотребления и определить лидеров и аутсайдеров по уровню энергоэффективности. Использование предлагаемой процедуры позволяет выявить лучшие практики эффективного электропотребления и установить достижимые ориентиры для повышения уровня энергоэффективности угольных шахт, функционирующих в определенных условиях.

Ключевые слова: угольная шахта, бенчмаркинг, ранжирование, правило Борда, эталон энергоэффективности.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Проблема підвищення рівня енергоефективності нині має важливе значення. Енергоефективність країни визначається енергоефективністю регіонів, промислових підприємств, технологій тощо. Згідно рекомендацій Міжнародного енергетичного агентства стосовно політики підвищення енергоефективності в різних секторах важливо забезпечити в комплексі спостереження, контроль, реалізацію та оцінку заходів щодо підвищення рівня енергоефективності. Для цього

необхідно створити систему зіставлення параметрів ефективності енергоспоживання для підприємств різних галузей, що виробляють подібні продукти, в рамках якої буде можливим здійснення порівняння своїх показників енергоефективності з кращими показниками в галузі та світі. Отже, однією з актуальних проблем для України є підвищення рівня енергоефективності за рахунок використання нових методів і підходів до його оцінки.

Для оцінки стану енергозбереження на об'єктах існує низка різних за характером методів, механізмів, практичних заходів. Енергоефективність - це комплексна категорія, для якої складно розрахувати узагальнений показник. Аналіз енергоефективності виробничої системи без узагальнення показників енергоефективності, а лише на підставі виявлених їх еталонних значень, є можливим за умови використання процедур порівняльного аналізу – концепції бенчмаркінгу [1].

Бенчмаркінг є невід'ємною частиною планування, аналізу та оцінки процесу. Бенчмаркінг енергоефективності є типом бенчмаркінгу, сфокусованим на ефективності використання енергії [2], який представляє собою збір, аналіз та оцінку інформації про енергоспоживання на основі порівняльного аналізу інформаційного поля об'єктів дослідження [1]. Будучи безперервною процедурою порівняльного аналізу (порівняння та оцінювання показників функціонування підприємств, технологій, процесів), бенчмаркінг є основою для постійного удосконалення та повинен бути інтегрованим в систему енергоменеджменту підприємства. Згідно Додатку А до ДСТУ ISO 50001:2014 «Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання» бенчмаркінг позиціонується як один з інструментів підтримки і безперервного покращення діяльності у сфері енергозбереження. Бенчмаркінг є складовою системи контролю ефективності енергоспоживання. За результатами порівняння об'єктів у тому ж секторі промисловості [3] встановлюються орієнтири ефективного енергоспоживання. Отже, питання використання порівняльного аналізу набуває важливого значення для вирішення проблеми підвищення енергоефективності.

Країни Євросоюзу ввели стандарт EN 16231 «Energy Efficiency Benchmarking Methodology», який розглядає аспекти процедури бенчмаркінгу та містить вказівки щодо подальшого впровадження і використання енергетичних орієнтирів. Проте, стандарт надає лише загальні вказівки щодо проведення бенчмаркінгу енергоефективності [2], що зумовлює необхідність розробки принципів та способів реалізації його етапів. Згідно стандарту EN 16231, бенчмаркінг енергоефективності використовується для оцінювання питомого енергоспоживання. В літературі пропонується низка підходів для ранжування об'єктів дослідження за рівнем питомого енергоспоживання, які спираються на визначення певних індексів або індикаторів. Для оцінки рівня енергоефективності в промисловості найбільш широко застосовується індекс ефективності енерговикористання [3, 4], який визначають на основі фактичного та теоретичного використання енергії на випуск певного об'єму продукції з урахуванням кращої практики використання енергії в виробничому процесі. Однак, ранжування лише за величиною питомого енергоспоживання не дає змоги врахувати інтенсивність технологічного процесу, особливості функціонування об'єкту, а також проаналізувати причини, що зумовлюють відставання від еталону.

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених проблемі ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів та енергії в різних га-

лузях [5], в тому числі, й у вугільній промисловості [6], аналізу та оцінки рівня енергоефективності складних виробничих об'єктів [7], моніторингу енергоефективності [8], питанням розробки підходів до оцінювання рівня енергоефективності, здатних забезпечити співставлення результатів енергоспоживання з кращими зразками енергоефективності, врахувати специфіку об'єкту дослідження та сприяти прийняттю дієвих управлінських рішень, приділено недостатньо уваги.

