

ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ ЯК ЗАПОРУКИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

Металургійне виробництво є надзвичайно енергоємним. На нього припадає друга за величиною частка енергоспоживання та найбільша частка викидів CO₂. Крім цього, металургійна галузь України в воєнний час стикнулася і з іншими труднощами. Тому, щоб бути конкурентноздатними на міжнародному ринку металургійні підприємства України мають сфокусувати свою увагу на енергоефективності та декарбонізації виробництва. Щоб ця діяльність мала цілеспрямований характер, окремі підприємства та галузь в цілому мають розробити відповідну стратегію. Один з можливих підходів до вирішення цього питання присвячена ця стаття. Поряд з описом математичної моделі формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв в статті наведено структуру витрат енергоресурсів, а також суттєві споживачі енергоресурсів на металургійних підприємствах. Крім того, окреме місце в статті приділено питанню побудови базового рівня енергоспоживання з урахуванням положень найсучасніших міжнародних стандартів у сфері енергоменеджменту, а також наведено основні чинники, що впливають на енергоспоживання. В роботі також наведено основні заходи з підвищення енергоефективності для кожної групи суттєвих споживачів енергоресурсів.

Ключові слова: базовий рівень енергоспоживання, декарбонізація, енергоефективність, металургійне підприємство, оптимальна стратегія, підвищення енергоефективності, система енергоменеджменту.

Вступ

На сучасному етапі розвитку цивілізації прогрес науки і технологій у базових галузях економіки відіграє ключову роль у забезпеченні національної безпеки країни. Для України однією з таких базових галузей є чорна металургія, що забезпечує 27 % обсягу товарного виробництва промисловості та 40 % валових надходжень [1]. Україна має унікальні можливості для розвитку чорної металургії, володіючи одними з найбільших у світі запасами залізної руди.

За даними Офісу з розвитку підприємства та експорту [2] у 2021 році найвищий обсяг експорту України має продукція металургії. За результатами року об'єм експорту недорогоцінних металів та виробів з них склав 15,98 млрд доларів США, що на 77% більше, ніж у 2020 році. При цьому, за даними World Steel Association [3] Україна посіла 14-те місце у глобальному рейтингу виробників сталі виробивши протягом 2021 року 21,4 млн т сталі, 21,2 млн т чавуну та 19 млн т прокату.

Такі тенденції зберігались і у довоєнний період. Так за перші два місяці 2022 року обсяг експорту металургійних підприємств збільшилась майже на 35%, у порівнянні з аналогічним періодом 2021 року. Наразі спостерігається значне скорочення виробництва у металургійному секторі. За даними [4] перші півроку 2022 виробництво металургійних підприємств становить близько 50% від аналогічного періоду 2021 року. Експорт залізної руди скоротився на 33%, до аналогічного періоду 2021 року, експорт чавуну на 50%, а експорт напівфабрикатів на 45%. Значна частина підприємств через близьке розташування до бойових дій тимчасово зупинили свою роботу з огляду на безпеку або припинили повністю роботу через окупацію та значні пошкодження («Азовсталь» та «ММК ім. Ілліча»). За даними компаній «Азовсталь» в 2021 році випустив 4,1 млн т загального прокату, 4,34 млн т сталі, 3,8 млн т чавуну, а «ММК ім. Ілліча» – 4,1 млн т, 4,26 млн т та 5,06 млн т, відповідно.

Слід зазначити, що у світі виробництво чавуну та сталі є надзвичайно енергоємним процесом, що спричиняє 7-9% прямих викидів CO₂ від глобального використання викопного палива. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) [5] серед галузей важкої промисловості на виробництво чавуну та сталі припадає друга за величиною частка споживання енергії та найбільше джерело викидів CO₂. Використання енергії на виробництво 1 т сталі хоч і знизилася за останні 50 років на 60%, але не може бути повністю припинене внаслідок того, що метал - матеріальна субстанція, він не виробляється «з повітря» і «за допомогою повітря». Тому необхідні цілеспрямовані заходи щодо підвищення енергоефективності та забезпечення вищої ефективності технологічного обладнання для стримування зростання споживання енергії та викидів CO₂ у цій галузі.

Однак, згідно з [6], World Steel Association звернула увагу не тільки на обсяги викидів CO₂ та споживання енергії, але і на здатність металу бути постійним матеріалом у циркулярній економіці та можливість металургії підтримувати циркулярну економіку шляхом просування 4R-підходу (Reduce - Reuse - Remanufacture - Recycle). Як відомо, сталь може повністю перероблятися з одного виробу в інший. Переробка економить як природні ресурси, так і енергію, і чим більше сталі переробляється, тим більше зберігається довкілля. Також виробництво металу з брухту потребує лише близько третини енергії, необхідної для виробництва сталі із залізної руди.

