

С. Г. Кійко<sup>1</sup>, Є. А. Дружинін<sup>2</sup>, О. В. Прохоров<sup>2</sup><sup>1</sup>ПрАТ Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А. М. Кузьміна, Запоріжжя, Україна<sup>2</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

**Анотація.** Розроблено багаторівневу модель енергоспоживання металургійного підприємства, яка дозволяє оцінити ефективність відібраних до реалізації енергозберігаючих проєктів, об'єктивно оцінити частку кожного енергоресурсу в загальному потоці, визначити енергоємність окремого виробництва, цеху, всього підприємства, скорегувати стратегічний напрям в управлінні енергоресурсами. За допомогою моделі можливе вирішення цілого ряду завдань, серед яких оцінка раціональності та ефективності існуючої на підприємстві структури енергоспоживання, прогнозування очікуваних рівнів енерговитрат при зміні технології, сортаменту і якості продукції та порівняння різних технологій і обладнання з точки зору енергоефективності, оптимальне управління потоками енергоносіїв з урахуванням зміни умов виробництва.

**Ключові слова:** планування енергоспоживання, енергоресурси, прогнозування, портфель проєктів енергозбереження, металургійне підприємство.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Металургійні підприємства є великими споживачами електричної і теплової енергії, тому вирішення завдань енергозбереження неможливо без розроблення комплексної програми і портфеля проєктів за основними напрямками енергозбереження з обов'язковою координацією їх з програмою розвитку основного виробництва. Гострота вирішення цих питань викликана необхідністю поліпшення економічної стабільності підприємств, підвищення конкурентоспроможності продукції та зменшення залежності від постачальників енергоресурсів.

При цьому наявність цілісної моделі енергоспоживання дозволить оцінити ефективність відібраних проєктів реалізації енергозберігаючих заходів, об'єктивно оцінити частку кожного енергоресурсу в загальному потоці, визначити енергоємність окремого виробництва, цеху, всього підприємства, скорегувати стратегічний напрям в управлінні енергоресурсами. В цілому, структура споживання енергії на металургійному підприємстві орієнтована в основному на використання палива, яке широко використовується на всіх стадіях металургійного виробництва.

У той же час, на підприємствах, що виплавляють сталь в дугових сталеплавильних печах (ДСП) (яким є ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь»), в тому числі з неповним циклом виробництва, наприклад, міні-металургійних заводах, структура паливно-енергетичного балансу базується в основному на використанні електроенергії (рис. 1). Однак на таких підприємствах також використовується і енергія природного палива, переважно природного газу, який використовується в газокисневих пальниках як для підігріву металобрухту перед завантаженням в піч, так і безпосередньо в самій печі для прискорення процесу плавки.

Структура споживання електроенергії і котельно-пального палива основними виробництвами представлені на рис. 2 і 3.

Таким чином, найбільш енергоємним є доменне і прокатне виробництва, в яких споживається і найбільша кількість пального палива. У той час як електроенергія в якості основного ресурсу використовується для виплавки сталі в електропечах і при виробництві кисню.

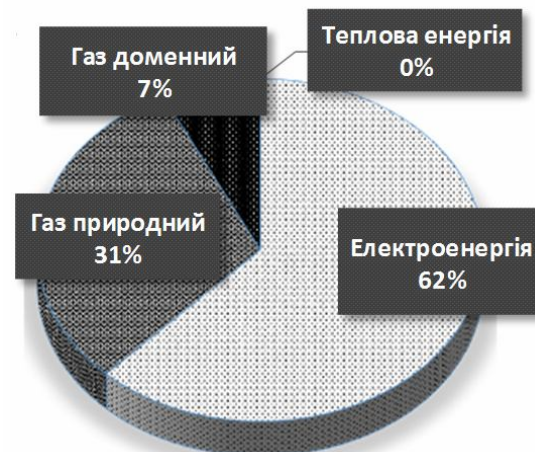


Рис. 1. Структура споживання енергії у % на «Дніпроспецсталь»