Метою статті є удосконалення процедури виявлення кращих зразків енергоефективності та формування еталону ефективного енергоспоживання електротехнічних комплексів вугільних шахт.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Бенчмаркінг енергоефективності – це процедура планомірного вивчення кращих практик енергоефективності, порівняння показників енергоефективності об'єктів з кращими зразками для виявлення сильних і слабких сторін і впровадження кращих досягнень [1]. Бенчмаркінг в однаковій мірі передбачає оцінювання та порівняння. У даному контексті оцінювання виступає як систематичний збір інформації, необхідної для прийняття ефективних рішень щодо вибору кращих практик, їх адаптації, поліпшення процесу енергоспоживання у виробничій системі. Для порівняння використовують різні типи аналізу переваги, які враховують орієнтири, засновані на: результатах минулої діяльності; еталонних значеннях; порівнянні декількох об'єктів [2]. Одним із способів оцінювання рівня енергоефективності є визначення рейтингу об'єкту на основі багатомірного порівняння, яке передбачає урахування сукупності показників енергоефективності, визначення їх еталонних значень, формування «зразка» енергоефективності та визначення відстані до нього, сприяє виявленню кращих (гірших) з точки зору ефективності енергоспоживання об'єктів.

Нехай досліджувана система складається зі скінченної множини C_0 вугільних шахт C_i , $C_0 = \{C_i | i = \overline{1, m}\}$ [8]. Кожну вугільну шахту $C_i \in C_0$ характеризує скінченна множина C_0 показників C_j , $C_0 = \{C_j | j = \overline{1, n}\}$. Зі сформованої групи показників X_0 , використовують для ранжування найбільш впливові показники X_k , $X_0 = \{X_k | k = \overline{1, l}\}$. Кожний показник $X_k \in X_0$ піддається аналізу у порівнянні з аналогічними показниками інших вугільних шахт.

Для визначення рейтингу вугільних шахт доцільно скористатися моделлю ранжування за правилом Борда [9]. За кожним показником x_{ij} впорядковують усі i -ті вугільні шахти від кращої до гіршої з точки зору ефективності електроспоживання. За останнє місце i -та вугільній шахті надається 0 балів, один бал – за передостаннє і так далі. Згодом підраховуються бали, які отримані за кожним показником. Перше місце віддають i -тій вугільній шахті з найбільшою сумою балів. Алгоритм Борда містить такі етапи [9]:

- формування матриці спостережень. Вихідна множина складається з m елементів, що описані n ознаками. В якості показників для ранжування вико-

ристано: питоме споживання електроенергії (X_1), видобуток вугілля (X_2) та виробіток (X_3) (табл. 1);

- нормування показників, оскільки вони мають різну фізичну природу. Як правило нормування застосовано приведення значення показника до його суми;

- оцінювання ефективності електроспоживання кожної вугільної шахти за використанням коефіцієнта Борда. Для кожного показника коефіцієнт Борда:

$$B(C_i) = \left| \{C_k : C_i > C_k, C_k \in \{C_1, C_1, \dots, C_m\}\} \right|. \quad (1)$$

Результуючий коефіцієнт Борда:

$$B(C_i) = \sum_{j=1}^n \rho_j B_j(C_i), i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

де ρ_j – степінь важливості критеріїв, який визначається нормалізованими значеннями показника:

$$\sum_{j=1}^n \rho_j = 1, \rho_j \geq 0, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

- впорядкування вугільних шахт за ступенем переважання. Найбільш енергоефективна вугільна шахта C^* визначається з умови:

$$B(C^*) = \max_i B(C_i). \quad (4)$$

Результатом виконання алгоритму є позиціонування кожної вугільних шахт за рівнем енергоефективності (табл. 1).

