

УДК 620.179.14

**ВИХОРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ В
ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ОБЖИГУ КЛІНКЕРА**

В.В. СЕБКО

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.Г. ЗДОРЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

А.М. НЗИОКА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Отримано нові універсальні функції перетворювання теплового трансформаторного вихорострумowego датчика (ТВД) зі зразком портландцементного клінкера, на основі яких було досліджено вихорострумний метод вимірювального контролю двох корелюючих між собою параметрів: питомого електричного опору ρ , та температури t у діапазоні змінення температур від 20 до 150°C. Наведено основні співвідношення, що описують вимірювальний контроль температури t зразка у діапазоні від 200 до 1000°C

На теперішній час найважливішим компонентом розвитку будівельної галузі є збільшення виробництва цементу та інших в'язучих матеріалів. Властивості портландцементу, як в'язучого матеріалу, обумовлені властивостями мінералів, з яких він складається [1]. Одним із найважливіших процесів при виробництві портландцементу є випал тонкоподрібненої та добре гомогенізованої сировинної суміші заданого складу в спеціальних випалювальних агрегатах [1]. В результаті такого випалювання отримується цементний клінкер, який містить в основному вапно, кремнезем, глинозем, окис заліза (яке міститься в суміші у вигляді силікатів і алюмінатів) [1,2]. Утворенню кінцевого продукту передують ціла низка фізико-хімічних та теплотехнічних процесів, які протікають у визначених температурних межах. Наприклад, при вологому способі виробництва портландцементного клінкера використовуються температурні діапазони від 20°C до 150°C і від 200°C до 1000°C. Таким чином, підвищення точності вимірювального контролю температури при випалюванні сировинної суміші призводить до підвищення якості портландцементного клінкера. Тому існує важлива науково-практична проблема підвищення якості виготовлення цементу, яку можливо вирішити за рахунок підвищення вірогідності вимірювального контролю температури t при випалюванні клінкера, так як в залежності від часу перебування клінкера при високих температурах, а також швидкості його охолодження кристали мають різні розміри, а кристалічна структура клінкера, в свою чергу, впливає на міцнісні показники кінцевого продукту [1,2].

Об'єкти та методи дослідження

Вірогідність контролю визначається її інструментальною та методичною складовими, причому інструментальна складова підвищується при зменшенні похибок вимірювання параметрів, що контролюються [3]. При цьому зниження значень похибок вимірювань досягається за рахунок, наприклад, удосконалення схем включень перетворювачів температури. В цій статті буде розглянуто використання трансформаторного вихорострумowego датчика (ТВД) для вимірювального контролю температури при випалюванні клінкера. Реалізація двохпараметрових вихорострумowych методів вимірювального контролю питомого електричного опору ρ та температури t клінкера на базі теплових

ТВД буде здійснюватись при дослідження двох температурних діапазонів - від 20 до 150°С та від 200 до 1000°С.

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження можливості застосування теорії роботи теплових ТВД при вимірювальному контролі температури t в технологічному процесі випалювання клінкеру. При зменшенні похибки вимірювань за допомогою удосконалення схеми включення теплового ТВД, можливо збільшення інструментальної складової вірогідності контролю, а, відповідно, і загальної вірогідності контролю, яка визначається за формулою [3]:

$$D = D_u \cdot D_m, \quad (1)$$

де D_u – інструментальна складова вірогідності контролю; D_m – методична складова вірогідності контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– отримати нові універсальні функції перетворення теплового ТВД із пробою портландцементного клінкеру, на основі яких провести дослідження вихорострумowego методу вимірювального контролю двох параметрів, які корельовані між собою: питомого електричного опору ρ_t та температури t в діапазоні температур от 20 до 150°С;

– отримати основні співвідношення, які описують вимірювальний контроль температури в діапазоні від 200 до 1000°С при імітації процесу випалювання портландцементного клінкеру.