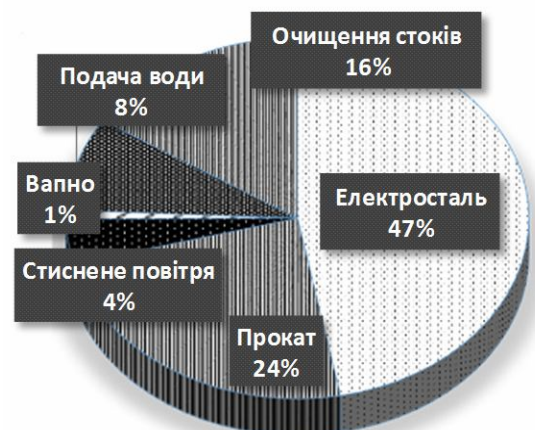


Рис. 2. Структура споживання та розподілу електроенергії у % основними виробництвами на «Дніпроспецсталь»

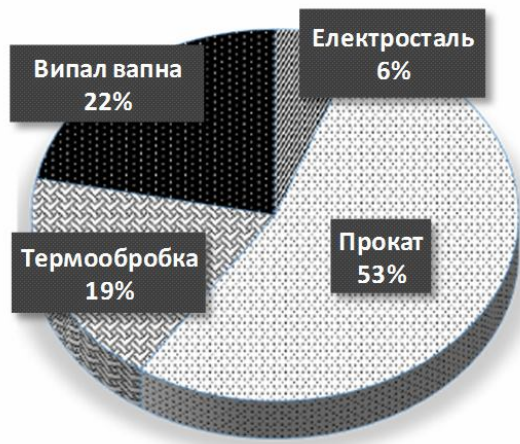


Рис. 3. Структура споживання та розподілу котельно-пічного палива у % основними виробництвами на «Дніпроспецсталь»

Витрати енергії на виробництво продукції визначаються енергоємністю, яка є одним з найважливіших показників виробництва, оскільки визначає його ефективність і безпосередньо впливає на собівартість продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню проблеми планування і управління енергоспоживанням на промислових підприємствах присвячена велика кількість робіт. Найважливішими завданнями при плануванні та управлінні енергоспоживанням на металургійному підприємстві є завдання нормування і прогнозування витрат електроенергії. Обґрунтовані норми споживання електроенергії дозволяють здійснювати прогноз електроенергії для окремих підрозділів і підприємства в цілому, здійснювати контроль ефективності використання електричної енергії конкретним підрозділом (на конкретному агрегаті), а також визначати ділянки неефективного енергоспоживання [1].

В роботі [2] на основі математичного моделювання вирішується завдання нормування електроенергії багатоміністерського підприємства при змінюваних обсягах виробленої продукції з достатньою точністю при мінімумі інформації про структуру підприємства.

В роботі [3] сформульовані основні проблеми управління електроенергією і енергозбереженням в металургійному виробництві, розглянуті завдання нормування, планування енерговитрат за рівнями управління. Авторами запропонований метод прогнозування витрат енергоресурсів, заснований на побудові регресійних моделей з включенням фактору часу.

Рішення завдання прогнозування електроенергії на основі багатоміністерського регресійного і кореляційного аналізів наведено в роботах [4; 5].

В роботі [6] дана математична постановка задачі оптимального прогнозу споживання газу на металургійному підприємстві по техніко-економічних критеріях, яка зведена до спеціалізованої задачі нелінійного математичного програмування.

Останнім часом стали популярні методи машинного навчання для побудови моделей прогнозу-

вання споживання енергії. Детальний огляд сучасного стану моделей машинного навчання, які використовуються для завдання прогнозування енергоспоживання на підприємствах представлений в роботі [7]. У роботі [8] наведено систему моделей для прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства на основі врахування кореляційно-регресійних взаємозв'язків трендів показників для формування динамічної оцінки якості балансу при реалізації принципу дотримання економічних інтересів і елімінування негативних процесів при перспективному енергоспоживанні.

