

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧЕЙ ПРИ НЕСТАБІЛЬНОМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ

В. О. Зозуля, здобувач ступеня доктора філософії

С. М. Усенко, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: v.zozulia@nubip.edu.ua

E-mail: Usenko@nubip.edu.ua

Анотація. Розроблено комплексний підхід до оцінки енергетичної ефективності індукційних печей при нестабільному електропостачанні, що інтегрує електромагнітні, термодинамічні та стохастичні моделі. Досліджено вплив флуктуацій параметрів електромережі на глибину проникнення електромагнітного поля, розподіл вихрових струмів та температурні градієнти в розплаві.

Встановлено нелінійний характер залежності потужності нагрівання від відхилень напруги та частоти струму. Розроблено математичну модель для ймовірнісної оцінки енергетичних втрат при різних типах аномалій електропостачання. Розроблено математичну модель інтегральних показників енергоефективності, включаючи коефіцієнт варіації ККД та ймовірність забезпечення мінімально допустимого рівня ефективності. Проведено феноменологічний аналіз взаємозв'язку між показниками якості електроенергії та термодинамічними характеристиками плавильного процесу.

Обґрунтовано теоретичні принципи побудови адаптивних систем керування індукційними печами на основі прогностичних моделей флуктуацій електромережі. Результати дослідження створюють теоретичний базис для розробки інтелектуальних систем керування індукційними плавильними агрегатами, здатних забезпечити оптимальний баланс між енергоефективністю та якістю продукції.

Ключові слова: індукційна піч, енергоефективність, нестабільне електропостачання, електромагнітне поле, стохастичне моделювання, адаптивне керування, металургійні процеси

Актуальність. Енергетична ефективність індукційних печей становить фундаментальну проблему сучасної металургійної галузі, особливо в умовах глобальних тенденцій до оптимізації енергоспоживання та зменшення техногенного навантаження на довкілля. Нестабільне електропостачання, спричинене коливаннями напруги в мережі, аваріями на підстанціях, періодичними

відключеннями та загальною недосконалістю інфраструктури електропостачання, створює значні виклики для стабільної роботи плавильних агрегатів. Флуктуації впливають на ефективність перетворення електроенергії в теплову, що безпосередньо позначається на якості кінцевої продукції та економічних показниках виробництва металів і сплавів.

Індукційні печі, представляючи собою високотехнологічне обладнання для плавлення металів, характеризуються складною електромагнітною взаємодією між індуктором та розплавленим металом, та надзвичайно чутливі до параметрів живлення. Традиційні підходи до оцінювання енергоефективності індукційних печей базуються на припущенні про стабільність параметрів електричної мережі та не враховують стохастичний характер змін напруги, частоти і фазових співвідношень. Відсутність адекватних математичних моделей, здатних описувати динаміку енергетичних процесів при змінних умовах електропостачання, призводить до невідповідності розрахункових та фактичних показників роботи плавильних агрегатів. Практика експлуатації індукційних печей демонструє залежність їхнього ККД від багатьох факторів: температурного режиму, частоти струму, хімічного складу шихти, тривалості плавлення, потужності установки та інших параметрів.

Перспективним напрямком видається створення гібридних моделей, які поєднують детерміністичні методи розрахунку електромагнітних та теплових полів з імовірнісними підходами до опису флуктуацій параметрів електропостачання.

Такі моделі дозволять прогнозувати енергетичні характеристики індукційних печей в умовах невизначеності та розробляти стратегії керування, спрямовані на мінімізацію негативного впливу нестабільного електропостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження енергетичної ефективності індукційних печей при нестабільному електропостачанні висвітлені в роботах багатьох науковців. Б. Дімітров [7] запропонував інноваційні схемотехнічні рішення для інверторів плавильних печей, А.В. Волошко та В.В. Шевчук [3, 4] розвинули методологію ідентифікації провалів напруги, Ю.І. Хоу [10] представив адаптивні системи керування, А. Отченасова [14] розробила методи прогнозування

несправностей, А.Ч. Морейра [13] створив модель аналізу якості електроенергії, У. Кулкарні [12] дослідив проєктування печей для плавлення кремнію. І.П. Кондратенко та А.В. Жильцов [11] здійснили внесок у розвиток електромеханічних перетворювачів індукційного типу, а В.В. Шевченко [17] запропонував інноваційну конструкцію котушки з послідовно-паралельною компенсацією для стабілізації енергетичних потоків.