Таблиця 1 – Ранжування вугільних шахт за правилом Борда

Назва шахти	Значення показників						Коефіцієнти Борда				Ранг
	X_1	X_2	X_3	X_1^H	X_2^H	X_3^H	$B(C_{X1})$	$B(C_{X2})$	$B(C_{X3})$	$B(C)$	
Шахта №1	185,121	76716	99,63	0,2149	0,0205	0,0300	0	1	0	1	13
Бужанська	72,598	74852	100,61	0,0843	0,0200	0,0303	3	0	1	4	12
Шахта №5	52,690	93134	127,58	0,0612	0,0249	0,0384	6	2	2	10	10
Шахта №9	55,488	185601	179,50	0,0644	0,0496	0,0540	5	3	3	11	9
Великомостівська	51,694	227300	344,39	0,0600	0,0607	0,1036	8	5	8	21	6
Бендюзька	27,898	419000	403,27	0,0324	0,1119	0,1213	12	9	12	33	1
Межирічанська	37,760	452700	371,98	0,0438	0,1209	0,1119	11	11	11	33	2
Відродження	38,103	450800	257,75	0,0442	0,1204	0,0775	10	10	6	26	4
Лісова	88,528	251500	230,31	0,1028	0,0672	0,0693	1	6	5	12	8
Зарічна	85,137	189100	227,83	0,0988	0,0505	0,0685	2	4	4	10	11
Візейська	43,285	409600	348,30	0,0503	0,1094	0,1048	9	8	10	27	3
Степова	70,543	595700	345,13	0,0819	0,1591	0,1038	4	12	9	25	5
Червоноградська	52,528	318500	287,97	0,0610	0,0851	0,0866	7	7	7	21	7

В основі бенчмаркінгу лежить вибір еталону для порівняння. Аналіз показників енергоефективності партнерів бенчмаркінгу дає змогу визначити їх кращі значення та сформувати еталон ефективного енергоспоживання. За еталон, зазвичай, приймають показники кращого об'єкту. В окремих випадках як еталон енергоефективності приймають середні значення показників енергоефективності всіх партнерів бенчмаркінгу. Слід зазначити, що еталоном не завжди може виявитись реальний об'єкт, це може бути ідеал, сформований на основі найкращих значень показників енергоефективності, який не існує насправді [10]. Під час визначення кращих параметрів енергоефективності для формування еталону (табл. 2) необхідно враховувати характер параметру: чи є він стимулятором енергоефективності, чи дестимулятором.

Таблиця 2 – Еталон енергоефективності

Тип еталону	Еталонні значення параметрів		
	X_1	X_2	X_3
Найкращий	27,898	419000	403,27
Середній	66,26	288038,69	255,71
Ідеальний	27,898	595700	403,27

Визначення еталонних значень показників енергоефективності дає змогу визначити лідерів (об'єкти, показники енергоефективності яких найменше відрізняються від еталонних значень) та аутсайдерів (показники енергоефективності яких найбільше відрізняються від еталонних значень). Аналіз вихідного стану, умов функціонування лідерів, особливостей організації їх режимів роботи та енерго-

споживання дозволить визначити «кращі практики» енергоефективності.

Відхилення показників від еталону вкажуть на відставання об'єкту бенчмаркінгу. Величина відхилення дозволить ідентифікувати розрив - різницю між справжнім станом об'єкту та станом, в якому хотілося б перебувати. Розрив може бути позитивним, нульовим і негативним. При ретельному виборі партнера позитивні розриви виникають не часто. Нульовий розрив свідчить про те, що об'єкт дослідження знаходиться на рівні партнера бенчмаркінгу. Використовуючи інформацію, зібрану в процесі порівнянь, нульовий розрив можна перетворити на позитивний. Негативний розрив - це нормальний результат процесу порівняння, заклик до дій та впровадження плану поліпшень.

Ідентифікація розриву також передбачає інтерпретацію розриву та виявлення причин, що його зумовили, сильних і слабких сторін [10]. Щоб ідентифікувати розриви, достатньо перебрати всі показники енергоефективності та порівняти їх значення з еталонами. Значно складніше провести якісний аналіз і встановити причини розриву, щоб намітити шляхи поліпшень.

Отримані результати ранжування свідчать, що застосування процедур багатомірного порівняння з урахуванням показників енергоефективності та технологічних параметрів сприяє підвищенню інформативності результатів бенчмаркінгу енергоефективності та дозволяє сформувати еталон енергоефективності, який враховує інтенсивність виробничого процесу.