Робота [9] присвячена обговоренню факторів, що впливають на енергоефективність та рішення щодо збереження, та найбільш підходящу політику їх просування. Поняття та проблеми енергоефективності, також зв'язки між конкретними практиками управління та енергоефективністю на рівні підприємства висвітлюються у [10].

Деякі особливості моделювання енергоспоживання на верхньому рівні управління розглядаються в роботі [11]. Авторами визначено основні закономірності формування енергоспоживання на металургійних підприємствах. В роботі [12] використовуються гібридні мережі Петрі для моделювання та аналізу металургійних процесів. Динамічний потік матеріалів і зміни в реальному часі кожного технологічного стану в металургійному процесі наочно моделюються за допомогою цієї моделі.

Наведений огляд літератури показує, що проблема прогнозування енергоспоживання (в більшій мірі електроенергії) з використанням математико-статистичних моделей і методів аналізу достатньо вивчена. Однак конкретно для металургійного виробництва завдання створення моделей планування та прогнозування споживання всіх видів енергоресурсів продовжує залишатися важливою і актуальною.

**Мета статті** – розроблення моделі багаторівневого прогнозування енергоспоживання, яка враховує динаміку споживання ресурсів і заснована на оптимізації енергетичних характеристик роботи підрозділів підприємства з заданою точністю за критерієм мінімуму техніко-економічних витрат.

### Модель планування енергоспоживання на металургійному підприємстві

Виробництво сталі на ПрАТ «Електрометалургійний завод» Дніпроспецсталь» ім. А.Н. Кузьміна представлено чотирма сталеплавильними цехами. У цеху порошкової металургії встановлена індукційна піч. В основному сталеплавильному цеху виплавка сталі ведеться у відкритій електродугової печі, з наступною продувкою в аргонкіслородному конвертері і обробкою на установці піч-ківш. Для потреб виробництва і побуту на підприємстві використовується газоподібне і тверде паливо. Природний газ використовується на виробничі потреби в якості котельно-пічного палива. Доменний газ використовується для виробничих потреб в суміші з природним газом.

Власних джерел теплової енергії (пара і гарячої води) для виробничих потреб підприємство не має і отримує її з боку. Аргон використовується в сталеп-

плавильному виробництві при виплавці і розливанні стали. Продукти поділу повітря – стиснене повітря, азот, кисень – власного виробництва.

Структура виробництва «Дніпроспецсталь», види споживаних паливно-енергетичних ресурсів та енергетичні потоки представлені на рис. 4.

Багаторівнева модель планування енергоспоживання металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження представлена на рис. 5.

