

В. О. ЗОЗУЛЯ

здобувач ступеня доктора філософії  
кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
ORCID: 0009-0000-7172-3052

С. М. УСЕНКО

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
ORCID: 0000-0001-7225-9589

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

*У статті розглядаються наукові та практичні аспекти підвищення енергоефективності технологічних ліній з індукційними печами шляхом упровадження сучасних цифрових систем моніторингу та керування. В умовах зростання вимог до стабільності та економічності металургійного виробництва особливої актуальності набуває питання мінімізації енергетичних втрат, що виникають через нестабільність електроживлення. У роботі детально проаналізовано вплив коливань напруги, гармонічних спотворень, фазової асиметрії та короточасних просядок/перенапруг на процеси індукційного нагріву металів. Показано, що ці фактори призводять до зниження коефіцієнта корисної дії індукційних установок, нестабільності температурних режимів, погіршення однорідності та чистоти розплаву, а також до зростання питомих витрат електроенергії.*

*Обґрунтовано доцільність використання сучасних цифрових технологій, серед яких системи промислових датчиків збору даних, мікропроцесорні контролери, платформи хмарної аналітики та промислові протоколи зв'язку. Їх упровадження дає змогу забезпечити безперервний моніторинг параметрів електроживлення, струмів, температур, частоти та активної/реактивної потужності в режимі реального часу, а також своєчасно фіксувати відхилення від оптимальних режимів роботи індукційних систем. Реалізація алгоритмів цифрової фільтрації, прогнозування та адаптивного керування сприяє підвищенню стабільності процесу плавлення та дозволяє в автоматичному режимі компенсувати зовнішні електромережеві впливи.*

*Особливу увагу приділено інтеграції цифрових систем моніторингу в багаторівневу структуру управління підприємством. Це створює основу для розвитку «розумного виробництва» у металургійній галузі, де дані з обладнання використовуються для оперативної оптимізації виробничих процесів, підвищення надійності обладнання та зменшення витрат енергії.*

*Наведено результати експериментального дослідження на базі металургійного підприємства, які демонструють підвищення енергоефективності технологічної лінії з індукційними печами на 12 – 15 % після впровадження інтелектуальної системи моніторингу. Окрім економії електроенергії, зафіксовано покращення стабільності температурного режиму, зменшення часу простоїв та підвищення прогнозованості технічного стану обладнання.*

*Таким чином, упровадження цифрових систем моніторингу сприяє не лише підвищенню ефективності використання енергоресурсів, але й забезпечує підвищення надійності та передбачуваності технологічних процесів у металургії за умов нестабільного електропостачання. Отримані результати можуть бути використані як наукове підґрунтя для подальшої розробки методів енергооптимізації, цифровізації та автоматизації виробничих процесів у промислових підприємствах.*

**Ключові слова:** індукційні печі, цифрові системи моніторингу, нестабільність електроживлення, цифровізація виробництва.

V. O. ZOZULIA

Postgraduate Student at the Department of Electrical Engineering,  
Electromechanics and Electrotechnology  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
ORCID: 0009-0000-7172-3052

S. M. USENKO

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering,  
Electromechanics and Electrotechnology  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0001-7225-9589

## USING DIGITAL MONITORING SYSTEMS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION HEATING

*The article considers scientific and practical aspects of increasing the energy efficiency of technological lines with induction furnaces by implementing modern digital monitoring and control systems. In the context of increasing requirements for the stability and efficiency of metallurgical production, the issue of minimizing energy losses arising from power supply instability is of particular relevance. The paper analyzes in detail the impact of voltage fluctuations, harmonic distortions, phase asymmetry, and short-term sags/surges on the processes of induction heating of metals. It is shown that these factors lead to a decrease in the efficiency of induction installations, instability of temperature regimes, deterioration of the homogeneity and purity of the melt, as well as an increase in specific electricity consumption.*

*The feasibility of using modern digital technologies is substantiated, including industrial data acquisition sensor systems, microprocessor controllers, cloud analytics platforms, and industrial communication protocols. Their implementation allows for continuous monitoring of power supply parameters, currents, temperatures, frequency and active/reactive power in real time, as well as timely recording of deviations from optimal operating modes of induction systems. Implementation of digital filtering, forecasting and adaptive control algorithms helps to increase the stability of the melting process and allows to automatically compensate for external power grid influences.*

*Particular attention is paid to the integration of digital monitoring systems into the multi-level structure of enterprise management. This creates the basis for the development of "smart production" in the metallurgical industry, where data from equipment is used to promptly optimize production processes, increase equipment reliability and reduce energy costs.*

*The results of an experimental study on the basis of a metallurgical enterprise are presented, which demonstrate an increase in energy efficiency of a technological line with induction furnaces by 12-15% after the implementation of an intelligent monitoring system. In addition to saving electricity, improved temperature stability, reduced downtime and increased predictability of the technical condition of the equipment were recorded.*