Тому, одним з актуальних напрямків можливого забезпечення українських металургійних підприємств сировиною може стати використання знищеної військової техніки, якої наразі вдосталь розкидано по полях України. Наразі Українська асоціація вторинних металів («УАВтормет») вивчає світового досвіду для переробки військової техніки на металобрухт [7]. Експерти металургійної сфери підрахували, що вся знищена техніка збройних сил Росії важить понад 75 тис. т, проте переплавити на метал можна далеко не все. Через вигоряння метал може стати некондиційним та непридатним для переплавлення. Окрім цього, частину техніки беруть на деталі або передають до складу української армії.

Тому, зважаючи на актуальність питання екологічності та енергоефективності металургійних виробництв, слід приділити увагу розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня їх енергоефективності та декарбонізації, оскільки це безпосередньо впливає на собівартість продукції та обсяг викидів CO₂.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв. Для досягнення цієї мети в роботі поставлено та вирішено такі задачі:

1. Оцінити структуру витрат енергоресурсів в енергетичному балансі металургійних підприємствах, а також визначити суттєві напрямки енерговикористання.
2. Встановити показники енергоефективності як на рівні окремих суттєвих напрямків енерговикористання, так і на рівні всього металургійного підприємства, а також визначити чинники, що впливають на ці показники з урахуванням положень сучасних міжнародних стандартів у сфері системи енергетичного менеджменту (ISO 50001, ISO 50006, ISO 50047).
3. Навести перелік типових заходів щодо підвищення рівня енергоефективності металургійних підприємств для кожного суттєвого напрямку енерговикористання.
4. Розробити математичну модель формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв з урахуванням рівня суттєвості енерговикористання.

Аналіз літературних джерел. Результати досліджень, викладених в [8], показали, що збільшення виробництва сирової сталі є найважливішим фактором, який призводить до суттєвого збільшення загального споживання енергії та викидів в навколишнє середовище в металургійній промисловості. На противагу цьому, підвищення рівня енергоефективності є найбільш керованими чинником, який може впливати як на енергоспоживання, так і на викиди CO₂ в металургійному виробництві, а зміна клімату та зростання цін на енергоносії ще більше підвищують їх значення.

Для боротьби з викидами CO₂ в металургійному виробництві, а також для підвищення рівня його енергоефективності, за ініціативи Комісії ЄС із залученням Європейського бюро з комплексного запобігання та контролю забруднення та Інституту перспективних технологічних досліджень було розроблено Довідковий документ з найкращих доступних технологій (НТД) для виробництва чавуну та сталі [9]. В даному документі, окрім іншого, визначено ключові проблеми довкілля для галузі, вивчено методи, які є найбільш відповідними для вирішення цих ключових питань. Крім того, в документі визначено найкращі рівні екологічної ефективності на основі наявних даних у Європейському Союзі та в усьому світі, а також вивчено умови, за яких може бути досягнуто цих рівнів екологічної ефективності.

Протягом останніх десятиліть металургійна промисловість значно скоротила викиди парникових газів, підвищивши рівень енергоефективності та впровадивши нові технології та заходи, що принесли користь навколишньому середовищу та економіці. Тому, Міжнародна асоціація сталі [10] вважає, що зменшення викидів парникових газів є глобальним викликом, який потребує глобального вирішення.

Задля цього в публікаціях [11 - 14] розглянуто з різним рівнем деталізації заходи з енергоефективності, які можуть застосовуватись на металургійних підприємствах а також ті заходи, що пов'язані з реалізацією НТД металургійних виробництв.

Поряд з цим, у жовтні 2020 року МЕА оприлюднило дорожню карту щодо пріоритетних технологій виробництва чавуну та сталі [15]. У цьому звіті наводяться технології та стратегії, необхідні для металургійної галузі, щоб рухатися по шляху, сумісному з більш ширшим баченням МЕА щодо сталого енергетичного розвитку галузі. Під час формування пріоритетних технологій враховувались як виклики, так і можливості, а також ключові технології та процеси, які дозволять суттєво скоротити викиди CO₂ у металургійній галузі. Також, у звіті приділено увагу оцінці потенціалу енергоефективності, включаючи збільшення використання вторинних енергоресурсів, а також скорочення попиту на енергію. У цьому

документі аналізуються впливи та компроміси різних технологічних рішень та політичних цілей для галузі, щоб відповідати цілям Паризької угоди. МЕА стверджує, що сталь є життєво важливою для сучасної економіки, і зазначає, що підтримання прогнозованого зростання попиту на сталь при одночасному зменшенні викидів CO₂ створює величезні проблеми. Хоча підвищення енергоефективності допоможе галузі, однак існує потреба в подальшому розвитку та розгортанні широкого портфеля проривних технологічних варіантів та інфраструктури, що дозволяє досягти довгострокового глибокого скорочення викидів CO₂.