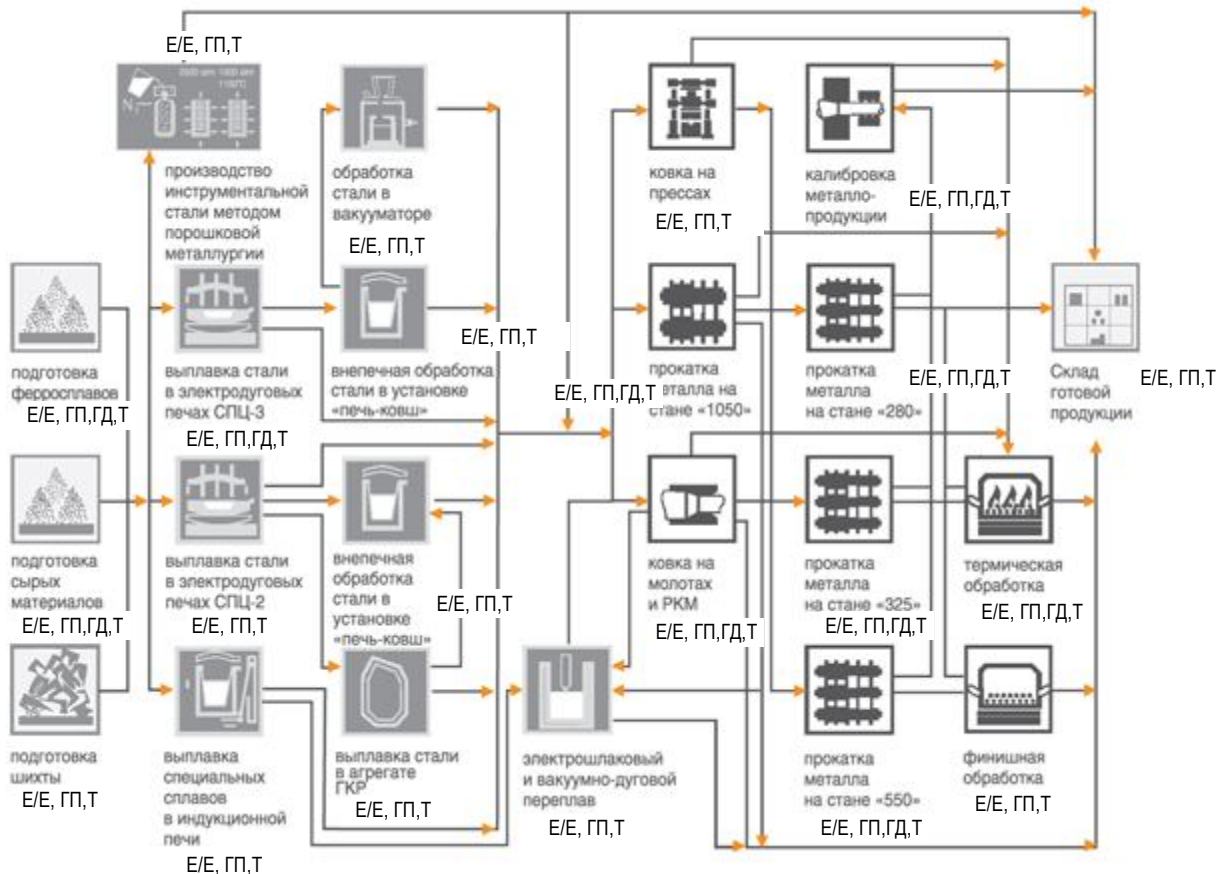


Рис. 4. Структура виробництва «Дніпроспецсталь» та споживання паливно-енергетичних ресурсів:  
E/E – електроенергія; ГП – газ природний, ГД – газ доменний, Т – тепло

- стратегічне вирівнювання – гарантування того, що фіксований обсяг ресурсів при виконанні проектів підприємства буде витрачатися відповідно до досягненням стратегічних цілей підприємства. Тут здійснюється перехід до більш зрілих моделей управління проектами оскільки, до основних показників проекту – вартість, час і якість – додається ще один показник – відповідність стратегії;

- пріоритизація – ранжування проектів портфеля для досягнення найкращого балансу між потребами в ресурсах і їх наявністю. У цьому завданні розподіл ресурсів між проектами буде відбуватися відповідно до встановлених пріоритетів проектів. У найпростішому випадку, ця технологія виділяє ресурси проектам з найбільшим пріоритетом відповідно енергоефективності, а ті проекти, яким ресурсу не вистачає – призупиняє;

- реалізація – гарантування того, що в умовах наявних потреб і достатності обмежених ресурсів

Основні розв'язувані завдання при управлінні портфелем проектів енергозбереження:

- оптимізація – розподіл ресурсів з метою максимізації цінності портфеля з урахуванням таких його показників, як рентабельність, ROI, NPV, IRR, ризик і ін.;

- балансування – досягнення бажаної рівноваги ресурсів в проектах через такі параметри як ризик і ROI, короткостроковість і довгостроковість проекту і інше;

будуть досягнуті результати проекту та планові показники за термінами, вартості та якості.

У багаторівневій моделі планування енергоспоживання металургійного підприємства можна виділити три організаційних рівня (споживання енергії на загальновиробничому, загальногосподарському і технологічному рівнях) і два рівня тимчасового планування (місячне і добове планування).