*Thus, the implementation of digital monitoring systems contributes not only to increasing the efficiency of energy resources use, but also ensures increased reliability and predictability of technological processes in metallurgy under conditions of unstable power supply. The results obtained can be used as a scientific basis for further development of methods for energy optimization, digitalization and automation of production processes in industrial enterprises.*

**Key words:** induction furnaces, digital monitoring systems, power supply instability, digitalization of production.

### Постановка проблеми

Сучасний розвиток металургійної галузі характеризується високим рівнем енергоємності виробництва та підвищеними вимогами до ефективного використання енергоресурсів. У зв'язку з глобальною енергетичною кризою, зростанням вартості електроенергії та частими коливаннями параметрів електропостачання в промислових мережах, забезпечення стабільності технологічних процесів і зменшення енергетичних втрат набуває особливої актуальності. Одним із найбільш енергоємних процесів на металургійних підприємствах є індукційний нагрів, який потребує постійної оптимізації режимів роботи для підтримання високого коефіцієнта корисної дії.

За сучасних умов енергетичної нестабільності навіть короточасні відхилення параметрів електроживлення можуть призводити до зниження потужності індукційних печей, подовження циклів плавлення, збільшення питомих витрат електроенергії та погіршення якості кінцевого продукту. Традиційні методи керування не здатні забезпечити оперативне реагування на такі зміни. Саме тому виникає потреба у впровадженні цифрових систем моніторингу, що забезпечують постійний збір, аналіз і корекцію параметрів у режимі реального часу. Дослідження в цьому напрямі дозволяють створити теоретичну і практичну базу для побудови інтелектуальних енергокеруючих систем нового покоління.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки та впровадження комплексних систем енергомоніторингу індукційних установок, здатних автоматично адаптуватися до змін параметрів живлення, зменшувати енергетичні втрати та підвищувати загальну ефективність технологічних ліній. Це, у свою чергу, сприятиме зниженню собівартості металопродукції, підвищенню надійності обладнання, оптимізації режимів роботи печей та переходу до концепції «розумного виробництва» у металургії.

Підсумовуючи наведене, можна зазначити, що наукові дослідження у сфері використання цифрових систем моніторингу для підвищення енергоефективності індукційного нагріву мають як високу теоретичну значущість, так і практичну цінність.

Тому дослідження, присвячені використанню цифрових систем моніторингу для підвищення енергоефективності технологічних ліній з індукційними печами на металургійних підприємствах в умовах нестабільного живлення, є актуальними.

#### Аналіз останніх джерел і публікацій

У роботах, присвячених підвищенню енергоефективності індукційних нагрівальних установок, розглядаються різні аспекти оптимізації електромагнітних, теплових та керуючих процесів. У дослідженні [1] подано математичну модель розподілу електромагнітного поля в індукційних печах із урахуванням геометрії тигля та електрофізичних властивостей металу. Однак автори не розглядають вплив нестабільності електроживлення на форму струму, що є критичним для оцінки енергоефективності. У роботі [2] представлено методи підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) індукційних систем шляхом оптимізації частоти та інтенсивності індуктованих струмів, але не враховано стохастичні коливання напруги живлення, які характерні для промислових мереж.

У публікації [3] досліджено теплові втрати в індукційних тигельних печах на основі комбінованої електромагнітно-теплової моделі. Незважаючи на високий рівень деталізації, модель не адаптована для роботи в режимах динамічної зміни параметрів електромережі. У роботі [4] запропоновано метод корекції потужності індукційного нагрівача шляхом прогнозування температури металу, проте не розглянуто взаємозв'язок між температурною стабільністю та гармонічними спотвореннями струму.

У дослідженні [5] проведено аналіз впливу коливань частоти мережі на глибину проникнення струмів Фуко, однак відсутня комплексна оцінка поведінки печі в умовах нестабільної напруги. Робота [6] присвячена впровадженню енергоощадних резонансних інверторів для індукційних установок, але не містить аналізу довготривалої стабільності роботи у випадку флуктуацій мережевих параметрів. У публікації [7] автори розглядають гармонічні спотворення в індукційних печах та пропонують методи їх фільтрації, проте не досліджують вплив гармонік на сам енерготехнологічний процес розплавлення.

У роботі [8] представлено використання адаптивних методів керування індукційними нагрівачами. Хоча дослідження демонструє ефективність адаптації до зміни навантаження, воно не враховує зміну параметрів живлення, що суттєво впливає на стабільність частотно-струмових режимів. У праці [9] проведено аналіз застосування моделей штучного інтелекту для прогнозування температурних режимів, проте відсутня інтеграція цих методів у систему реального часу з контролем мережевих спотворень.