Метою дослідження є розробка комплексного підходу до оцінки енергетичної ефективності індукційних печей в умовах нестабільного електропостачання для оптимізації режимів їх роботи та зниження енергоспоживання.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження ґрунтувалось на комбінуванні електромагнітного, термодинамічного та стохастичного моделювання. Використано рівняння Максвелла та метод скінченних елементів для аналізу електромагнітних процесів. Вплив флуктуацій електромережі досліджувався методами Монте-Карло та поліноміального хаосу при типових відхиленнях напруги ($\pm 5-10\%$) і частоти ($\pm 0,1-0,5$ Гц). Для оцінки енергоефективності застосовано функцію чутливості ККД та коефіцієнт варіації.

Результати досліджень та їх обговорення. Моделювання електромагнітних процесів в індукційних печах становить фундаментальну проблему сучасної електromеталургії, оскільки ефективність плавлення та якість продукції безпосередньо залежать від стабільності та передбачуваності електромагнітних явищ, що виникають під час роботи таких установок. Нестабільність параметрів електропостачання, спричинена різноманітними зовнішніми та внутрішніми факторами мережі, призводить до флуктуацій напруги, частоти, фазових співвідношень, внаслідок чого порушується робочий режим індукційних печей, змінюється характер електромагнітних процесів та знижується енергоефективність системи загалом [10]. Дослідження цих процесів потребує розробки адекватних математичних моделей, які б враховували стохастичну природу параметрів електричної мережі та дозволяли прогнозувати поведінку системи за різних режимів роботи.

Електромагнітні процеси в індукційних печах характеризуються складною взаємодією між електромагнітним полем індуктора та розплавленим металом, що описується системою рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. При формулюванні математичної моделі необхідно враховувати нелінійні властивості матеріалів, геометричну конфігурацію системи та режими електричного живлення.

Флуктуації параметрів електричної мережі вносять додаткову складність, перетворюючи детерміністичну задачу на стохастичну, де вхідні параметри моделі стають випадковими величинами з певними статистичними характеристиками [7]. Розробка математичного апарату для аналізу таких систем вимагає інтеграції класичної електродинаміки, теорії ймовірностей та методів чисельного моделювання.

Розгляд електромагнітного поля в індукційній печі базується на системі рівнянь Максвелла, що в диференціальній формі для гармонічних процесів мають вигляд:

$$\nabla \times \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{J}} + j\omega\dot{\vec{D}}, \quad \nabla \times \dot{\vec{E}} = -j\omega\dot{\vec{B}}, \quad \nabla \cdot \dot{\vec{B}} = 0, \quad \nabla \cdot \dot{\vec{D}} = 0, \quad (1)$$

де $\dot{\vec{H}}$ – комплексна напруженість магнітного поля, $\dot{\vec{E}}$ – комплексна напруженість електричного поля, $\dot{\vec{B}}$ – комплексна індукція магнітного поля, $\dot{\vec{D}}$ – комплексна індукція електричного поля, $\dot{\vec{J}}$ – комплексна густина струму, $\dot{\rho}$ – комплексна густина електричного заряду, ω - кутова частота, j - уявна одиниця.

Матеріальні рівняння доповнюють систему рівнянь Максвелла, встановлюючи зв'язок між векторами поля: $\dot{\vec{B}} = \mu\dot{\vec{H}}$, $\dot{\vec{D}} = \varepsilon\dot{\vec{E}}$, $\dot{\vec{J}} = \sigma\dot{\vec{E}}$, де μ , ε , σ – відповідно абсолютна магнітна проникність, діелектрична проникність та питома електропровідність матеріалів [13].

Особливість моделювання електромагнітних процесів у індукційних печах при флуктуючих параметрах мережі полягає в необхідності врахування випадкових змін напруги та частоти джерела живлення. Відхилення напруги від номінального значення модифікує граничні умови для електромагнітного поля, що в свою чергу впливає на розподіл індуктованих струмів у завантаженні печі. Зміна частоти

електромагнітних коливань призводить до зміни глибини проникнення електромагнітної хвилі в метал:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2)$$

де δ - глибина проникнення, яка визначає характер розподілу струмів та виділення енергії в завантаженні печі [6]. При флуктуаціях частоти змінюється не лише глибина проникнення, але й характер відбиття та поглинання електромагнітних хвиль на границях різних середовищ, що впливає на ефективність передачі енергії від індуктора до металу.