На підприємстві є прилади обліку, які вимірюють фактичне споживання енергоресурсів. У загальному випадку існує неузгодженість або небаланс між фактичним енергоспоживанням підприємства і сумарним фактичним енергоспоживанням окремих підрозділів.

На основі інформації, що надходить від виробничих підрозділів, про фактичні дані місячних обсягів виробництва (з урахуванням продуктивності прокатних станів кожного типу; числа годин роботи і простоїв кожного стану тощо) і місячного споживання

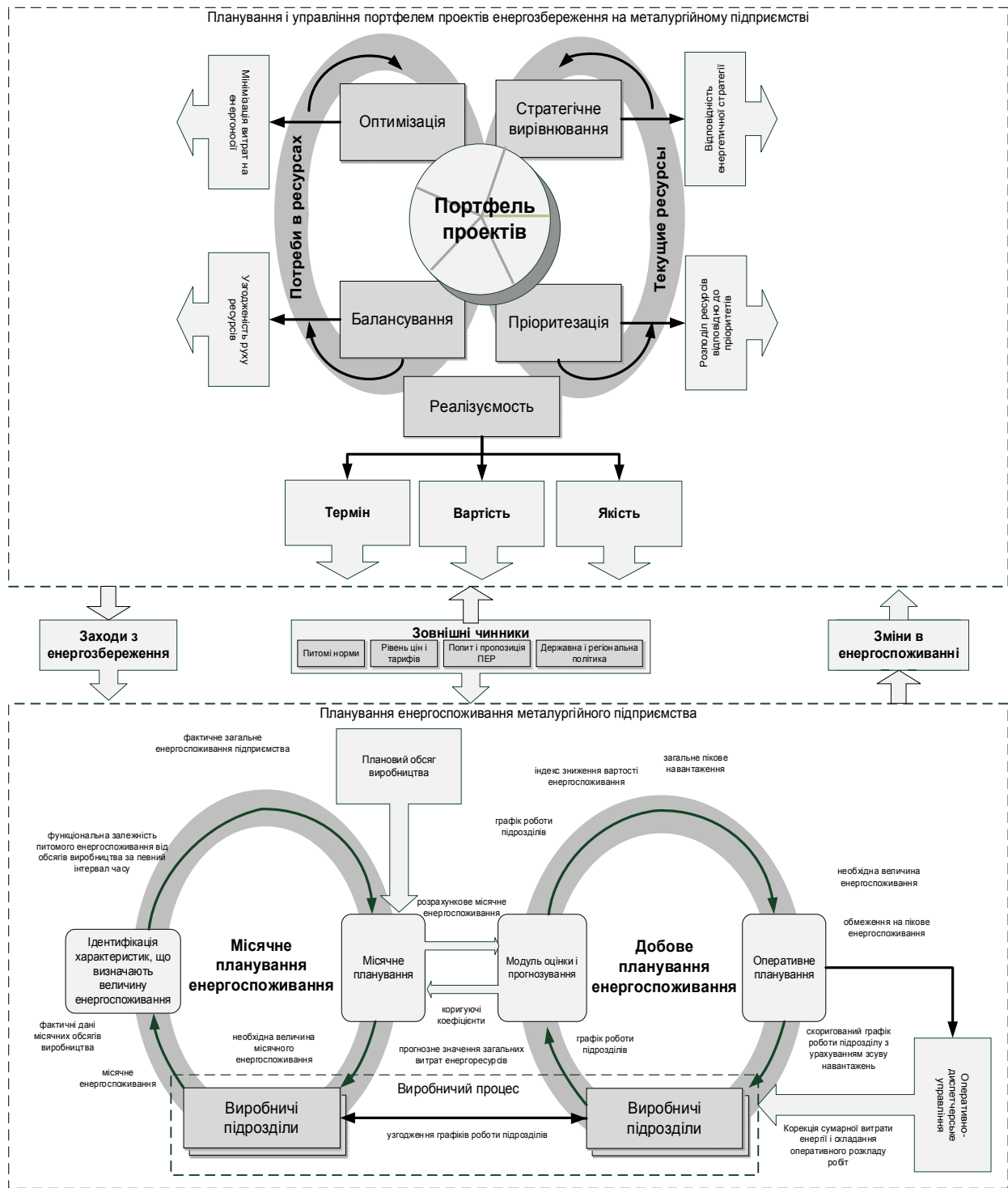


Рис. 5. Багаторівнева модель планування енергоспоживання при реалізації портфеля проектів енергозбереження