Одним з таких напрямків розвитку галузі може бути запровадження смарт-технологій на підприємствах галузі. Незважаючи на стратегічний характер даної галузі для національної економіки цей процес в Україні перебуває на початковому етапі. Тому, автори роботи [6] впевнені, що майбутній розвиток галузі в контексті Industrie 4.0 має великий потенціал у частині оптимізації виробничого процесу і передбачає самостійний обмін даними між «розумними» машинами, складськими системами і технологічним обладнанням.

Все описане вище вказує на необхідність розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв.

Матеріал і результати досліджень

Для вирішення завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв пропонується скористатись рекомендаціями, викладеними в ДСТУ ISO 50006 [16] та ДСТУ ISO 50047 [17].

Перш за все треба визначитись який підхід буде обрано для формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації. Це може бути підхід на основі цілей підприємства, або на основі запланованих заходів з енергоефективності. В першому випадку підприємство має встановити на певний період часу собі конкретну мету щодо підвищення енергоефективності та декарбонізації, яку планується досягти на завершення цього періоду. При цьому мета має встановлюватись з урахуванням критеріїв SMART (Specific (конкретна) – Measurable (вимірювана) – Achievable (досяжна) – Realistic (реалістична) – Timed (обмежена в часі)). Тобто має бути встановлено певні числові значення показників підвищення рівня енергоефективності та зниження рівня декарбонізації. В якості таких показників можуть застосовуватись: вимірне абсолютне значення енергоспоживання, питома значення енергоспоживання, статистична та проектна моделі енергоспоживання [16]. Більш детально з особливостями застосування тих чи інших показників енергоефективності можна ознайомитись в [18 - 20].

Для другого підходу підприємство має сформулювати набір заходів з енергоефективності, які будуть вважатись доцільними для реалізації в існуючих умовах діяльності підприємства. В якості таких заходів з підвищення енергоефективності можуть бути, наприклад [11]:

-*Виробництво чавуну в доменних печах:* вдування пиловугільного палива (середнього та високого рівня), застосування пароводяної конверсії природного газу в доменному виробництві, автоматика печі гарячого дуття, рекуператор на дуття.

-*Виробництво сталі:* застосування конвертерного газу і рекуперация тепла, регулятори швидкості приводів вентиляторів, виплавка сталі завдяки продувці рідкого чавуну киснем в конвертерах (хімічні реакції при цьому супроводжуються виділенням тепла) або за допомогою електричної дуги в дугових печах.

-*Загальні заходи:* профілактичне технічне обслуговування, системи енергетичного моніторингу та управління, частотні електроприводи регулювання швидкості димових газів, насоси та вентилятори, когенерація.

Крім заходів з енергоефективності, перелічених вище, на металургійних підприємствах також можуть застосовуватись і інші заходи, пов'язані з реалізацією НТД металургійних виробництв. Більш детально з характеристикою цих заходів можна ознайомитись, наприклад, в публікаціях [12 - 15].

В цьому випадку завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв по суті можна розглядати як забезпечення мінімального (економічно обґрунтованого) енергоспоживання металургійним підприємством задля підвищення рівня енергоефективності підприємства та скорочення викидів CO₂ з урахуванням існуючих обмежень на фінансові, матеріально-технічні та трудові ресурси. У формальній математичній постановці це завдання може бути представлено наступною математичною моделлю:

цільова функція

$$Z = f(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k (E_{\text{баз}j} - \sum_{i=1}^m e_{ij} \cdot x_{ij}) \rightarrow \min, (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}) \quad (1)$$

обмеження на фінансові ресурси

$$\phi_1(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m s_{ij} \cdot x_{ij} \leq S_0 \quad (2)$$

обмеження на матеріально-технічні ресурси

$$\phi_2(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m r_{ij} \cdot x_{ij} \leq R_0 \quad (3)$$

обмеження на трудові ресурси

$$\phi_3(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m t_{ij} \cdot x_{ij} \leq T_0 \quad (4)$$

обмеження на змінні

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

обмеження на коефіцієнти

$$0 \leq s_{ij} \leq S_0, \quad 0 \leq t_{ij} \leq T_0, \quad 0 \leq r_{ij} \leq R_0, \quad (6)$$

де Z - цільова функція, що визначає величину енергоспоживання металургійним підприємством при реалізації певної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації;

$E_{\text{баз}j}$ - базовий рівень енергоспоживання на j -му об'єкті енергоспоживання металургійного підприємства;

i - номер заходу з енергоефективності, який планується до реалізації в певній стратегії, $i = \overline{1, m}$;

j - номер об'єкта енергоспоживання, де планується до реалізації певний i -ий захід, $j = \overline{1, k}$;

x_{ij} - двійкова змінна, що приймає значення «1» у разі, якщо певний i -ий захід приймається до впровадження, і «0» - в іншому випадку;

e_{ij} - обсяг енергозбереження, який планується отримувати від реалізації i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання;

s_{ij} - витрати фінансових ресурсів на реалізацію i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання;

r_{ij} - витрати матеріально-технічних та енергетичних ресурсів всіх видів на реалізацію i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання;

t_{ij} - трудовитрати на реалізацію i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання.