Метод скінченних елементів (МСЕ) є найбільш поширеним підходом до чисельного моделювання електромагнітних процесів у індукційних печах. Для врахування стохастичної природи параметрів електромережі МСЕ може бути інтегрований з методами Монте-Карло або поліноміального хаосу, що дозволяє оцінити статистичні характеристики вихідних параметрів моделі при заданих імовірнісних розподілах вхідних величин [3]. Моделювання нестационарних електромагнітних процесів при флуктуаціях мережі вимагає розгляду перехідних процесів у системі «генератор-індуктор-завантаження». Математично задача формулюється як початково-крайова для системи рівнянь Максвелла з відповідними граничними та початковими умовами. При цьому важливо враховувати взаємозв'язок електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів, оскільки розподіл температури впливає на електрофізичні властивості матеріалів, а індуковані електромагнітним полем сили спричиняють рух розплаву, що в свою чергу змінює умови теплообміну [12].

Теоретичні засади моделювання електричних кіл індукційних печей базуються на представленні системи еквівалентною схемою заміщення, що містить індуктивність та опір індуктора, а також відображає електромагнітний зв'язок між індуктором та завантаженням. При аналізі впливу флуктуацій мережі на роботу індукційної печі важливо враховувати нелінійну залежність параметрів схеми заміщення від частоти, температури та інших факторів. Зокрема, власна частота коливань контуру, що визначає резонансні явища в системі, може змінюватися

внаслідок флуктуацій напруги та частоти мережі, а також через зміну електрофізичних властивостей завантаження в процесі плавлення [4].

Застосування теорії автоматичного керування дозволяє розробити моделі для аналізу динамічних процесів у системах керування індукційними печами за умов нестабільного електропостачання. Аналіз стійкості таких систем може бути проведений з використанням методів Ляпунова або частотних критеріїв, модифікованих для випадку стохастичних систем [8].

Застосування спектрального аналізу для моделювання процесів у індукційних печах дозволяє визначити вплив гармонічних складових напруги та струму на ефективність нагріву. При флуктуаціях параметрів мережі змінюється спектральний склад електромагнітного поля, що впливає на розподіл потужності у завантаженні та ефективність електромагнітної взаємодії. Математичний опис цих процесів базується на представленні сигналів у вигляді рядів Фур'є або інтегралів Фур'є з подальшим аналізом амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик системи [11].

Теорія ймовірностей та математична статистика надають інструменти для кількісного оцінювання впливу флуктуацій параметрів мережі на показники роботи індукційних печей. При цьому флуктуації розглядаються як випадкові процеси з певними статистичними характеристиками, такими як математичне сподівання, дисперсія, кореляційна функція тощо. Математичні моделі, що враховують стохастичну природу параметрів, дозволяють оцінити ймовірність виходу показників якості за допустимі межі та розробити стратегії керування, спрямовані на мінімізацію негативного впливу флуктуацій [5]. Актуальним напрямком досліджень є розробка гібридних моделей, що поєднують детерміністичні та стохастичні підходи до опису електромагнітних процесів у індукційних печах.

Комбінований підхід до моделювання, що інтегрує методи теоретичного аналізу з експериментальними дослідженнями, дозволяє створювати адекватні математичні моделі електромагнітних процесів у індукційних печах при флуктуаціях параметрів мережі. При цьому теоретичні моделі верифікуються та коригуються на основі експериментальних даних, що підвищує їх точність та

практичну цінність. Застосування сучасних методів ідентифікації параметрів моделей за експериментальними даними дозволяє враховувати індивідуальні особливості конкретних індукційних установок та умов їх експлуатації [1].