енергоресурсів (витрата електроенергії всіма споживачами підприємства, споживання природного і доменного газу в основному виробництві, інших виробництвах і втрати, теплоспоживання в вигляді технологічної пари, гарячої води на сантехнічні потреби тощо) визначаються характеристики питомого енергоспоживання як функції від обсягів виробництва:

$$W_{ij}^k = f(N_{ij}),$$

де  $W_{ij}^k$  – питома витрата енергії  $k$ -го виду (Е/Е – електроенергія; ГП – газ природний, ГД – газ до-

менний, Т – тепло)  $i$ -го виробничого підрозділу підприємства за  $j$ -й інтервал часу;  $N_{ij}$  – кількість продукції, виробленої  $i$ -м виробничим підрозділом за  $j$ -й інтервал часу.

На основі інформації про планові обсяги виробництва та отриманих характеристик режимів роботи обладнання виробничих підрозділів здійснюється прогноз місячного енергоспоживання підрозділом. Отримана розрахункова величина прямує в модуль оцінки і прогнозування. Тут вирішується завдання мінімізації загальної помилки прогнозу споживання

енергії кожного виду підприємством, яке засноване на неузгодженості значень фактичного загального споживання енергії підприємством, що визначається за показниками приладів обліку, і розрахункових сумарних витрат енергоресурсів.

Мінімізація небалансу значень здійснюється на основі корекції сумарної витрати енергоресурсів шляхом розрахунку коригуючих коефіцієнтів методом найменших квадратів. Отримані коригуючі коефіцієнти прямують назад в підсистему місячного планування, а прогнозні обсяги місячного енергоспоживання задаються підрозділам як необхідні величини. Узгоджені підрозділами графіки роботи передаються в модуль оцінювання та прогнозування. Тут здійснюється інтегральна оцінка якості графіків роботи підрозділів на основі введених показників оцінки енергоефективності.

В якості критеріїв для оцінки ступеня задоволення сформульованих вимог енергоефективності використовуються наступні:

1. Енергетичний критерій – приведена витрата покупних енергоресурсів, споживаних металургійним підприємством, в тоннах умовного палива, що визначається за формулою

$$B_{ГПР} = 1.57 \cdot B_{zn}^K + 0.143 \cdot B_m^K + 0.123 \cdot E,$$

де  $B_{zn}^K$  – місячна витрата природного газу, що безпосередньо витрачається всіма споживачами підприємства, т;  $B_m^K$  – місячна витрата тепла, що витрачається всіма споживачами підприємства, Гкал;  $E$  – місячне споживання підприємством електроенергії, тис. кВт·ч.

2. Економічний критерій – сума витрат на приведену витрату умовного палива, грн/міс, що визначається за формулою

$$C_{np} = B_{zn}^K \cdot C_{zn} + B_m^K \cdot C_m + E \cdot C_e,$$

де  $C_{zn}$ ,  $C_m$ ,  $C_e$  – відповідно ціни на природний газ, тепло і електроенергію.

Таким чином, можна вирішувати завдання мінімізації витрат енергоресурсів, мінімізації вартості споживання енергоресурсів або мінімізації приведених витрат на виробництво заданої плану продукції.

Інформація про пікові величини теплового та електричного навантаження, графіки роботи підрозділів, їх якості надходять в блок оперативного планування. Тут здійснюється складання оперативного розкладу робіт за критерієм мінімуму ухилення поточного енергоспоживання від заявленого графіка. Наприклад, на підвищення або зниження обсягу споживаних газів може впливати і збій допоміжного обладнання, і поставка поганої сировини, і зміна сортаменту, і форс-мажор у вигляді значного морозу.