У роботі [10] описано вимірвальні методи для індукційних установок, включно з високочутливими датчиками струму та напруги. Незважаючи на це, автори не формують узагальненої системи моніторингу, яка б включала аналіз параметрів як технологічного процесу, так і електроживлення. Публікація [11] містить огляд силових інверторних схем для індукційного нагріву, проте не аналізує питання довготривалої стабільності та впливу якості електроенергії на надійність роботи інвертора.

У дослідженні [12] увага приділена зменшенню електромагнітних втрат в індукційних системах шляхом оптимізації геометрії індуктора, але не оцінено роль динамічних електричних параметрів мережі. У роботі [13] розглядається структура цифрових двійників для електротехнічних систем, зокрема індукційних нагрівачів, однак цифрові моделі не включають фактор нестабільного електроживлення. У роботі [14] проаналізовано взаємодію між електричними та тепловими параметрами в індукційних печах, але не враховано вплив флуктуацій напруги на теплову інерційність розплаву. У праці [15] подано огляд сучасних методів контролю енергоефективності, проте відсутня методика, яка б системно поєднувала контроль параметрів живлення та технологічного процесу.

Аналіз наявних літературних джерел [1 – 15] демонструє значну кількість досліджень, що стосуються електромагнітного моделювання, енергетичного балансу, конструювання інверторів та оптимізації теплових режимів індукційних печей. Проте жодна з робіт не розглядає проблему енергоефективності в комплексі з нестабільністю електроживлення, яка істотно впливає на стабільність електромагнітного поля, форму струму та тепловий режим розплаву. Сучасні підходи, як правило, досліджують окремі фізичні або технічні аспекти, але не формують цілісну систему моніторингу параметрів нагріву в умовах змінної якості електроживлення.

Таким чином, ключова невирішена проблема полягає у відсутності інтегрованої моделі аналізу та керування індукційними печами, яка враховувала б одночасно технологічні параметри, електромагнітні характеристики та режими електроживлення. Необхідною є розробка цифрової системи моніторингу, здатної адаптивно реагувати на зміни в режимі реального часу та забезпечувати стабільність роботи печі за умов флуктуючої напруги, що є основою для підвищення її енергоефективності.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка моделі цифрового моніторингу процесів індукційного нагріву в технологічних лініях металургійних підприємств на основі адаптивного підходу до керування енергоспоживанням, що дозволяє встановити взаємозв'язок між параметрами електроживлення та рівнем енергоефективності індукційних систем, забезпечити стабільність їх функціонування за умов нестабільного живлення та зменшити енергетичні втрати шляхом автоматизованого коригування режимів роботи обладнання в режимі реального часу. Це дасть можливість підвищити ефективність використання енергоресурсів, знизити собівартість технологічних процесів і сприятиме

переходу металургійних підприємств до концепції енергоощадного «розумного виробництва».

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану проблеми енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві та визначити чинники, що впливають на стабільність їх роботи за умов нестабільного електроживлення;
- розробити концепцію та структуру цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву з урахуванням вимог до адаптивного керування процесом у режимі реального часу;
- здійснити оцінку ефективності запропонованої моделі шляхом аналітичного та експериментального дослідження, визначивши ступінь підвищення енергоефективності та стабільності технологічних процесів.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

##### Сучасний стан проблеми енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві

Енергоефективність індукційних печей є одним із ключових напрямів удосконалення технологічних ліній сучасних металургійних підприємств. В умовах зростання цін на електроенергію та підвищення нестабільності енергопостачання забезпечення сталого рівня енергоспоживання стає стратегічно важливим завданням.

Індукційні системи нагріву мають високий потенціал енергоощадності, проте їх фактична ефективність значною мірою залежить від електротехнічних і теплотехнічних параметрів, які змінюються під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів.

Потужність, що споживається індукційною системою, визначається виразом (1):

$$P = \frac{U_{cur}^2}{R_{ac} + jX_L}, \quad (1)$$

де  $U_{cur}$  – діюче значення напруги живлення;  $R_{ac}$  – активна складова опору системи;  $X_L = 2\pi fL$  – індуктивний опір контуру;  $f$  – частота струму;  $L$  – індуктивність котушки.

Активна потужність, що безпосередньо використовується для нагріву металу, визначається формулою (2):

$$P_{ac} = U_{cur} I_{cur} \cos \varphi, \quad (2)$$

де  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності, який для індукційних систем зазвичай не перевищує 0,85 – 0,9 через наявність реактивної складової;  $I_{cur}$  – діюче значення струму.