1. Типові флуктуації параметрів електричної мережі та їх вплив на роботу індукційних печей

Тип флуктуації	Характеристика	Вплив на електромагнітні процеси	Вплив на технологічний процес
Короткочасні провали напруги	Зниження напруги на 10-30 % тривалістю 0,01-1 с	Зменшення напруженості магнітного поля, порушення резонансного режиму	Нестабільність температурного режиму плавлення
Довготривалі відхилення напруги	Відхилення напруги на $\pm 5-10$ % тривалістю понад 1 хв	Зміна потужності нагріву, зміщення точки резонансу	Зміна швидкості нагріву металу, порушення графіку плавлення
Коливання частоти	Відхилення частоти на $\pm 0,1-0,5$ Гц	Зміна глибини проникнення електромагнітного поля, зміна імпедансу системи	Зміна інтенсивності електромагнітного переміщення розплаву
Несиметрія напруги	Різниця амплітуд фазних напруг понад 2 %	Нерівномірний розподіл струмів у системі, додаткові втрати	Нерівномірний нагрів завантаження
Гармонічні спотворення	Наявність вищих гармонік з амплітудою понад 5 % від основної	Додаткові втрати на вихрові струми, несинусоїдальність магнітного поля	Додатковий нагрів індуктора, зниження ефективності передачі енергії

Джерело: складено автором на основі [5, 9].

Оцінювання енергетичної ефективності індукційного нагрівання при стохастичних змінах режимів електропостачання вимагає розробки комплексного математичного апарату, що охоплює електромагнітні, термодинамічні та ймовірнісні аспекти. Енергетична ефективність процесу визначається коефіцієнтом

корисної дії, який при флуктуаціях параметрів мережі стає випадковою величиною [3].

Математичне формулювання ККД при стабільному електропостачанні представляється як:

$$\eta = \frac{P_{\text{loan}}}{P_{\text{input}}} = \frac{\int v p_{\text{loan}}(r, t) dV}{\int v p_{\text{input}}(r, t) dV}, \quad (3)$$

де η - коефіцієнт корисної дії, P_{loan} – корисна потужність, що виділяється в завантаженні, P_{input} – загальна вхідна потужність. При стохастичних змінах режимів електропостачання наведена формула трансформується, оскільки потужності стають випадковими функціями часу. Стохастичний підхід базується на представленні параметрів електропостачання як випадкових процесів. Напруга мережі моделюється як:

$$U(t) = U^0 + \Delta U(t), \quad (4)$$

де U^0 – номінальне значення напруги, $\Delta U(t)$ – випадкова складова. Енергетична ефективність стає функцією випадкових змінних, що потребує застосування теорії ймовірностей. Для кількісного оцінювання впливу стохастичних змін на ефективність використовуються статистичні характеристики ККД. Математичне сподівання ККД обчислюється як:

$$E[\eta] = \int \eta(\omega) dP(\omega) \quad (5)$$

де η - простір елементарних подій, P - ймовірнісна міра. На практиці вказане рівняння розв'язується методом Монте-Карло через багаторазове моделювання з різними реалізаціями випадкових параметрів. Метод поліноміального хаосу дозволяє апроксимувати залежність між випадковими вхідними параметрами та ККД за допомогою розкладу в ряд за ортогональними поліномами. Використання методу забезпечує аналітичне представлення для статистичних моментів без проведення численних експериментів. Теорія чутливості надає інструменти для аналізу впливу варіацій параметрів на енергетичну ефективність. Функція чутливості ККД визначається як:

$$S^p_n = \frac{\partial \eta}{\partial p}, \quad (6)$$

де S_p^n – коефіцієнт чутливості ККД η до зміни параметра p , $\frac{\partial \eta}{\partial p}$ – частинна похідна ККД по параметру p .

Зазначена величина показує зміну ККД при малих змінах параметра p . Методи глобального аналізу чутливості дозволяють ранжувати параметри за впливом на ефективність. Для практичного застосування використовується коефіцієнт варіації ККД:

$$CV_n = \frac{\sigma_n}{E[\eta]}, \quad (7)$$

де σ_n – середньоквадратичне відхилення ККД, $E[\eta]$ – математичне сподівання ККД.

Метод поліноміального хаосу дозволяє апроксимувати залежність між випадковими вхідними параметрами та ККД за допомогою розкладу в ряд за ортогональними поліномами. Використання методу забезпечує аналітичне представлення для статистичних моментів без проведення численних експериментів [13].

Теорія чутливості надає інструменти для аналізу впливу варіацій параметрів на енергетичну ефективність. Функція чутливості ККД визначається як:

$$S_p = \frac{\partial \eta}{\partial p}, \quad (8)$$

де S_p – коефіцієнт чутливості ККД η до зміни параметра p , $\frac{\partial \eta}{\partial p}$ – частинна похідна ККД по параметру p .