Рішення задачі моделювання починається з встановлення взаємозв'язків між обраними параметрами для оптимізації на основі складання системи рівнянь матеріальних і енергетичних балансів. Балансові рівняння записуються для розрахункових (максимальних) значень теплових навантажень, електричної потужності і витрати палива, які визначали за показниками, заданими у вихідних даних за допомогою числа годин використання зазначених енергетичних показників.

Побудова такої моделі дає можливість обґрунтувати залежність питомих витрат енергоресурсів від будь-якого з об'єктивних чинників.

### Результати експериментів

Динаміка розрахункових і фактичних значень добового електроспоживання та помісячних витрат природного газу по цехах і підрозділах ПрАТ «Дніпроспецсталь» приведена на рис. 6 і 7 відповідно.

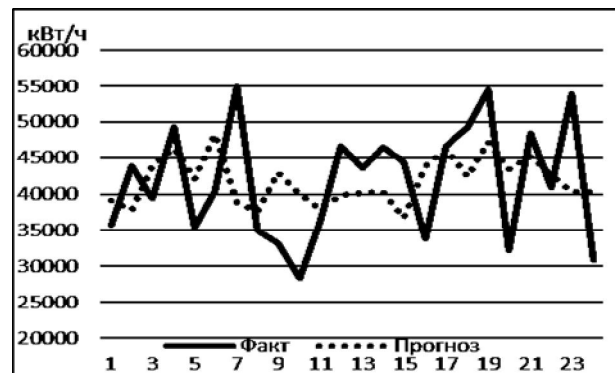


Рис. 6. Добовий прогноз і споживання електроенергії ПрАТ «Дніпроспецсталь» за 08.09.19

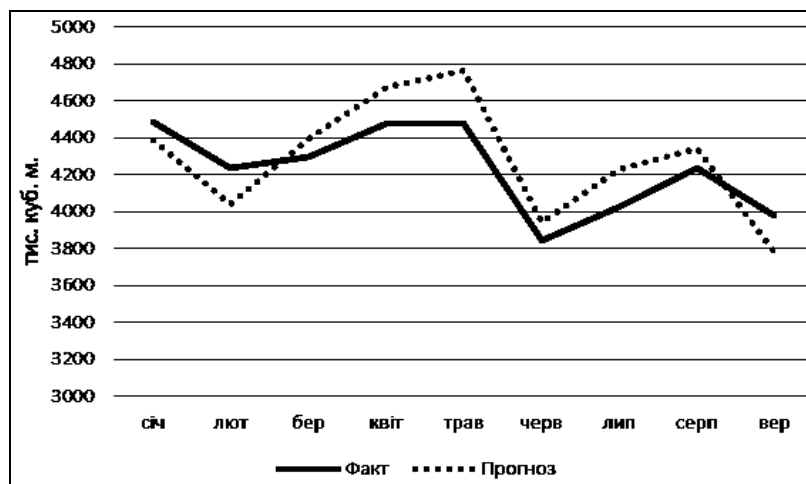


Рис. 7. Помісячний прогноз і споживання природного газу ПрАТ «Дніпроспецсталь» за 2019 рік

## Висновки

Запропоновано багаторівневу модель прогнозування енергоспоживання, засновану на оптимальній побудові енергетичних характеристик із заданою точністю по техніко-економічним критеріям.

За допомогою моделі можливе вирішення цілого ряду завдань, серед яких оцінка раціональності та ефективності існуючої на підприємстві структури енергоспоживання, прогнозування очікуваних рівнів енерговитрат при зміні технології, сортаменту і якості продукції та порівняння різних технологій і обладнання з точки зору енергоефективності,

оптимальне управління потоками енергоносіїв з урахуванням зміни умов виробництва тощо.