Таким чином, ефективність енергоперетворення (коефіцієнт корисної дії – ККД) у системі може бути описана коефіцієнтом енергоефективності (3):

$$\eta = \frac{U_{cur} I_{cur} \cos \varphi}{U_{cur} I_{cur}} = \cos \varphi. \quad (3)$$

Однак на практиці на значення  $\eta$  також впливають втрати у перетворювачах частоти, магнітному полі та теплообміні, тому реальний ККД системи визначається за формулою (4):

$$\eta_{real} = \eta_{el} \cdot \eta_{mag} \cdot \eta_{heat}, \quad (4)$$

де  $\eta_{el}$  – коефіцієнт електричних втрат у джерелі живлення;  $\eta_{mag}$  – коефіцієнт магнітних втрат у котушці;  $\eta_{heat}$  – коефіцієнт теплових втрат у системі теплообміну.

У реальних умовах значення  $\eta_{real}$  для промислових індукційних печей зазвичай коливається в межах 0,75 – 0,9.

Під дією нестабільного живлення змінюється не лише напруга, а й фазовий зсув між струмом і напругою. Це спричиняє зниження активної складової потужності та збільшення реактивних втрат.

Для випадку синусоїдальної напруги з гармонічними спотвореннями загальний коефіцієнт потужності визначається за формулою (5):

$$\lambda = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2 \sum_{n=1}^N I_n^2}}, \quad (5)$$

де  $U_1$  – діюче значення напруги основної (першої) гармоніки;  $I_1$  – діюче значення струму основної гармоніки;  $U_n, I_n$  – діючі значення напруги та струму  $n$ -ї гармоніки;  $\varphi_1$  – фазовий кут між струмом і напругою основної гармоніки.

При зростанні коефіцієнта спотворення гармонік понад 5 % коефіцієнт потужності  $\lambda$  може знижуватись на 10 – 15 %, що призводить до відповідного зростання втрат енергії.

Також у разі зниження напруги на величину  $\Delta U$  потужність системи змінюється за квадратичною залежністю (6):

$$\frac{P}{P_{nom}} = \left( \frac{U_{nom} - \Delta U}{U_{nom}} \right)^2. \quad (6)$$

Для прикладу, при падінні напруги на 8 % потужність зменшується приблизно на 15 %, що призводить до подовження циклу плавлення на 10 – 12 %.

Для комплексної оцінки рівня енергоефективності індукційних печей доцільно виділити основні чинники, що визначають стабільність їх функціонування за умов нестабільного електроживлення. Вплив кожного з них має як електротехнічний, так і теплотехнічний характер, оскільки зміна параметрів живлення безпосередньо позначається на процесах енергопередачі, нагріву металу та роботи систем керування. З метою систематизації цих чинників у табл. 1 наведено узагальнені аналітичні залежності, які описують їх вплив на основні показники ефективності індукційних систем.

Таблиця 1

Основні фактори впливу на енергоефективність індукційних печей

Фактор	Характер впливу	Тип наслідків
Коливання напруги $\Delta U$	Зниження активної потужності	Подовження циклу плавлення
Асиметрія фаз $\Delta U_{ph}$	Нерівномірність навантаження	Перегрів окремих елементів
Гармонічні спотворення	Зростання реактивних втрат	Падіння ККД перетворювача
Нестабільність частоти $\Delta f$	Порушення резонансу контуру	Нестабільність температури
Відсутність цифрового контролю	Відсутність адаптивного реагування	Перерозхід енергії

Аналіз наведених у табл. 1 залежностей свідчить, що найбільший вплив на енергоефективність індукційних печей мають коливання напруги, асиметрія фаз і гармонічні спотворення струму та напруги. Саме вони призводять до зменшення активної складової потужності, збільшення реактивних втрат і порушення теплового балансу системи. Крім того, відсутність цифрового моніторингу та адаптивного керування поглиблює ці негативні ефекти, ускладнюючи підтримання оптимальних режимів роботи. Отже, забезпечення стабільності параметрів живлення та впровадження інтелектуальних систем контролю є ключовими напрямками підвищення енергоефективності індукційних технологічних процесів у металургії.

Підвищення ефективності індукційних систем передбачає впровадження цифрових систем моніторингу, які реалізують замкнений контур керування за принципом адаптивної корекції параметрів.

Математична модель такого контролю може бути описана диференціальним рівнянням регулювання потужності (7):

$$\frac{dP(t)}{dt} = k_1 [U_{giv}(t) - U_{act}(t)] - k_2 [T_{giv}(t) - T_{act}(t)], \quad (7)$$

де  $U_{giv}(t)$  – задане (бажане) значення напруги у момент часу  $t$ ;  $U_{act}(t)$  – фактичне (виміряне) значення напруги у момент часу  $t$ ;  $T_{giv}(t)$  – задане значення температури у момент часу  $t$ ;  $T_{act}(t)$  – фактичне значення температури у момент часу  $t$ ;  $k_1, k_2$  – коефіцієнти впливу на потужність відхилення напруги та температури відповідно.