Недоліком простого ранжування об'єктів є складність досягнення аутсайдерами результатів абсолютних лідерів та неможливість коректної оцінки енергоефективності об'єктів, що функціонують в різних умовах. При цьому, результати бенчмаркінгу будуть відображати відмінності в ефективності енергоспоживання об'єктів та відмінності між самими об'єктами, тобто, виникає проблема урахування відмінностей між не достатньо однотипними об'єктами. Тому, доцільно застосувати підхід, заснований на виявленні груп подібних об'єктів, тобто, попередньо здійснити їх класифікацію. Для розбиття множини вугільних шахт на класи використано ієрархічний метод кластеризації. Як класифікаційні змінні використано технологічні параметри, які суттєво впливають на рівень енергоспоживання електротехнічного комплексу вугільної шахти [11]. У результаті проведеної класифікації виділено чотири класи: 1 клас - шахти: Шахта №1, Бужанська, Шахта №5, Зарічна; 2 клас - шахти: Шахта №9, Візейська; 3 клас - шахти: Великомоствська, Лісова, Степова; 4 клас - шахти: Бендюзька, Межирічанська, Відродження, Червоноградська [11].

В цьому випадку групою лідерів є група об'єктів, показники енергоефективності яких найменше відрізняються від еталонних значень. Величина відхилення дозволить ідентифікувати розрив, визначити рівень енергоефективності, здійснити позиціонування групи однотипних об'єктів та виявити групи лідерів і аутсайдерів [10]. Результати аналізу відхилення від ідеального еталону показників кожної групи об'єктів (табл. 3) та ідентифікація розриву від вибраного еталону дозволяють стверджувати: групою лідерів є група 4, а групою аутсайдерів – група 1.

Таблиця 3 – Відхилення показників від еталону

Клас	Вугільна шахта	Відхилення			Середнє відхилення		
		ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3
1	Шахта №1	157,2	518984	303,64	80,75	476050	251,59
	Шахта №5	24,79	502566	275,69			
	Зарічна	57,24	406600	175,44			
2	Шахта №9	27,59	410099	223,77	21,48	298099,5	139,37
	Візейська	15,39	186100	54,97			
3	Бужанська	44,7	520848	302,66	49,32	288349,3	177,92
	Лісова	60,63	344200	172,96			
	Степова	42,65	0	58,14			
4	Велико-моствська	23,8	368400	58,88	13,7	222040	70,198
	Бендюзька	0	176700	0			
	Межирічанська	9,86	143000	31,29			
	Відродження	10,21	144900	145,52			
	Червоноградська	24,63	277200	115,3			

Такий підхід дає змогу виявити групи лідерів та аутсайдерів, проте позиціонування інших груп у випадку великої їх кількості не завжди є однозначним. Тому доцільно виконати ранжування груп. Для цього необхідно визначити середні значення показників енергоефективності в межах групи, які будуть використані для визначення рейтингу групи (табл. 4).

Таблиця 4 – Ранжування груп вугільних шахт

Клас	Середні значення показників			Коефіцієнт Борда				Ранг
	X_1	X_2	X_3	$B(C_{X1})$	$B(C_{X2})$	$B(C_{X3})$	$B(C)$	
1	107,65	119650	151,68	0	0	0	0	4
2	49,39	297600,5	263,9	2	1	2	5	2
3	77,22	307350,67	225,35	1	2	1	4	3
4	41,6	373660	333,07	3	3	3	9	1

Процедура ранжування за правилом Борда з урахуванням усереднених показників енергоефективності груп дозволяє визначити рейтинг кожної групи, визначити відмінність у ефективності енергоспоживання між групами, а також сформувати еталон як збірний образ кращих практик об'єктів групи з вищим рангом. Результати ранжування дають змогу визначити групу лідерів і групу аутсайдерів та однозначно позиціонувати інші групи. Заключним етапом є ранжування об'єктів в межах кожної групи (табл. 5).