Зазначена величина показує зміну ККД при малих змінах параметра p . Методи глобального аналізу чутливості дозволяють ранжувати параметри за впливом на ефективність [4].

Для практичного застосування використовується коефіцієнт варіації ККД:

$$CV_n = \frac{\sqrt{Var[\eta]}}{E[\eta]}, \quad (9)$$

де $Var[\eta]$ – дисперсія ККД, $E[\eta]$ – математичне сподівання ККД.

Малі значення CV_n свідчать про високу стабільність енергетичної ефективності при флуктуаціях параметрів [8]. Альтернативний підхід оцінює ймовірність того, що ККД не опуститься нижче критичного рівня $\eta_{кр}$:

$$P(\eta \geq \eta_{кр}) = 1 - F_n(\eta_{кр}), \quad (10)$$

де F_n - функція розподілу ймовірностей ККД [6].

Моделювання динамічних режимів нагріву потребує розв'язання стохастичних диференціальних рівнянь:

$$dX(t) = f(X(t), U(t), t)dt + g(X(t), U(t), t)dW(t), \quad (11)$$

де $X(t)$ – вектор стану системи, $U(t)$ – вектор параметрів електропостачання, $W(t)$ – вінерівський процес [12]. Результати розв'язання дозволяють отримати траєкторії зміни характеристик системи для обчислення показників ефективності.

Аналіз електричних режимів індукційних печей базується на представленні системи еквівалентним колом з випадковими параметрами. Рівняння Кірхгофа з випадковими коефіцієнтами дозволяють визначити струми, напруги та потужності, враховуючи нелінійності, такі як насичення магнітопроводу [10].

Аналіз електричних режимів індукційних печей базується на представленні системи еквівалентним колом з випадковими параметрами. Рівняння Кірхгофа з випадковими коефіцієнтами дозволяють визначити струми, напруги та потужності, враховуючи нелінійності, такі як насичення магнітопроводу [10].

Теорія оптимального керування забезпечує розробку стратегій, що максимізують енергетичну ефективність при стохастичних змінах. Задача формулюється як мінімізація функціоналу:

$$J = E \left[\int^t L_t^0(X(t), u(t), t)dt + \Phi(X(t^f)) \right], \quad (12)$$

де $u(t)$ – керуючі впливи, L - функція миттєвих втрат, Φ - термінальний функціонал. Отримане розв'язання забезпечує стратегію, що максимізує математичне сподівання ефективності при заданих обмеженнях.

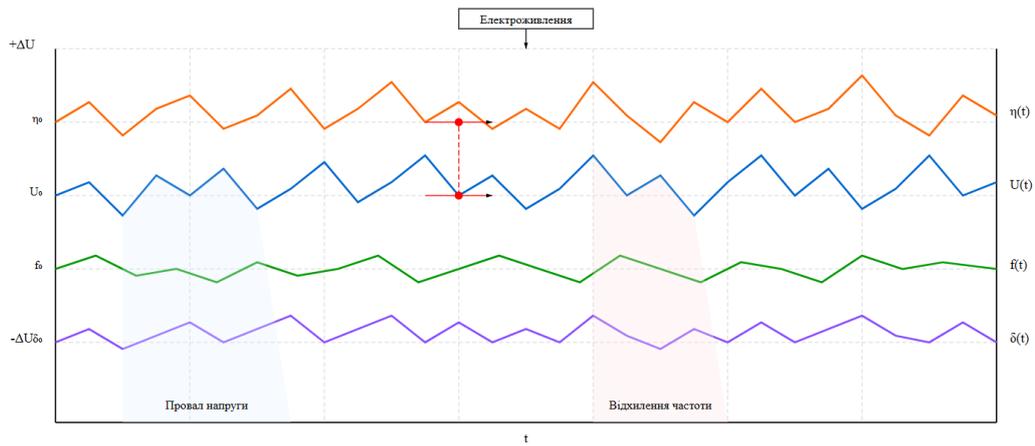


Рисунок. Формалізована модель зв'язку енергоефективності індукційної печі з параметрами нестабільного електропостачання

На рисунку зображено формалізовану модель зв'язку енергоефективності індукційної печі з параметрами нестабільного електропостачання, де по осі абсцис відкладено час t , а по осі ординат - відхилення напруги $\pm\Delta U$, показники ККД $\eta(t)$, напруги $U(t)$, частоти $f(t)$ та температури $\theta(t)$ з виділеними областями провалу напруги та відхилення частоти.