Результати та їх обговорення

Інформативними параметрами теплового ТВД є амплітуда та фаза вихідного сигналу [4–8]. При цьому за допомогою теплового ТВД імітуються окремі фази обжигу клінкеру в двох температурних режимах - від 20 до 150°С та від 200 до 1000°С. Підвищення вірогідності вихорострумowego контролю та точності вимірювання температури t дозволяє підвищити якість портландцементного клінкеру. В роботах [4–6] розглянуті абсолютні та диференційні вихорострумові методи контролю геометричних та електричних параметрів немагнітних циліндричних виробів. В цих роботах введений комплексний параметр N , який характеризує питому нормовану ЕРС ТВД та отримані залежності, які зв'язують параметр N и його фази $\varphi_{\text{внт}}$ з узагальненим магнітним параметром x , тобто. $N = f(x)$ и $\varphi_{\text{внт}} = f(x)$ [4–6]. В роботах [7,8] було введено параметр N_{yt} , який характеризує питому нормовану термозалежну ЕРС, обумовлену магнітним потоком Φ_2 , який проходить скрізь квадратну одиничну площадку зі стороною, яка дорівнює глибині проникнення магнітного поля δ [7,8]:

$$N_{yt} = Nx_t^2, \quad (2)$$

де x_t – залежний від температури узагальнений магнітний параметр.

При цьому вирази для параметра N_t та його фази $\varphi_{\text{внт}}$ з урахуванням результатів робіт [4–8], мають наступний вигляд:

$$N_t = \frac{E_{\text{внт}} a_\delta}{E_0 a^2} \sqrt{(1 - K_t \cos \varphi_t)^2 + (K_t \sin \varphi_t)^2}, \quad (3)$$

де індекс t визначає, що дана величина є термозалежною;

$E_{\text{внт}}$ – різниця ЕРС теплового ТВД;

E_0 – ЕРС ТВД без контрольованого зразка;

a – радіус проби клінкеру, яка поміщується в тепловий ТВД;

a_0 – радіус теплового ТВД;

K_t – параметр, зв’язаний з аргументами модифікованих функцій Беселя [4–8].

Запишемо аналітичний вираз для визначення $\text{tg} \varphi_{\text{внт}}$ [4–8]

$$\text{tg} \varphi_{\text{внт}} = \frac{K_t \sin \varphi_t}{1 - K_t \cos \varphi_t} \quad (4)$$

Вираз для параметру N_{yt} має наступний вигляд:

$$N_{yt} = \frac{x^2 E_{\text{внт}} a_0^2}{E_0 a^2} \sqrt{(1 - K_t \cos \varphi_t)^2 + K_t \sin \varphi_t} \quad (5)$$

Будемо використовувати залежності нормованих амплітуд N_t та N_{yt} від кута зсуву фаз $\varphi_{\text{внт}}$, при цьому сигнали теплового ТВД N_t , N_{yt} та $\varphi_{\text{внт}}$ залежать від температури зразка, що контролюється. Залежності функцій перетворення теплового ТВД із зразком поргланцементного клінкеру $N_t = f(\varphi_{\text{внт}})$ и $N_{yt} = f(\varphi_{\text{внт}})$ приведені в таблицях 1 та 2. Температурні точки $t = 80^\circ\text{C}$, 150°C , 180°C відповідають чисельним значенням узагальненого параметра x_t : $x_t = 0,7$; $0,6$; $0,5$ для залежності $N_t = f(\varphi_{\text{внт}})$. Температурні точки на універсальній функції перетворення теплового ТВД $N_{yt} = f(\varphi_{\text{внт}})$, відповідають чисельним значенням узагальненого параметра $x_t = 1,4$; $1,3$; $1,2$.

Таблиця 1. Залежності нормованої ЕРС N_t та фазового кута $\varphi_{\text{внт}}$ від температури t

x	N_t	$\varphi_{\text{внт}}$	t
0,7	0,061503	85,296	80
0,6	0,045318	86,536	150
0,5	0,031559	87,588	180

Таблиця 2. Залежності нормованої ЕРС N_{yt} та фазового кута $\varphi_{\text{внт}}$ від температури t

x	N_{yt}	$\varphi_{\text{внт}}$	t
1,4	0,458467	71,912	80
1,3	0,345674	74,252	150
1,2	0,253827	76,474	180

При проведенні контролю слід враховувати, що температура навколишнього середовища впливає на результати вимірювань, так як обмотка ТВД змінює свій опір і в результаті цього відбувається зміна значення струму I_n та магнітного потоку Φ_2 . Стабілізація струму I_n дає можливість