Таблиця 5 – Результати ранжування вугільних шахт в межах кластерів

Клас	Вугільна шахта	Коефіцієнт Борда				Ранг
		$B(C_{X1})$	$B(C_{X2})$	$B(C_{X3})$	$B(C)$	
1	Шахта №1	0	0	0	0	3
	Шахта №5	2	1	1	4	2
	Зарічна	1	2	2	5	1
2	Шахта №9	0	0	0	0	2
	Візейська	1	1	1	3	1
3	Бужанська	1	0	0	1	3
	Лісова	0	1	1	2	2
	Степова	2	2	2	6	1
4	Великомоствська	1	0	2	3	4
	Бендюзька	4	2	4	10	1
	Межирічанська	2	4	3	9	2
	Відродження	2	3	0	5	3
	Червоноградська	0	1	1	2	5

Це дає змогу виявити лідерів та аутсайдерів в групі, тобто визначити «кращих серед кращих», «гірших серед кращих» тощо, а також визначити еталони енергоефективності в групі (табл. 6). Перевагою запропонованого підходу є можливість встановлення більш досяжних еталонів, що важливо для прийняття рішення про заходи щодо підвищення рівня енергоефективності, адже не кожен з партнерів бенчмаркінгу може відразу досягнути рівня абсолютного лідера.

Таблиця 6 – Еталони енергоефективності груп

Клас	Тип еталону	Ранг групи	Еталонні значення показників		
			X_1	X_2	X_3
1	Граничний	4	85,137	189100	227,83
	Середній		107,65	119650	151,68
	Ідеальний		52,690	189100	227,83
2	Граничний	2	43,285	409600	348,30
	Середній		49,39	297600,5	263,9
	Ідеальний		43,285	409600	348,30
3	Граничний	3	70,543	595700	345,13
	Середній		77,22	307350,67	225,35
	Ідеальний		70,543	595700	345,13
4	Граничний	1	27,898	419000	403,27
	Середній		41,6	373660	333,07
	Ідеальний		27,898	452700	403,27

Аналіз розриву між об'єктами можна здійснювати як з позицій поточного стану справ, так і з позиції тенденції зміни рівня енергоефективності упродовж певного проміжку часу (табл. 7). При цьому, із появою нового лідера, слід враховувати зміну еталону енергоефективності. За результатами оцінювання енергоефективності встановлено: є вугільні шахти, які в своєму класі зберігають певний рівень енергоефективності. Рівень «Краща» зберігають шахти: Червоноградська, Великокомістівська, Бужанська, Шахта №1; «Гірша» - Відродження, Межирічанська, Степова.

Таблиця 7 – Динаміка рангу вугільних шахт

Клас	Вугільна шахта	Ранг					
		2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	Шахта №1	3	2	3	3	3	3
	Шахта №5	2	3	3	1	1	2
	Зарічна	1	1	1	2	1	1
2	Шахта №9	2	2	1	1	1	1
	Візейська	1	1	2	2	2	2
3	Бужанська	3	3	3	3	3	3
	Лісова	2	2	1	3	2	1
	Степова	1	1	2	1	1	2
4	Великокомістівська	4	4	4	3	4	3
	Бендюзька	1	2	5	5	5	0
	Межирічанська	2	1	1	2	2	1
	Відродження	3	3	2	1	1	2
	Червоноградська	5	5	3	4	3	4

Отже, аналіз тенденції зміни рівня енергоефективності дозволяє виявити об'єкти, зусилля яких щодо підвищення ефективності енергоспоживання є недостатніми. Для виявлення причин різниці в енергоефективності та шляхів підвищення її рівня необхідне розуміння заходів, завдяки яким кращі об'єкти досягли успіху. Розширення переліку технологічних параметрів і показників енергоефективності, урахування їх важливості за ступенем впливу на ефективність електроживлення сприятиме результативному аналізу кращих практик і прийняттю рішень щодо підвищення рівня енергоефективності на рівні кожної шахти.

Бенчмаркінг енергоефективності повинен проводитися на регулярній основі для забезпечення безперервності процесу вдосконалення, частиною якого є регулярна перевірка, чи мають ще силу виявлені кращі практики енергоефективності. Це вимагає організації інформаційного забезпечення бенчмаркінгу та автоматизації процедури порівняння.