Флуктуації напруги електромережі (ΔU) відносно номінального значення (U_0) призводять до пропорційних змін напруженості магнітного поля та, відповідно, до квадратичних змін потужності тепловиділення, оскільки питома потужність джоулевих втрат пропорційна квадрату напруженості електричного поля ($P \sim |E|^2$). При короткочасних провалах напруги на 10-20 % потужність нагріву знижується на 19-36 %, що порушує тепловий баланс системи і може призвести до неоднорідності температурного поля в розплаві.

Коливання частоти живлення ($\pm\Delta f$) мають особливий вплив на глибину проникнення електромагнітного поля ($\delta = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma}$), яка визначає просторовий розподіл вихрових струмів та інтенсивність електромагнітного перемішування розплаву. При зниженні частоти глибина проникнення збільшується, що призводить до більш рівномірного розподілу джерел тепла в об'ємі металу, але зменшує поверхневий ефект і, відповідно, інтенсивність циркуляційного руху розплаву. При підвищенні частоти спостерігається протилежний ефект – зменшення глибини

проникнення, концентрація джерел тепла в поверхневому шарі металу, що може призвести до локальних перегрівів та погіршення умов тепломасообміну.

Наявність гармонічних спотворень та несиметрії фаз у живленні індукційної печі викликає додаткові ускладнення в електромагнітних процесах. Вищі гармоніки створюють власні електромагнітні поля з різними глибинами проникнення та напрямками індукованих струмів, що призводить до нерівномірного нагріву металу та додаткових втрат у системі. Комплексний аналіз впливу нестабільності електропостачання на енергоефективність індукційних печей вимагає врахування всіх цих факторів та їх взаємодії, що може бути досягнуто через інтеграцію електромагнітних, термодинамічних та стохастичних моделей, як показано на схемі.

Висновки і перспективи. У роботі сформовано комплексний підхід до оцінки енергетичної ефективності індукційних печей при нестабільному електропостачанні, який інтегрує електромагнітні, термодинамічні та стохастичні моделі. Підхід дозволяє виявити закономірності впливу флуктуацій параметрів електромережі на енергоефективність плавильного процесу та оптимізувати режими роботи плавильних агрегатів.

Теоретичний аналіз взаємодії електромагнітного поля індукційної печі з нестабільними параметрами живлення показує, що відхилення напруги призводить до нелінійної зміни потужності нагрівання, а коливання частоти впливають на глибину проникнення електромагнітного поля та ефективність перемішування розплаву, що визначає рівномірність нагріву та якість готового металу. Запропонований підхід для ймовірнісної оцінки енергетичних втрат при різних типах аномалій електропостачання дозволяє розрахувати не тільки середні показники ефективності, але й оцінити коефіцієнт варіації ККД та ймовірність забезпечення мінімально допустимого рівня енергоефективності при заданих статистичних характеристиках електричної мережі.

Підхід до оцінювання енергетичної ефективності індукційних печей враховує вплив нестабільності електропостачання на термодинамічні характеристики плавильного процесу, структуру та якість металу, що дозволяє оптимізувати

технологічні режими та мінімізувати негативний вплив мережевих аномалій на кінцеву продукцію.

Запропоновано підхід до побудови адаптивних систем керування індукційними печами на основі моделей флуктуацій електромережі, що може сприяти підвищенню енергоефективності та зниженню питомих витрат електроенергії в умовах нестабільності електропостачання.

Запропонований комплексний підхід до оцінки енергоефективності індукційних печей може сприяти економії електроенергії при нестабільному електропостачанні без зниження якості кінцевої продукції.

Феноменологічний зв'язок між показниками якості електроенергії та термодинамічними характеристиками плавильного процесу має нелінійний характер і залежить від режиму роботи печі, фази технологічного процесу та складу металу, що вимагає застосування гібридних моделей для адекватного опису функціонування системи. Запропонований підхід може стати основою для розробки нових систем керування індукційними плавильними агрегатами, здатних функціонувати в умовах нестабільної енергосистеми та забезпечувати баланс між енергоефективністю та якістю продукції.