За основу наведеної вище математичної моделі, було обрано математичну модель, запропоновано в [21]. Однак, в неї було внесено відповідні зміни з урахуванням положень стандарту ДСТУ ISO 50047 [17].

Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв (1)-(6) зводиться до прямого перебору всіх можливих комбінацій заходів, що технічно реалізуються, запропонованих за результатами проведення внутрішнього або зовнішнього енергоаудиту підприємства.

При прямому переборі різних комбінацій запропонованих для впровадження заходів можуть виникнути технічно несумісні заходи. Тому математичну модель (1)-(6) необхідно доповнити системою обмежень на допустимі поєднання заходів:

$$\sum_{i \in R_q} x_{ij} \leq 1, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (7)$$

де R_q - безліч індексів заходів, що становлять q неприпустиме поєднання;

Q - загальна кількість неприпустимих поєднань заходів.

Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв полягає у відшуканні невідомих x_{ij} ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$), таких, щоб значення цільової функції (1) було мінімальним при виконанні обмежень (2)-(7).

Описана модель відноситься до класу завдань лінійного програмування зі змінними, частина яких є булевими. У реальних ситуаціях, коли кількість заходів коливається в межах 10-20, при формуванні оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв вирішення цієї задачі можна здійснити за допомогою методу повного (прямого) перебору варіантів з використанням ЕОМ. При цьому кількість комбінацій заходів перебуватиме в межах 100000-150000, перебір яких не становить труднощів для сучасних ЕОМ.

Під час формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв на основі наведеної вище моделі слід враховувати вплив непрямих енергетичних ефектів, які можуть виникнути, якщо зменшення енергоспоживання внаслідок реалізації i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання призводить до збільшення енергоспоживання енергії на інших об'єктах енергоспоживання.

Також, слід уникати ефектів подвійного підрахунку обсягу енергозбереження, які можуть виникати, якщо заходи з енергоефективності в одній частині системи енерговикористання зменшує загальну енергопотребу від інших заходів, вжитих в іншій частині системи. У таких випадках загальний очікуваний обсяг енергозбереження буде меншим, ніж сума обсягів енергозбереження, яка мала б бути, якщо б кожний захід було вжито окремо. Щоб уникнути подвійного підрахунку, можна зробити такі кроки, як це описано в ДСТУ ISO 50047 [19].

Якщо не існує адекватного способу уникнути подвійного підрахунку, то підсумовування неминучого подвійного підрахунку слід віднімати після підсумовування обсягів енергозбереження від всіх заходів.

Також, не завжди є економічно доцільним визначення обсягу енергозбереження від кожного i -го заходу на j -му об'єкті енергоспоживання (наприклад, якщо ці об'єкти подібні або їх частка енергоспоживання в загальному енергобалансі підприємства є несуттєвою). У таких випадках обсяг енергозбереження можна визначити на основі репрезентативної вибірки. Якщо дані з отриманої вибірки є

репрезентативними, то обсяг енергозбереження може бути екстрапольовано для отримання загального обсягу енергозбереження.

Для застосування наведених вище підходів необхідно обрати період часу, за який буде визначатись обсяг енергозбереження, встановити базовий рівень енергоспоживання, а також визначити обсяг енергозбереження.

Що стосується періоду часу, то доцільно його приймати рівним періоду дії базового рівня енергоспоживання. Цей період має відображати всі режими роботи об'єкта енергоспоживання і повинен охоплювати повний робочий або виробничий цикл від максимального споживання енергії до мінімуму на основі спостережуваних даних.

Для металургійних підприємств зазвичай доцільно використовувати тривалість такого періоду один рік. Однак, в окремих випадках, відповідно до рекомендацій ДСТУ ISO 50047 [19], цей період може бути:

- а) **менше одного року**, якщо споживання енергії носить сезонний характер;
- б) **більше одного року**: більш тривалі періоди часу, що перевищують один рік, можуть бути придатними, якщо не існує жодного року, який вважається типовим.

Далі треба вирішити питання визначення базового рівня енергоспоживання.

Якщо застосовано підхід на основі цілей підприємства, то можна використовувати єдиний базовий рівень енергоспоживання, що вимірює споживання енергії на рівні всього підприємства. Це дає змогу визначати обсяг енергозбереження від всієї сукупності заходів з енергоефективності разом. Якщо підприємство розділено на декілька виробничих майданчиків, то доцільно визначати базовий рівень енергоспоживання окремо для кожного виробничого майданчика.

Якщо підприємство під час формування своєї стратегії буде базуватись на основі запропонованих до реалізації заходів з енергоефективності, тоді необхідно встановлювати базовий рівень енергоспоживання окремо на кожному j -му об'єкті енергоспоживання металургійного підприємства, де планується реалізація i -го заходу. При цьому, базовий рівень енергоспоживання можна визначити використовуючи або фіксований період часу (зазвичай репрезентативний рік) або середнє значення за декілька періодів (якщо окремий період не є репрезентативним).