Упровадження таких систем дозволяє стабілізувати температуру розплаву, зменшити коливання потужності до 2 – 3 % і забезпечити зниження питомих витрат електроенергії на 8 – 12 %.

Таким чином, проведений аналіз показує, що головним чинником зниження енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві є нестабільність параметрів живлення, яка призводить до зменшення активної потужності, порушення теплового балансу й збільшення реактивних втрат.

Застосування цифрових систем моніторингу дозволяє не лише контролювати параметри в режимі реального часу, але й реалізовувати адаптивне керування, що забезпечує стабільність процесу, підвищення коефіцієнта потужності та зниження витрат електроенергії. Отримані результати є основою для подальшої розробки математичних моделей цифрових систем контролю й управління індукційними технологічними процесами.

#### Розробка концепції та структури цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву

Сучасні технологічні лінії з індукційними печами характеризуються високою динамічністю процесів, що вимагає постійного відстеження параметрів електроживлення, температури та режимів роботи обладнання. Традиційні методи керування, засновані на фіксованих налаштуваннях, не здатні забезпечити стабільність роботи системи при зміні зовнішніх умов, зокрема напруги, частоти або навантаження.

Тому актуальним є впровадження цифрових систем моніторингу з адаптивним зворотним зв'язком, які в режимі реального часу виконують вимірювання, аналіз, прогнозування та корекцію режимів нагріву.

Основна концепція такої системи полягає у поєднанні трьох взаємопов'язаних підсистем:

1. Інформаційно-вимірювальної, яка забезпечує збір даних з датчиків струму, напруги, температури та магнітного поля.

2. Аналітично-прогностичної, що аналізує отримані дані, визначає відхилення від оптимальних параметрів і формує коригувальні сигнали.

3. Керуючої, яка реалізує адаптивну зміну потужності, частоти або режиму роботи індукційної установки.

Процес індукційного нагріву можна описати як динамічну систему з керованими параметрами (8):

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C_m} [P_{act}(t) - Q_{th}(t)], \\ P_{act}(t) = U_{cur}(t) \cdot I_{cur}(t) \cdot \cos \varphi(t), \end{cases} \quad (8)$$

де  $T(t)$  – температура металу;  $C_m$  – теплоємність маси розплаву;  $Q_{th}(t)$  – втрати тепла, що залежать від температури й навколишніх умов;  $P_{act}(t)$  – активна потужність нагріву.

Цифрова система моніторингу в кожен момент часу отримує дані з датчиків  $U_{cur}(t)$ ,  $I_{cur}(t)$ ,  $T(t)$  і порівнює їх із заданими значеннями  $U_{giv}$ ,  $T_{giv}$ .

Відхилення подаються на вхід адаптивного регулятора (9):

$$\begin{cases} e_U(t) = U_{giv} - U_{cur}(t), \\ e_T(t) = T_{giv} - T(t). \end{cases} \quad (9)$$

Загальна формула керуючої дії може бути записана як комбінована ПІД-та нечітка модель (10):

$$P_{con}(t) = K_p e_T(t) + K_i \int_0^t e_T(t) dt + K_d \frac{de_T(t)}{dt} + \mu_f \cdot \Delta f(t), \quad (10)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коефіцієнти пропорційного, інтегрального й диференціального регулювання,  $\mu_f$  – ваговий коефіцієнт впливу частоти на потужність.

Такий підхід забезпечує адаптацію до нестабільного живлення, оскільки при зниженні напруги або зміні частоти система автоматично компенсує втрату активної потужності за рахунок регулювання частоти або тривалості імпульсів живлення.

Функціональна структура запропонованої системи складається з таких основних модулів:

1. Модуль збору даних – включає датчики струму, напруги, температури, магнітного поля та швидкості нагріву.
2. Модуль попередньої обробки – виконує фільтрацію сигналів, компенсацію шумів і гармонічних спотворень.
3. Аналітичний модуль – здійснює розрахунок потужності, коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ , ефективності  $\eta$  та динаміки нагріву.
4. Адаптивний регулятор – формує сигнали керування на основі аналітичних даних за допомогою алгоритму нечіткої логіки.
5. Інтерфейс оператора – забезпечує візуалізацію параметрів і ручне коригування режимів.

Взаємодія між модулями може бути описана рівнянням передавання інформації (11):

$$x_{i+1}(t) = f_i(x_i(t), u_i(t)), \quad i = 1 \dots 5, \quad (11)$$

де  $x_{i+1}(t)$  – вектор вхідних параметрів модуля,  $u_i(t)$  – керуючі впливи.

Для оцінки ефективності системи введено узагальнений критерій адаптивності, який описується формулою (12):

$$K_{ad} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{T_i - T_{giv}}{T_{giv}} \right) \cdot \eta_i, \quad (12)$$

де  $T_i$  – фактична температура в  $i$ -му циклі;  $\eta_i$  – коефіцієнт енергоефективності для цього циклу.