Моделювання та оцінка якості паливно-енергетичного балансу підприємства дозволяє за допомогою вихідних динамічних нормативів отримати певну систему похідних динамічних нормативів для адаптивного регулювання енергетичних активів металургійного підприємства, що забезпечує реалізацію ефективної стратегії енергоменеджменту металургійного підприємства при відборі проєктів для стратегічного планування підвищення енергоефективності та енергозбереження виробництва.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаров А.Я. Нормирование потребления топлива и энергии в черной металлургии [Электронный ресурс] // Журнал главного инженера. – № 6. – 2019. – Режим доступа: <http://gl-engineer.com/articles/normirovanie-potrebleniya-topliva-i-energii-v-chnoy-metallurgii>
2. Федотов А.И. Нормирование электропотребления на основе математического моделирования / А.И. Федоров, Г.В. Вагапов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9-10. – С. 130-133.
3. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
4. Bianco V. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models / V. Bianco, O. Manca, S. Nardini // Energy. – 2009. – № 34. – pp. 1413-1421.
5. Dordonnat V. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling / V. Dordonnat, S.J. Koopman, M. Ooms // Computational Statistics and Data Analysis. – 2012. – №56. – pp. 3134-3152.
6. Казаринов Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургических предприятиях / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – №7(79). – 2007. – С. 24-26.
7. Mosavi A. Energy Consumption Prediction Using Machine Learning; A Review [Электронный ресурс] / A. Mosavi, A. Bahmani // Preprints 2019. – Режим доступа: <https://www.preprints.org/manuscript/201903.0131/v1/download>
8. Koksharov V.A. Theoretical-methodological basis of formation of the enterprise strategy improving energy efficiency / V.A. Koksharov // European Science and Technology: materials of the X International research and practice conference, Vol. I. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, Munich, Germany. – 2015. – pp. 143-148.
9. Linares P. Energy efficiency: Economics and policy / P. Linares, X. Labandeira // Journal of Economic Surveys. – 2010. – № 24(3). – P. 573-592.
10. Anatomy of a paradox: Management practices, organizational structure and energy efficiency / R. Martin, M. Muûls, L. B. De Preux, U. J. Wagner // Journal of Environmental Economics and Management. – 2012. – № 63(2). – P. 208-223.
11. Shemetov A. Identification of the electricity consumption of metallurgical enterprises at the highest levels of management / A. Shemetov. – 2005. – pp. 135-140.
12. Yujuan R. Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net / R. Yujuan, H. Bao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 157.

Надійшла до редколегії 14.11.2019

Схвалена до друку 12.02.2020

## Energy consumption planning model of metallurgical enterprise

S. Kiyko, E. Druzhinin, O. Prokhorov

**Abstract.** A multilevel model of energy consumption of a metallurgical enterprise has been developed, which allows to evaluate the efficiency of energy-saving projects selected for implementation, objectively assess the share of each energy resource in the total flow, determine the energy intensity of an individual production, workshop, the whole enterprise, and adjust the strategic direction in energy management. In the multilevel model of energy consumption planning of a metallurgical enterprise are three organizational levels (energy consumption at the general production, workshop and technological levels) and two levels of time planning (monthly and daily planning). The goal of an energy management strategy is to minimize overall operating costs, which include energy costs, recorded peak load costs, and incremental operating costs associated with load shifts. Using the model, it is possible to solve a number of problems, including assessing the rationality and efficiency of the energy consumption structure at the enterprise, predicting the expected levels of energy consumption when changing the technology, assortment and quality of products and comparing various technologies and equipment from the point of view of energy efficiency, optimal management of energy carrier flows taking into account changes in production conditions etc. Modeling and evaluating the quality of the fuel and energy balance of the enterprise allows using a source of dynamic standards to obtain a specific system of derivatives of dynamic standards for adaptive regulation of energy assets of a metallurgical enterprise, ensuring the implementation of an effective energy management strategy for a metallurgical enterprise in the selection of projects for strategic planning to improve energy efficiency and energy saving of production.

**Keywords:** energy planning, energy resources, forecasting, portfolio of energy saving projects, metallurgical enterprise.