Протягом базового періоду на енергоспоживання можуть впливати визначальні змінні та статичні чинники. Для врахування змін у визначальних змінних застосовують унормування. Унормування застосовують так, щоб вплив аномальних значень визначальних змінних можна було вилучити з енергоспоживання для порівняння між базовим періодом та звітними періодами реалізації заходів з енергоефективності.

Для встановлення базового рівня енергоспоживання пропонується використовувати математичну модель лінійної регресії, яка має вигляд:

$$E = E_{b0} + b_1 v_1 + \dots + b_n v_n, \quad (8)$$

де $v_1, v_2 \dots v_n$ – визначальні змінні;

E_{b0} – енергоспоживання в базисній частині графіка навантаження або енергоспоживання, яке не пов'язане з визначальною змінною.

Розроблення моделі часто вимагає статистичного тестування (наприклад, за критерієм p -значення) і скринінгу для визначення того, які змінні треба враховувати.

Детально опис порядку визначення чинників, що впливають на енергоспоживання, описано в ДСТУ ISO 50047 [19] та в роботах [22, 23].

Для того, щоб модель відповідала споживанню енергії, мають використовуватися дані передісторії, які відображають типовий режим роботи підприємства. У більшості випадків в моделі застосовують помісячні дані (за 12 місяців), щоб забезпечити відображення сезонних коливань.

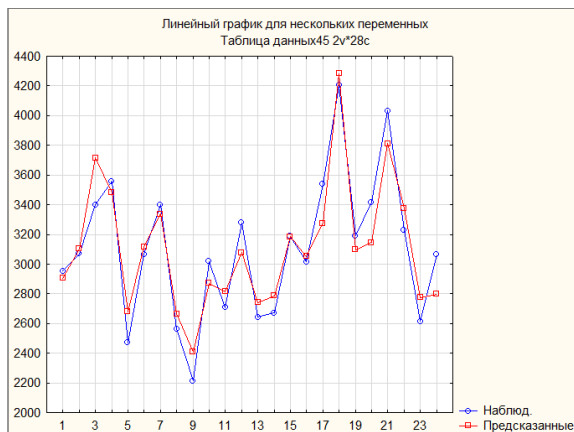
Однак, модель на основі регресійного аналізу може не працювати належним чином для нерегулярних періодів енергоспоживання. У випадку даних за місяць проблема календарної невідповідності виникає з таких причин:

- місяці різної тривалості, залежно від місяця і того, чи є цей рік високосним;
- тижні не співпадають точно з місяцями.

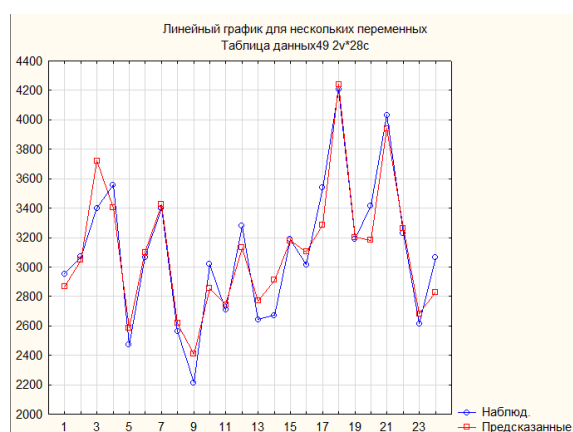
Дані, зібрані з більш частими інтервалами («інтервальні дані»), можуть допомогти підвищити точність моделі. Також, можна підвищити точність величини енергоспоживання, визначеного за допомогою регресійного аналізу, використовуючи добове або погодинне споживання енергії, добові обсяги виробництва та градусо-доби. Нижче показано, як приклад, результати застосування регресійної моделі прогнозування погодинного електроспоживання цеху металургійного виробництва (див. рис.).

Оцінку точності моделей було виконано за допомогою середньо-квадратичної (RMSE) та відносної δ (%) похибки прогнозу відносно фактичних значень.

Регресійний аналіз для побудови відповідних математичних моделей можна виконувати як із залученням надбудови «Аналіз даних» в MS Excel, так і з залученням інших програмних продуктів для виконання статистичного аналізу даних (наприклад, STATISTICA).



а)



б)

Рисунок - Результати застосування регресійної моделі прогнозування погодинного електроспоживання цеху металургійного виробництва: а) - стандартна процедура; б) покрокова процедура.

Також, для цих потреб можуть залучатись спеціалізовані надбудови в MS Excel, які вже розроблені для побудови саме регресійних моделей енергоспоживання та визначення показників енергоефективності. Сюди можна, наприклад, віднести інструменти енергоменеджера, представлені на сайті Міненерго США [22] Energy Performance Indicator (EnPI), Manufacturing Energy Assessment Software for Utility Reduction (MEASUR), а також Energy Bill Tracker Tool - Energy Performance Indicators, запропонований SEAI [23]. Також для нашого завдання може бути цікавим для застосування інструмент «Decarbonization Action Plan Tool», який доступний для вільному використанню на сайті Міненерго США [22].