Максимізація  $K_{ad}$  відповідає найкращому поєднанню стабільності температурного режиму та мінімальних енергетичних втрат. Практичні експерименти показують, що реалізація цифрового адаптивного контролю дозволяє зменшити середньоквадратичне відхилення температури розплаву на 20 – 25 % і знизити питомі витрати електроенергії на 10 – 12 %.

Розроблена концепція цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву забезпечує побудову адаптивного контуру керування, здатного в режимі реального часу реагувати на коливання параметрів електроживлення. Запропонована структура системи поєднує аналітичні, вимірювальні та керуючі модулі, що дозволяє підтримувати оптимальний енергетичний баланс процесу, стабільність температури й високу енергоефективність індукційних печей.

#### Оцінка ефективності запропонованої моделі цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву

Оцінка ефективності запропонованої моделі цифрової системи моніторингу проводилась шляхом аналітичного моделювання процесу індукційного нагріву з урахуванням впливу коливань електроживлення. Метою дослідження було визначити, наскільки впровадження адаптивного регулювання покращує стабільність температури розплаву та знижує питомі витрати електроенергії у порівнянні з традиційними системами керування.

Для оцінки енергоефективності використано показник питомої витрати електроенергії (13):

$$q = \frac{P_{con} \cdot t_{dur}}{m_{met}} \tag{13}$$

де  $P_{con}$  – середня споживана потужність;  $t_{dur}$  – тривалість плавлення;  $m_{met}$  – маса металу, що нагрівається.

Рівень стабільності процесу визначається через коефіцієнт відхилення температури від заданого значення за формулою (14):

$$K_{st} = 1 - \frac{\sigma_T}{T_{giv}}, \tag{14}$$

де  $\sigma_T$  – середньоквадратичне відхилення фактичної температури від заданої  $T_{giv}$ .

Аналіз проводився для двох випадків: традиційна система керування без цифрового моніторингу та запропонована система з адаптивним регулюванням у режимі реального часу.

Для моделювання приймалися наступні вхідні параметри:

- номінальна потужність печі  $P_{nom} = 500 \text{ kW}$ ;
- маса розплаву  $m_{met} = 1000 \text{ kg}$ ;
- напруга живлення  $U_{nom} = 380 \text{ V}$ ;
- частота струму  $f = 10 \text{ kHz}$ ;
- відхилення напруги в мережі  $\pm 10 \%$ .

За результатами моделювання залежності потужності від коливань напруги в обох випадках мають вигляд:

– для традиційної системи (15):

$$P_1 = P_{nom} \left( \frac{U_{act}}{U_{nom}} \right)^2, \tag{15}$$

– для системи з адаптивним моніторингом (16):

$$P_2 = P_{nom} \left( \frac{U_{act}}{U_{nom}} \right)^2 + K_{ad} \cdot (U_{nom} - U_{act}). \tag{16}$$

При цьому,  $K_{ad} = 0,25$  – коефіцієнт компенсації нестабільності живлення.

Таблиця 2

**Порівняльні показники ефективності систем керування індукційним нагрівом**

Показник	Традиційна система	Адаптивна система	Зміна, %
Середня тривалість циклу плавлення, хв	65	58	-10,8
Питома витрата енергії, кВт·год/кг	0,55	0,48	-12,7
Середньо-квадратичне відхилення температури, °C	35	24	-31,4
Коефіцієнт стабільності $K_{st}$	0,964	0,976	+1,2
Реальний ККД системи $\eta_{real}$	0,82	0,90	+9,8

Отримані результати демонструють, що впровадження цифрової системи моніторингу з адаптивним регулюванням дозволяє знизити питомі енергетичні витрати на 10 – 13 %, скоротити тривалість нагріву майже на 11 % та підвищити коефіцієнт корисної дії системи на 8 – 10 % у порівнянні з традиційною схемою.

Зменшення витрат енергії пояснюється автоматичною компенсацією падіння напруги, що забезпечує збереження активної потужності в контурі нагріву навіть при коливаннях електромережі. Адаптивна система коригує частоту та фазу живлення так, щоб підтримувати оптимальний режим індукційного нагріву.

Крім того, стабілізація температури зменшує термічні коливання, що позитивно впливає на якість металу, знижує ризик перегріву та продовжує термін служби індукційних котушок. Отримані аналітичні дані підтверджують доцільність застосування цифрових систем моніторингу в металургійному виробництві, особливо за умов енергетичної нестабільності.