Для проектування автоматизованих інформаційних систем (ІС) використовують тривірневу схему в складі [12]: орієнтованої на користувача зовнішньої моделі даних – рівень представлення модулів прикладного програмного забезпечення функціональних завдань ІС; концептуальної моделі предметної області ІС - рівень моделей (структур) даних функціональних завдань; фізичної моделі інформаційних масивів даних – рівень бази даних (БД). До складу функціональних елементів-сутностей інформаційної моделі входять: схеми розрахунків; алгоритми обчислення; варіанти розрахунків; результати виконання розрахунків; форми підготовки звітних документів. Всі вхідні та вихідні дані в інформаційній моделі представлені у вигляді блоків даних про [12]: об'єкти; параметри об'єктів; алгоритми розрахунків; результати розраху-

нків; форми звітних документів. В інформаційній моделі поняття «правило» ототожнюється з алгоритмом обчислення параметрів. Результати розрахунків зв'язуються в єдиний масив даних і фіксуються як варіант обчислення, що характеризується розрахунковим періодом, для якого вибрано вихідні дані і до якого належать отримані результати. Для отримання інформації про результати розрахунків використовуються форми звітних документів.

Дотримуючись зазначених принципів для автоматизації процедури бенчмаркінгу енергоефективності вугільних шахт розроблено програмне забезпечення у середовищі *Delphi*. Початковими даними є: кількість критеріїв (показників) та їх назви; кількість об'єктів та їх назви; тривалість ретроспективи; матриця оцінок об'єктів за кожним критерієм (рис. 1). У програмі передбачено можливість ручного введення даних та завантаження даних з файлу, перегляд в графічній формі результатів ранжування та можливість графічного аналізу закономірностей в отриманих результатах.

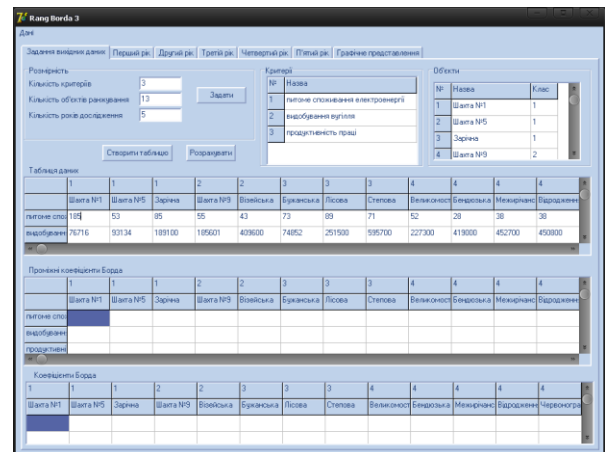


Рисунок 1 – Головне вікно програми

Програма може використовуватися як автономно, так і бути інтегрованою в інформаційну систему енергоменеджменту. Інтерфейс програми передбачає формування довільного набору критеріїв ранжування та врахування їх важливості, що розширює можливості для її застосування як на рівні виробничих об'єднань, так і на рівні окремих підприємств та шахт. При цьому, умовою забезпечення її ефективної роботи є автоматизація процесу збору даних про параметри режимів роботи вугільних шахт. Сучасні тенденції в області управління енергоефективністю відповідно до стандарту ISO 50001 передбачають впровадження автоматизованих систем обліку енергоресурсів, управління технологічними процесами, які є складовою частиною загальної системи моніторингу. Їх наявність спрощує збір даних по кожному з об'єктів. Використання WEB-технологій забезпечить зв'язок між контрольними пунктами об'єктів і центральним сервером, що дозволить здійснити консолідацію даних в єдиній системі та сприятиме організації бенчмаркінгу енергоефективності на постійній основі.

ВИСНОВКИ. Дослідження присвячене розвитку питання організації бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів та демонструє принципи практичної

адаптації методології європейського стандарту EN 16231 до умов виробничих об'єктів. Результати проведених досліджень дозволяють стверджувати:

- для підвищення інформативності результатів процедури бенчмаркінгу, організованої з метою оцінювання рівня енергоефективності та пошуку кращих практик ефективного енергоспоживання, необхідно враховувати інтенсивність виробничого процесу та умови функціонування об'єкту. Множина критеріїв для порівняння об'єктів поряд з показниками енергоефективності повинна містити технологічні параметри. Крім того, їх урахування дає змогу сформулювати групи шахт, які функціонують в подібних умовах, що забезпечує коректний вибір партнерів бенчмаркінгу;