Список використаних джерел

1. Волошко А. В., Бедерак Я. С., Шевчук В. В. Перевірка подібності та однотипності добових графіків електричного навантаження промислових підприємств. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2021. № 3. С. 57-63. ISSN 1813-5420.
2. Волошко А. В., Джеря Т. Е., Шевчук В. В. Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. InterConf: зб. наукових праць 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Recent scientific investigation" (Осло, 26-28 квітня 2022 р.). Oslo, 2022. № 106. С. 369-376.
3. Волошко А. В., Шевчук В. В. Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. С. 145-149. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>
4. Волошко А. В., Шевчук В. В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик. Вісник ВПІ. 2023. Вип. 5. С. 12-17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>.
5. Джеря Т. Е., Шевчук В. В. Прогнозування споживання електроенергії за допомогою нейронних мереж. Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наукових праць. 2023. Т. 2, № 72. С. 42-44. ISSN 2073-7394.

6. Cheema M. B., Hasnain S. A., Ahsan M. M., Umer M., Ahmad G. Comparative analysis of SPWM and square wave output filtration based pure sine wave inverters. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rome, 2015. P. 38-42. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165289>
7. Dimitrov B., Hayatleh K., Barker S., Collier G. Design, Analysis and Experimental Verification of the Self-Resonant Inverter for Induction Heating Crucible Melting Furnace Based on IGBTs Connected in Parallel. *Electricity*. 2021. Vol. 2, № 4. P. 439-458. <https://doi.org/10.3390/electricity2040026>
8. Dzheria T., Shevchuk V., Voloshko A. V. Power Quality Monitoring System for electrical networks. In *Studies in systems, decision and control*. 2022. P. 215-234. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_10
9. Hassaine L., Mraoui A. Control Strategy based on SPWM Switching Patterns for Grid Connected Photovoltaic Inverter. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1814, № 1. P. 020031. <https://doi.org/10.1063/1.4976250>
10. Hou Y. J., Tian H. M., Qu X. D., Teng J. Z., Liu G. X., Li Y. Development of digital control system for medium frequency induction furnaces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 188. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/188/1/012005>
11. Kondratenko I.P., Zhylytsov A.V., Pashchyn N.A., Vasyuk V.V. Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Technical Electrodynamics*. 2017. No. 5. P. 83-88.
12. Kulkarni U., Jadhav S., Magadam M. Design and Control of Medium Frequency Induction Furnace for Silicon Melting. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 2014. Vol. 3, № 4. P. 105-109.
13. Moreira A. C., da Silva L. C. P., Paredes H. K. M. Electrical modelling and power quality analysis of three-phase induction furnace. 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bucharest, 2014. P. 415-419. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842822>
14. Otcenasova A., Bodnar R., Regula M., Hoger M., Repak M. Methodology for Determination of the Number of Equipment Malfunctions Due to Voltage Sags. IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2016. P. 401. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555685>
15. Papaika Y., Lysenko O., Kosobudzki G. Power quality and resonances in power supply systems with non-sinusoidal loads. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 25. P. 143-150.
16. Patil D. D., Ghatge D. A. Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry - A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, спец. вип. 1. P. 159-163. <https://doi.org/10.17148/IARJSET/NCDMETE.2017.36>
17. Shevchenko V., Husev O., Pakhaliuk B., Karlov O., Kondratenko I. Coil design for wireless power transfer with series-parallel compensation. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). IEEE, 2019. P. 401-407.