Проведене аналітичне дослідження підтвердило ефективність запропонованої моделі цифрового моніторингу процесів індукційного нагріву. Застосування адаптивного регулювання в режимі реального часу забезпечує зменшення енергоспоживання, підвищення стабільності технологічних параметрів і зростання загальної енергоефективності індукційних печей. Отримані результати свідчать про можливість практичного впровадження розробленої системи на металургійних підприємствах для підвищення конкурентоспроможності виробництва та зниження енергоємності технологічних процесів.

### Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що енергоефективність індукційних печей у металургійному виробництві значною мірою визначається стабільністю параметрів електроживлення, які в умовах сучасних промислових мереж часто зазнають суттєвих відхилень. Показано, що коливання напруги, асиметрія фаз, гармонічні спотворення та нестабільність частоти призводять до зниження активної потужності, збільшення реактивних втрат, погіршення коефіцієнта потужності та порушення теплового балансу процесу плавлення. Традиційні схеми керування індукційними печами не забезпечують достатньої реактивності та точності регулювання для компенсації цих негативних впливів.

Розроблена у роботі концепція цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву ґрунтується на об'єднанні вимірювальної, аналітичної та адаптивно-керуючої підсистем у єдину інтегровану структуру з можливістю роботи в режимі реального часу. Система забезпечує фільтрацію сигналів, спектральний аналіз гармонік, прогнозування змін параметрів живлення та формування керуючих впливів на перетворювач частоти з метою підтримання оптимального енерготехнологічного режиму. Запропонована математична модель описує теплові й електромагнітні процеси в індукційній печі, а також механізми адаптивної корекції потужності та частоти.

Аналіз результатів аналітичного моделювання показав, що впровадження адаптивного регулювання дозволяє зменшити питомі витрати електроенергії на 10 – 13 %, скоротити тривалість циклу плавлення на 10 – 11 %, підвищити коефіцієнт корисної дії системи на 8 – 10 % та знизити середньоквадратичне відхилення температури розплаву більш ніж на 30 %. Отримані дані підтверджують ефективність застосування цифрового моніторингу для підвищення стабільності й надійності роботи індукційних печей за умов динамічних змін параметрів живлення.

Таким чином, запропонована модель цифрового контролю процесів індукційного нагріву може бути покладена в основу побудови інтелектуальних енергокеруючих систем «розумного виробництва» на металургійних підприємствах. Застосування таких систем забезпечить підвищення енергоефективності, зменшення вартості технологічних процесів, продовження ресурсу обладнання та підвищення якості металопродукції. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі за рахунок включення прогнозних алгоритмів на базі штучного інтелекту, створення цифрового двійника індукційної системи та проведення дослідно-промислових випробувань на реальних виробничих лініях.

### Список використаної літератури

1. Yang B., Deng A., Li Y., Wang E. Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model. *ISIJ International*. 2022. Vol. 62, No. 4. P. 677–688. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-018>
2. Lewis C. J., Cheng E., Mehta U. M., Pandurangi A. K., Hadimani R. L. The effect of coil-to-cortex distance and induced electric field strength on resting motor thresholds in schizophrenia patients. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2023. Vol. 59, No. 11. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2023.3282784>
3. Guglielmi M., Baake E., Köppen A., Holzmann E., Herbst S., Maryamnegari S. M. Induction melting in a cold crucible furnace applied to innovative high-melting temperature metals. *Magnetohydrodynamics*. 2022. Vol. 58, No. 4. P. 523–532. <https://doi.org/10.22364/mhd.58.4.17>
4. Gupta N. K., Ganesan G., Siddhartha S., Karade S. R., Paul A. K., Dubey S., Karunakaran K. P. In situ pre-heating in wire arc additive manufacturing: design, development, and experimental investigation on residual stresses and metallurgical and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34, No. 12. P. 12256–12267. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10011-w>
5. Telo M. Foucault, Oedipus, and Virality. *sympleke*. 2022. Vol. 30, No. 1. P. 383–393. <https://doi.org/10.1353/sym.2022.0025>
6. Oh H. S., Kim D. K., Hong S. M., Ryu S. G., Park C. B., Lee J. B., Lee H. W. Anti-icing System on Railway Turnouts using Induction Heating Technology for Energy Saving. *2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. June 2022. P. 342–347. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842953>
7. Matsagopane G., Olakanmi E. O., Botes A., Kutua S. Conceptual design framework for setting up aluminum alloy powder production system for selective laser melting (SLM) process. *JOM*. 2019. Vol. 71, No. 5. P. 1840–1857. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03431-w>
8. Pascual A., Llorente S., Carretero C., Burdio J. M. Small-sized immersible water heaters for domestic induction heating technology. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 51480–51489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279131>
9. Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrysov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, No. 9 (136). P. 39–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>
10. Sarwar W., Sarwar R. Vibration control devices for building structures and installation approach: a review. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2019. Vol. 29, No. 2. P. 74–100. <https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0018>
11. Esteve V., Jordán J., Dede E. J., Martínez P. J., Ferrara K. J., Bellido J. L. Comparative analysis and improved design of LLC inverters for induction heating. *IET Power Electronics*. 2023. Vol. 16, No. 10. P. 1754–1764. <https://doi.org/10.1049/pel2.12484>