виключити джерело похибки, яке обумовлено впливом температури навколишнього середовища, а також джерело похибки, яке обумовлено нагрівом ТВД, внаслідок якого через тонкий каркас та повітряний зазор нагрівається зразок, що контролюється. Крім того, необхідно провести термоізоляцію датчика від впливу навколишнього середовища (рядкова укладка витків на каркас, просочування лаком або клеєм БФ2 або БФ4). Після цього котушки ТВД обмотуються кіперною стрічкою та також просочуються лаком або клеєм. Потім для створення монолітної структури ця конструкція спікається у муфельній пічці, при цьому застосовується фарфоровий каркас ТВД. Вихорові струми також можуть розігрівати виріб, тому необхідно обмежувати напруженість зовнішнього однорідного магнітного поля величиною $H_0 = 200$ А/м. Слід відзначити, що зміщення зразка клінкера по радіусу не впливає на результати вимірювань, оскільки магнітне поле ТВД є однорідним. Перекуси зразка обмежені нагрівачем всередині ТВД (перекіс зразка в межах ± 5 град. не впливає на результати вимірювань). При дослідженні зразка клінкера, відношення довжини зразка до його діаметру повинно складати 10 або більше.

Таким чином, стабілізація струму I_n за рахунок використання в схемі включення теплового ТВД баретера, дозволяє суттєво знизити похибки, зв'язані з впливом температури навколишнього середовища, а також температури самого датчика, що призводить до підвищення інструментальної складової вірогідності контролю. На рисунку подана функціональна схема включення теплового ТВД із зразком портландцементного клінкера. Схема містить: тепловий ТВД із зразком (З), джерело живлення (Д) змінного струму, вимірювач частоти (ВЧ), осцилограф (ОС), вимірювач ЕРС ТВД $E_{\text{вт}}$ (В₂), вимірювач ЕРС ТВД без зразка E_0 (В₁), самописець із стробоскопічним пристроєм (С), вимірювач кута фазового зсуву (ВФ), опорний вихорострумний датчик (ОД), компенсаційний вихорострумний датчик (КД), робочий вихорострумний датчик (РД) (при цьому РД, КД і ОД є ідентичними). Первинні обмотки РД, КД і ОД включені послідовно-згідно, а вторинні обмотки - послідовно-зустрічно. КД призначений для повної компенсації ЕРС ТВД E_0 при відсутності в ньому зразка, що контролюється. Для стабілізації струму використовується баретер (Б), повна компенсація ЕРС E_0 підвищує вірогідність контролю температури за рахунок збільшення інструментальної складової (зменшення похибок, зв'язаних з недокомпенсацією та перекомпенсацією). В схемі передбачений нагрів зразка клінкера нагрівальним пристроєм НП. В якості контрольного пристрою вимірювання температури використовуються термопари ТХК, при цьому вимірюються середні значення температури двох термопар. Проба портландцементного клінкера розташована у скляній кварцовій трубці.

Таким чином, при частоті $f_t = 20$ КГц, знаючі геометричні параметри ТВД та скляної кварцової трубки, визначивши параметри $E_{\text{вт}}, E_0$ та $\varphi_{\text{вт}}$, скориставшись функцією перетворення N_t від $\varphi_{\text{вт}}$, визначасмо залежний від температури параметр N_t . Далі по залежності $N_{yt} = f(\varphi_{\text{вт}})$, знаходимо нормовану ЕРС теплового ТВД N_{yt} . Електричний параметр (питомий електричний опір ρ_t), який корельований з температурою t , визначають за виразом:

$$\rho_t = \frac{2\pi \cdot f_t \cdot E_{\text{вт}} \cdot a_0^2 \cdot \mu_0}{x_t^2 \cdot N_t \cdot E_0} \quad (6)$$

Температуру t зразка портландцементного клінкера, знаходять із виразу:

$$t = \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) \left(\frac{2\pi \cdot f_t \cdot E_{внт} \cdot a_\delta^2 \cdot \mu_0}{x_t^2 \cdot N_t \cdot E_0 \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1. \quad (7)$$

де t_1 – початкова температура;