References

1. Cheema, M. B., Hasnain, S. A., Ahsan, M. M., Umer, M., & Ahmad, G. (2015). Comparative analysis of SPWM and square wave output filtration based pure sine wave inverters. In IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 38-42. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165289>
2. Dimitrov, B., Hayatleh, K., Barker, S., & Collier, G. (2021). Design, Analysis and Experimental Verification of the Self-Resonant Inverter for Induction Heating Crucible Melting Furnace Based on IGBTs Connected in Parallel. *Electricity*, 2(4), 439-458. <https://doi.org/10.3390/electricity2040026>
3. Dzheria, T. E., & Shevchuk, V. V. (2023). Forecasting electricity consumption using neural networks. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 2(72), 42-44.
4. Dzheria, T., Shevchuk, V., & Voloshko, A. V. (2022). Power Quality Monitoring System for electrical networks. In *Studies in systems, decision and control*, 215-234. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_10
5. Hassaine, L., & Mraoui, A. (2017). Control Strategy based on SPWM Switching Patterns for Grid Connected Photovoltaic Inverter. *AIP Conference Proceedings*, 1814(1), 020031. <https://doi.org/10.1063/1.4976250>
6. Hou, Y. J., Tian, H. M., Qu, X. D., Teng, J. Z., Liu, G. X., & Li, Y. (2018). Development of digital control system for medium frequency induction furnaces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 188, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/188/1/012005>
7. Kondratenko, I. P., Zhylytsov, A. V., Pashchyn, N. A., & Vasyuk, V. V. (2017). Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Technical Electrodynamics*, 5, 83-88.
8. Kulkarni, U., Jadhav, S., & Magadum, M. (2014). Design and Control of Medium Frequency Induction Furnace for Silicon Melting. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 3(4), 105-109.
9. Moreira, A. C., da Silva, L. C. P., & Paredes, H. K. M. (2014). Electrical modelling and power quality analysis of three-phase induction furnace. In 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 415-419. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842822>
10. Otcenasova, A., Bodnar, R., Regula, M., Hoger, M., & Repak, M. (2016). Methodology for Determination of the Number of Equipment Malfunctions Due to Voltage Sags. In IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 401. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555685>
11. Papaika, Y., Lysenko, O., & Kosobudzki, G. (2017). Power quality and resonances in power supply systems with non-sinusoidal loads. *Advanced Engineering Forum*, 25, 143-150.
12. Patil, D. D., & Ghatge, D. A. (2017). Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry - A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(1), 159-163. <https://doi.org/10.17148/IARJSET/NCDMETE.2017.36>
13. Shevchenko, V., Husev, O., Pakhaliuk, B., Karlov, O., & Kondratenko, I. (2019). Coil design for wireless power transfer with series-parallel compensation. In 2019

IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 401-407).

14. Voloshko, A. V., & Shevchuk, V. V. (2023). Identyfikatsiia ta klasyfikatsiia odnofaznykh provaliv napruhy za metodolohiiu prostorovoho vektoru kutovoi chastoty [Identification and classification of single-phase voltage sags according to the spatial vector of angular frequency methodology]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 4, 145-149. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>

15. Voloshko, A. V., & Shevchuk, V. V. (2023). Provaly napruhy v elektrychnykh merezhakh ta vyznachennia yikhnikh kharakterystyk [Voltage sags in electrical networks and determination of their characteristics]. *Visnyk VPI*, 5, 12-17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>

16. Voloshko, A. V., Bederak, Ya. S., & Shevchuk, V. V. (2021). Perevirka podibnosti ta odnotypnosti dobovykh hrafikiv elektrychnoho navantazhennia promyslovykh pidpriemstv [Verification of similarity and uniformity of daily electrical load schedules of industrial enterprises]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 3, 57-63.

17. Voloshko, A. V., Dzheria, T. E., & Shevchuk, V. V. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. In *InterConf: Zbirnyk naukovykh prats 5-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Recent scientific investigation"*, 106, 369-376.

COMPREHENSIVE APPROACH TO ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF INDUCTION FURNACES UNDER UNSTABLE POWER SUPPLY

V. Zozulia, S. Usenko

Abstract. *A comprehensive approach to evaluating the energy efficiency of induction furnaces under unstable power supply has been developed, integrating electromagnetic, thermodynamic, and stochastic models. The influence of power grid parameter fluctuations on electromagnetic field penetration depth, eddy current distribution, and temperature gradients in the melt has been investigated.*

The nonlinear nature of heating power dependence on voltage and frequency deviations has been established. A mathematical model for probabilistic assessment of energy losses under various types of power supply anomalies has been formulated. A methodology for calculating integral energy efficiency indicators has been developed, including the coefficient of variation of efficiency and the probability of ensuring a minimum acceptable efficiency level. A phenomenological analysis of the relationship between power quality indicators and thermodynamic characteristics of the melting process has been conducted. Theoretical principles for constructing adaptive control systems for induction furnaces based on predictive models of power grid fluctuations have been substantiated. The research results create a theoretical basis for developing intelligent control systems for induction melting units capable of ensuring an optimal balance between energy efficiency and product quality.

Key words: *induction furnace, energy efficiency, unstable power supply, electromagnetic field, stochastic modeling, adaptive control, metallurgical processes*