- застосування процедур багатомірного порівняльного аналізу дає змогу виконати позиціонування груп однотипних об'єктів та встановити групу шахт лідерів та групу шахт аутсайдерів за рівнем енергоефективності, а також виконати позиціонування об'єктів в межах кожної групи та встановити лідерів та аутсайдерів в групі (визначити «кращих серед кращих», «гірших серед кращих», «кращих серед гірших» тощо);

- ранжування груп вугільних шахт дає змогу сформувати еталон ефективного електроспоживання як збірний образ кращих практик об'єктів, що входять у групу з вищим рангом, а ранжування шахт в межах групи – встановити більш досяжні еталони для прийняття рішення щодо першочергових заходів, спрямованих на підвищення рівня енергоефективності;

Систематичне визначення різниці в енергоспоживанні та розривів з кращою практикою, реалізація заходів підвищення рівня енергоефективності, моніторинг результатів впровадження і переоцінка результатів бенчмаркінгу повинні стати частиною циклу постійного удосконалення виробничої системи та підвищення рівня її енергоефективності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rosen V. P., Tyshevych B. L., Inshekov E. N., Rosen P. V. Benchmarking methodology for increasing of energy efficiency of industry of Ukraine. *Problemele energeticii regionale*. 2012. 2(19). P. 73–84.
2. Sontag B., Hirzel S., Bender O., Kloos H., Laubach M., Walkötter R., Rohde C. Energy-benchmarking within companies: insights from benchmarking practice. *ECEEE – 2014. Industrial summer*

study – retool for competitive and sustainable industry. 2014. P. 637–646.

3. Yee Shee Tana, Tobias Bestari Tjandraa, Bin Songa. Energy Efficiency Benchmarking Methodology for Mass and High-Mix Low-Volume Productions. *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 29. P. 120–125. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.200

4. Zogla, L., Zogla, G., Beloborodko, A., Rosa, M. Process benchmark for evaluation energy performance in breweries. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 72. P. 202–208. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.029.

5. Євтухова Т. О. Модель управління підвищенням 3-Е ефективності систем комунальної теплоенергетики. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 5/2015 (94). С. 38–43

6. Грядущий Б. А., Чехлатый Н. А., Лобода В. В. Основные принципы и резервы энергосбережения на угольных шахтах отрасли. *Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок*. 2012–2013. Вип. 106–107. С. 4–13.

7. Бедерак Я. С. Про обґрунтування вибору економіко-математичних методів оцінки енергоефективності виробничих об'єктів. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 1. С. 67–72. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.11.

8. Flizikowski J., Bielinski K. Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization. USA: IGI GLOBAL, 2013. 260 p.

9. Гасанов Г. Б. Рейтинговая оценка и регулирование деятельности распределительных электрических сетей в условиях нечеткости. Львов : Львівська політехніка, 2006. 116 с.

10. Давиденко Л. В. Механізм бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем та принципи його реалізації. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2015. № 11. С. 15–20

11. Волинець В. І., Грицюк Ю. В. Класифікація електротехнічних комплексів вугільних шахт за допомогою кластерного аналізу. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка: Технічні науки*. 2017. Вип. 187. С. 46–47

12. Борукаев, З. Х., Остапченко К. Б. Об информационно-аналитической системе мониторинга энергоэффективности производства, передачи и потребления электроэнергии. *Моделирование та інформаційні технології*. 2006. Вип. 37. С. 108–115.

ENERGY EFFICIENCY BENCHMARKING OF COAL MINES ELECTROTECHNICAL COMPLEXES

V. Rosen

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute"
vul. Borschagovska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: auek@ukr.net

L. Davydenko, V. Volynets

Lutsk National Technical University
vul. Lvivska, 75, Lutsk, 43018, Ukraine. E-mail: L.Davydenko033@gmail.com; vvi76@i.ua

V. Davydenko, N. Davydenko

National University of Water and Environmental Engineering
vul. Soborna, 11, Rivne, 33028, Ukraine. E-mail: v.a.davydenko@nuwm.edu.ua; n.v.davydenko@nuwm.edu.ua