Крім моделей на основі регресійного аналізу, можуть застосовуватись і інші математичні методи та моделі прогнозування. Наприклад, метод простого експоненційного згладжування, моделі, що включають сезонну компоненту і тренд, нейронні мережі тощо.

Висновки.

1. Результати аналізу існуючої ситуації металургійній галузі України, показали, що збільшення виробництва сирової сталі є найважливішим чинником, який призводить до суттєвого збільшення загального споживання енергії та викидів в навколишнє середовище в металургійній промисловості. Для оптимальної реалізації наявного потенціалу енергозбереження та скорочення викидів CO₂ необхідно планувати цю діяльність на рівні окремих підприємств.

2. Запропоновано методичний підхід щодо формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв, в якому, поряд з описом математичної моделі, приділено питанню побудови базового рівня енергоспоживання з урахуванням положень найсучасніших міжнародних стандартів у сфері енергоменеджменту, а також чинників, що впливають на енергоспоживання.

3. Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв зводиться до прямого перебору всіх можливих комбінацій заходів щодо підвищення енергоефективності, запропонованих за результатами проведення енергетичного аудиту підприємства. Використання запропонованого підходу дає можливість мати ефективний інструмент розробки управлінських рішень щодо планування підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв. З його допомогою можуть бути змодельовані різні варіанти стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації, що забезпечують найбільше економічно обґрунтоване використання наявного потенціалу енергозбереження та скорочення викидів CO₂ та обранні найбільш ефективної з них.

Список використаної літератури

1. Большаков В. І. Чорна металургія і національна безпека України / В. І. Большаков, Л. Г. Тубольцев // Вісник НАН України. – 2014. – № 9. – С. 48-58.
2. Найвищий обсяг експорту України у 2021 році - продукція металургії та аграрного сектору: [електронний ресурс]: Сайт Офісу з розвитку підприємництва та експорту. – режим доступу: https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii_obsyag_eksportu_ukraini_u_2021_rotsi_-_produktsiia_metalurgii_ta_agrarnogo_sektoru. – Назва з екрана.

3. December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals: [електронний ресурс]: Сайт The World Steel Association (worldsteel). – режим доступу: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>. – Назва з екрана.
4. Стан української металургії під час війни: [електронний ресурс]. – режим доступу: <https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/22-06-22-3/>. – Назва з екрана.
5. IEA (2021), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>.
6. Амоша О.І., Нікіфорова В.А. Розвиток металургійної смарт-промисловості в Україні: передумови, проблеми, особливості, наслідки: науково-аналітична доповідь; НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2019. - 67 с.
7. Українські бруктозаготівельники готуються до перероблення військової техніки: [електронний ресурс]: – режим доступу: <https://gmk.center.ua/news/ukrainski-brukhtozahotivelniky-hotuutsia-dopereroblennia-vijskovo-tehniky/>. – Назва з екрана.
8. Sun, Wenqiang & Wang, Qiang & Zhou, Yue & Wu, Jianzhong. (2020). Material and Energy Flows of the Iron and Steel Industry: Status Quo, Challenges and Perspectives. Applied Energy. 268. 114946. 10.1016/j.apenergy.2020.114946. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030458X> (accessed on 20 May 2022).
9. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Remus, R., Roudier, S., Delgado Sancho, L., et al., Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control, Publications Office, 2013, Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/97469> (accessed on 20 May 2022).
10. World Steel Association. Steel's Contribution to A Low Carbon Future and Climate Resilient Societies—World Steel Position Paper; World Steel Association: Brussels, Belgium, 2020; ISBN 978-2-930069-83-8. Available online: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf (accessed on 20 May 2022).
11. Hargroves, K., Gockowiak, K., McKeague, F., and Desha, C. (2014) An Overview of Energy Efficiency Opportunities in Mining and Metallurgy Engineering, The University of Adelaide and Queensland University of Technology (The Natural Edge Project), commissioned by the Australian Government Department of Industry, Canberra.
12. Remus R, Aguado Monsonet M, Roudier S, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for: Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 25521 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2012. JRC69967.
13. Holappa, L. (2020). A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry. Metals, 10(9), 1-20. [1117]. <https://doi.org/10.3390/met10091117>.
14. Flues, Florens, Dirk Rübhelke and Stefan Vögele (2013), Energy Efficiency and Industrial Output: The Case of the Iron and Steel Industry, ZEW Discussion Paper No. 13-101, Mannheim. Available online: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13101.pdf> (accessed on 20 May 2022).
15. IEA, Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. (accessed on 20 May 2022).
16. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення і настанова»: ISO 50006:2014, IDT — ДСТУ ISO 50006:2016. — [Чинний від 2016-04-29]. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 56 с. — (Національні стандарти України).
17. Енергозбереження. Визначення обсягів енергозбереження в організаціях: ISO 50047:2016, IDT - ДСТУ ISO 50047:2020. [Чинний від 2020-09-15]. — К.: ДП УкрНДНЦ, 2020. — 37 с. — (Національні стандарти України).
18. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств/ А. Чернявський, А. Сафьянц, Н. Усенко, О. Соловей, О. Бориченко, П. Пертко, Ю. Шишко, А. Гоєнко// За загальною редакцією Н. Усенко та А. Чернявського. – К.: Проект «Консультування підприємств щодо енергоефективності» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH за дорученням Федерального міністерства економічного співробітництва та розвитку Німеччини (BMZ), 2020. – 280 с.
19. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018/ А. Чернявський, Є. Іншеков, О. Соловей, О. Бориченко, П. Пертко // За загальною редакцією Є. Іншекова, А. Чернявського. - К.: Проект UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», 2021. – 137 с.
20. Fazeli, Alireza & Bakhtvar, Farzaneh & Jahanshaloo, Leila & Che Sidik, Nor Azwadi. (2014). Efficiency benchmarking of the iron and steel industry via the benchmark curve: A review. Advanced Review on Scientific Research. 2. 19-40.