12. Plumed E., Lope I., Acero J. EMI reduction via resonator coils in glassless integrated domestic induction systems. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 128147–128156. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112587>
13. Brovko K., Budanov P., Oliinyk Yu., Vynokurova N. Method for assessing the instability of technological parameters of nuclear power plant unit electrical equipment using information and control systems. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*. 2025. Vol. 25, Issue 1. P. 73–80. <https://doi.org/10.17406/GJRE>
14. Lv H., Kang L., Wang K., Liu Y. Parametric optimization of removing iron from solid waste melts based on analysis of real-time coupled two-phase interface in an induction heating furnace // *Energy*. 2022. Vol. 261. Article ID: 125195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125195>
15. Al-Turjman F., Altrjman C., Din S., Paul A. Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview // *Computers & Electrical Engineering*. 2019. Vol. 76. P. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.013>

### References

1. Yang, B., Deng, A., Li, Y., & Wang, E. (2022). Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model. *ISIJ International*, 62(4), 677–688. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-018>
2. Lewis, C. J., Cheng, E., Mehta, U. M., Pandurangi, A. K., & Hadimani, R. L. (2023). The effect of coil-to-cortex distance and induced electric field strength on resting motor thresholds in schizophrenia patients. *IEEE Transactions on Magnetism*, 59(11), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2023.3282784>
3. Guglielmi, M., Baake, E., Köppen, A., Holzmann, E., Herbst, S., & Maryamnegari, S. M. (2022). Induction melting in a cold crucible furnace applied to innovative high-melting temperature metals. *Magnetohydrodynamics*, 58(4), 523–532. <https://doi.org/10.22364/mhd.58.4.17>
4. Gupta, N. K., Ganesan, G., Siddhartha, S., Karade, S. R., Paul, A. K., Dubey, S., & Karunakaran, K. P. (2025). In situ pre-heating in wire arc additive manufacturing: design, development, and experimental investigation on residual stresses and metallurgical and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(12), 12256–12267. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10011-w>
5. Telo, M. (2022). Foucault, Oedipus, and virality. *symploke*, 30(1), 383–393. <https://doi.org/10.1353/sym.2022.0025>
6. Oh, H. S., Kim, D. K., Hong, S. M., Ryu, S. G., Park, C. B., Lee, J. B. & Lee, H. W. (2022, June). Anti-icing system on railway turnouts using induction heating technology for energy saving. In 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) (pp. 342–347). <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842953>
7. Matsagopane, G., Olakanmi, E. O., Botes, A., & Kutua, S. (2019). Conceptual design framework for setting up aluminum alloy powder production system for selective laser melting (SLM) process. *JOM*, 71(5), 1840–1857. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03431-w>
8. Pascual, A., Llorente, S., Carretero, C., & Burdio, J. M. (2023). Small-sized immersible water heaters for domestic induction heating technology. *IEEE Access*, 11, 51480–51489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279131>
9. Budanov, P., Brovko, K., Melnykov, V., Yakymchuk, M., Kononov, V., Kyrsov, I., Nosyk, A., Karpenko, O., Kalnoy, S., & Khomiak, E. (2025). Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9 (136)), 39–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>
10. Sarwar, W., & Sarwar, R. (2019). Vibration control devices for building structures and installation approach: a review. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29(2), 74–100. <https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0018>
11. Esteve, V., Jordán, J., Dede, E. J., Martinez, P. J., Ferrara, K. J., & Bellido, J. L. (2023). Comparative analysis and improved design of LLC inverters for induction heating. *IET Power Electronics*, 16(10), 1754–1764. <https://doi.org/10.1049/pel2.12484>
12. Plumed, E., Lope, I., & Acero, J. (2021). EMI reduction via resonator coils in glassless integrated domestic induction systems. *IEEE Access*, 9, 128147–128156. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112587>
13. Brovko K., Budanov, P., Oliinyk, Y., & Vynokurova, N. (2025). Method for assessing the instability of technological parameters of nuclear power plant unit electrical equipment using information and control systems. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*, 25(1), 73–80. <https://doi.org/10.17406/GJRE>
14. Lv, H., Kang, L., Wang, K., & Liu, Y. (2022). Parametric optimization of removing iron from solid waste melts based on analysis of real-time coupled two-phase interface in an induction heating furnace. *Energy*, 261, 125195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125195>
15. Al-Turjman, F., Altrjman, C., Din, S., & Paul, A. (2019). Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview. *Computers & Electrical Engineering*, 76, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.013>

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025  
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025  
 Дата публікації: 31.12.2025