Purpose. The purpose of the article is forming principles for determining best practices of the power consumption efficiency among coal mines that will take into consideration the initial conditions for their functioning. The research is devoted to the development of the organization issue of the energy efficiency benchmarking of facilities and demonstrates the principles of practical adaptation of the European standard EN 16231 methodology to the manufacturing fa-

ilities conditions. **Methodology.** The principles of comparative analysis, the objects grade detecting procedure according to the Bord's rule, and the grouping of objects under the functioning conditions have been used for research purposes. **Results.** The position determination of benchmarking partners has been performed on the energy performance. Specific power consumption, coal output and production have been used as indicators for grade detecting. Energy performance standards of a coal mine: better, medium, ideal, have been formed based on comparative analysis of energy performance indicators. Herewith it has been taken into consideration the nature of the indicator: whether it has a positive influence on energy efficiency, or a negative. Among the partners of benchmarking, leaders and outsiders have been identified, the magnitude of the deviation of the object indicators from the energy performance standard has been determined and the gap has been identified. The position determination of the same type groups on conditions of mines functioning, as well as mines within groups have been accomplished. Energy performance standards within each group have been formed. **Originality.** A new solution to the problem of objects comparative analysis with the consideration of features and conditions of their functioning has been proposed. It is based on the grade detecting of the formed groups of the same type objects. This has been allowed establishing the best practices of energy use efficiency among benchmarking partners. **Practical value.** The use of the proposed principles of comparative analysis allows identifying the best energy efficiency practices and establishing of achievable reference points for the energy performance improvement of coal mines operating under certain conditions. This is important for the organization of information support of the enterprise energy management system. References 12, tables 7.

Key words: coal mine, benchmarking, grade detecting, Bord's rule, energy performance standard.

REFERENCES

- Rosen, V. P., Tyshevych, B. L., Inshekov, E. N., Rosen, P. V. (2012), «Benchmarking methodology for increasing of energy efficiency of industry of Ukraine», *Problems of Regional Energetics*, No. 2(19), pp. 73-84.
- Sontag, B., Hirzel, S., Bender, O., Kloos, H., Laubach, M., Wallkötter, R., Rohde, C. (2014), «Energy-benchmarking within companies: insights from benchmarking practice», *ECEEE – 2014. Industrial summer study – retool for competitive and sustainable industry*, pp. 637-646.
- Yee, Shee, Tana, Tobias, Bestari, Tjandraa, Bin, Songa (2015), «Energy Efficiency Benchmarking Methodology for Mass and High-Mix Low-Volume Productions», *Procedia CIRP*, Vol. 29, pp. 120-125, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.200.
- Zogla, L., Zogla, G., Beloborodko, A., Rosa, M. (2015), «Process benchmark for evaluation energy performance in breweries», *Energy Procedia*, Vol. 72, pp. 202-208, doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.029.
- Yevtukhova, T. O. (2015), «Model of improving the 3-e efficiency of communal heating energy systems», *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, issue 5, no. 94, pp. 38-43.
- Griadushchyi, V. A., Chekhlatyi, N. A., Loboda, V. V. (2012-2013), «Basic principles and reserves of energy saving in the coal mines of the industry», *Problems of operation of equipment of mine stationary installations*, Vol. 106–107, pp. 4–13.
- Bederak, Ya. S. (2017), «On substantiation of selection of economic and mathematical methods for the assessment of energy efficiency of production facilities», *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp.67-72, doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.11.
- Flizikowski, J., Bielinski, K. (2013), *Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization*, IGI GLOBAL, USA.
- Gasanov, H. B. (2006), *Reitingovaia otsenka I regulirovanie deiatelnosti raspredelitelnykh elektricheskikh setei v usloviakh nechetkosti* [Rating evaluation and regulation of the activity of distribution electric grids in conditions of fuzziness], Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.
- Davydenko, L. V. (2015), «Energy efficiency benchmarking mechanism of complex production systems objects and the principles of its realization», *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, no. 11, pp. 15-20.
- Volynets, V. I., Hrytsiuk, Yu. V. (2017), «Classification of electrical engineering complexes of coal mines by means of cluster analysis», *Transactions of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture. Technical Sciences*, vol. 187, pp. 46-47.
- Borukaev, Z. H., Ostapchenko, K. B. (2006), «About the information-analytical system of energy efficiency monitoring of production, transmission and consumption of electric power», *Modeling and Information Technology*, No. 37, pp. 108-115.

Стаття надійшла 16.05.2019.