21. Планирование оптимального использования потенциала энергосбережения промышленных предприятий Украины / В.П. Розен, А.И. Соловей, А.В. Чернявский, М.А. Казмирук // Технічна електродинаміка. 2006. №5. – С.59-68.

22. Software Tools: Website of US Department of Energy: URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/software-tools>.

23. Website of Ireland's national sustainable energy authority: URL: <https://www.seai.ie/tools/>.

V. Nakhodov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965
O. Borychenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6127-2945
A. Cherniavskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2858-8224
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

FORMATION OF A STRATEGY FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF METALLURGICAL ENTERPRISES AS GUARANTEE OF DECARBONIZATION OF THE UKRAINIAN ECONOMY

The metallurgical industry of Ukraine in wartime faced significant difficulties in its functioning. However, at the moment there is a gradual recovery of the industry. It should be noted that steel production is an extremely energy-intensive process, accounting for the second largest share of energy consumption and the largest share of CO₂ emissions. Therefore, in order to control the growth of energy consumption and CO₂ emissions in this industry, as well as to be competitive in the international market, Ukrainian metallurgical enterprises should not only expect maximum assistance from the government bodies and international partners in matters of logistics and sales markets, but also focus on energy efficiency issues and decarbonization of their production. While improving the energy efficiency of steel production through the introduction of standard energy efficiency measures will help the industry, there is a need to further develop and deploy a wide portfolio of breakthrough solutions to improve processes and infrastructure. This will achieve long-term deep reductions in CO₂ emissions. For this activity to be purposeful rather than chaotic, individual enterprises and the industry must develop a strategy to increase energy efficiency and decarbonize their production. This article is devoted to one of the possible approaches to solving this issue. Along with a description of the mathematical model for the formation of an optimal strategy for improving energy efficiency and decarbonization of metallurgical industries, the article presents the structure of energy costs, as well as the list of significant energy usages at metallurgical enterprises. In addition, a separate place in the article is given to the issue of building an energy baseline, taking into account the provisions of modern international standards in the field of energy management system (ISO 50001, ISO 50006, ISO 50047), as well as the main factors affecting energy consumption. The paper also presents the list of typical measures for improving the energy efficiency of metallurgical enterprises for each group of significant energy usages.

Keywords: decarbonization, energy baseline, energy efficiency, energy efficiency improvements, energy management system, metallurgical enterprise, optimal strategy.

References

1. Bolshakov V. I. Chorna metalurhiia i natsionalna bezpeka Ukrainy / V. I. Bolshakov, L. H. Tuboltsev // Visnyk NAN Ukrainy. – 2014. – № 9. – S. 48-58.
2. Naivyshchyi obsiah eksportu Ukrainy u 2021 rotsi - produktsiia metalurhii ta aharnoho sektoru: [elektronnyi resurs]: Sait Ofisu z rozvytku pidpriemnytstva ta eksportu. – rezhym dostupu: https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii_obsiah_eksportu_ukraini_u_2021_rotsi_-_produktsiia_metalurgii_ta_agrarnogo_sektoru. – Nazva z ekrana.
3. December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals: [електронний ресурс]: Сайт The World Steel Association (worldsteel). – режим доступу: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>. – Назва з екрана.
4. Stan ukrainskoi metalurhii pid chas viiny: [elektronnyi resurs]. – rezhym dostupu: <https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/22-06-22-3/>. – Nazva z ekrana.
5. IEA (2021), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>.
6. Amosha O.I., Nikiforova V.A. Rozvytok metalurhiinoi smart-promyslovosti v Ukraini: peredumovy, problemy, osoblyvosti, naslidky: naukovo-analitychna dopovid; NAN Ukrainy, In-t ekonomiky prom-sti. Kyiv, 2019. - 67 c.

7. Ukrainski brukhtozahotivelnky hotuiutsia do pereroblennia viiskovoi tekhniky: [elektronnyi resurs]: – rezhyim dostupu: <https://gmk.center/ua/news/ukrainski-brukhtozahotivelnky-hotuiutsia-do-pereroblennia-viiskovoi-tekhniky/>. – Nazva z ekrana.
8. Sun, Wenqiang & Wang, Qiang & Zhou, Yue & Wu, Jianzhong. (2020). Material and Energy Flows of the Iron and Steel Industry: Status Quo, Challenges and Perspectives. *Applied Energy*. 268. 114946. 10.1016/j.apenergy.2020.114946. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030458X> (accessed on 20 May 2022).
9. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Remus, R., Roudier, S., Delgado Sancho, L., et al., Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control, Publications Office, 2013, Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/97469> (accessed on 20 May 2022).
10. World Steel Association. Steel's Contribution to A Low Carbon Future and Climate Resilient Societies—World Steel Position Paper; World Steel Association: Brussels, Belgium, 2020; ISBN 978-2-930069-83-8. Available online: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf (accessed on 20 May 2022).
11. Hargroves, K., Gockowiak, K., McKeague, F., and Desha, C. (2014) An Overview of Energy Efficiency Opportunities in Mining and Metallurgy Engineering, The University of Adelaide and Queensland University of Technology (The Natural Edge Project), commissioned by the Australian Government Department of Industry, Canberra.
12. Remus R, Aguado Monsonet M, Roudier S, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document: for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 25521 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2012. JRC69967.
13. Holappa, L. (2020). A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry. *Metals*, 10(9), 1-20. [1117]. <https://doi.org/10.3390/met10091117>.
14. Flues, Florens, Dirk Rübhelke and Stefan Vögele (2013), Energy Efficiency and Industrial Output: The Case of the Iron and Steel Industry, ZEW Discussion Paper No. 13-101, Mannheim. Available online: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13101.pdf> (accessed on 20 May 2022).
15. IEA, Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. (accessed on 20 May 2022).
16. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymiryuvannia rivnia dosiahnutoi enerhoefektyvnosti z vykorystanniam bazovykh rivniv enerhospozhyvannia ta pokaznykiv enerhoefektyvnosti. Zahalni polozhennia i nastanova»: ISO 50006:2014, IDT — DSTU ISO 50006:2016. — [Chynnyi vid 2016-04-29]. — K.: DP «UkrNDNTs», 2016. — 56 s. — (Natsionalni standarty Ukrainy).
17. Enerhozberezhennia. Vyznachennia obsiahiv enerhozberezhennia v orhanizatsiakh: ISO 50047:2016, IDT - DSTU ISO 50047:2020. [Chynnyi vid 2020-09-15]. — K.: DP UkrNDNTs, 2020. — 37 s. — (Natsionalni standarty Ukrainy).
18. Praktychnyi posibnyk z enerhetychnoho audytu promyslovykh pidpriemstv/ A. Cherniavskiy, A. Safiants, N. Usenko, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko, Yu. Shyshko, A. Hoienko// Za zahalnoi redaktsiieiu N. Usenko ta A. Cherniavskoho. – K.: Proekt «Konsultuvannia pidpriemstv shchodo enerhoefektyvnosti» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH za doruchenniam Federalnoho ministerstva ekonomichnoho spivrobitnytstva ta rozvytku Nimechchyny (BMZ), 2020. – 280 s.
19. Kerivnytstvo z vprovadzhennia systemy enerhetychnoho menedzhmentu vidpovidno do vymoh mizhnarodnoho standartu ISO 50001:2018/ A. Cherniavskiy, Ye. Inshekov, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko // Za zahalnoi redaktsiieiu Ye. Insheкова, A. Cherniavskoho. - K.: Proiekt UNIDO/GEF «Vprovadzhennia standartu system enerhomenedzhmentu v promyslovosti Ukrainy», 2021. – 137 s.
20. Fazeli, Alireza & Bakhtvar, Farzaneh & Jahanshaloo, Leila & Che Sidik, Nor Azwadi. (2014). Efficiency benchmarking of the iron and steel industry via the benchmark curve: A review. *Advanced Review on Scientific Research*. 2. 19-40.
21. Planirovanie optimalnogo ispolzovaniya potentsiala energosberezheniya promyshlennykh predpriyatiy Ukrainy / V.P. Rozen, A.I. Solovey, A.V. Chernyavskiy, M.A. Kazmiruk // Tehnichna elektrodinamika. 2006. #5. – S.59-68.
22. Software Tools: Website of US Department of Energy: URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/software-tools>.
23. Website of Ireland's national sustainable energy authority: URL: <https://www.seai.ie/tools/>.

Надійшла 29.05.2022
Received 29.05.2022