ρ_1 – питомий електричний опір при початковій температурі;

α – температурний коефіцієнт опору (ТКО) зразка. В даному випадку використовується наступна залежність питомого електричного опору ρ_t від температури t :

$$\frac{\rho_t}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1) \quad (8)$$

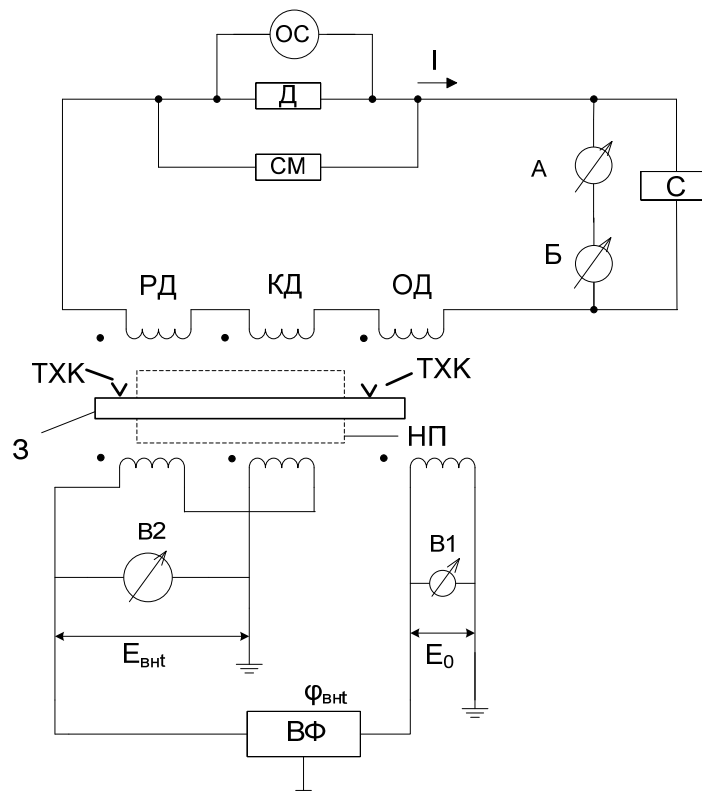


Схема включення теплового ТВД для вимірювального контролю температури зразка
портландцементного клінкеру

При частотах 1 – 1,5 МГц користуємось такими ж функціями перетворення для визначення значень нормованих амплітуд N_t та N_{yt} теплового ТВД, як і в попередньому випадку, а потім визначаємо питомий електричний опір ρ_t та температуру t за виразами:

$$\rho_t = \frac{4\pi \cdot f \cdot E_{внт} \cdot d_\delta^2 \cdot \mu_0}{x_t^4 \cdot E_0}, \quad (9)$$

$$t = \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) \left(\frac{4\pi \cdot f \cdot E_{внт} \cdot d_\delta \cdot \mu_0}{\rho_1 \cdot x_t^4 \cdot E_0} - 1 \right) + t_1. \quad (10)$$

Для вимірювального контролю температур в діапазоні від 200 до 1000°C, який використовується в робочих зонах випалювальних агрегатів (наприклад, зона випаровування вологи, підігріву та дегідратації, зона декарбонізації і др.), пропонується використовувати алгебраїчний поліном четвертого ступеня (залежність питомого електричного ρ_t від температури t :

$$\rho_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4, \quad (11)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коефіцієнти ступеневих рядів.

Температуру з діапазону випалювання клінкеру, що досліджується, визначаємо з виразу:

$$t = \left(\frac{1 + \alpha t_n}{\alpha} \right) \left(\frac{a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4}{\rho_n} - 1 \right) + t_n, \quad (12)$$

де t_n – початкова температура робочої зони випалювального агрегату,

ρ_n – питомий електричний опір при температурі t_n .

Для здійснення контролю температури в діапазоні 200...1000°C необхідно застосовувати нову технологію виготовлення перетворювача та нагрівача. Необхідно застосовувати жароміцні каркаси, виготовлені з склотекстоліту. Крім того, необхідно застосовувати спеціальну жаростійку ізоляцію витків намагнічуючої та вимірювальної обмоток теплових ТВД на основі коротких фарфорових трубок та скловуглецевих змазок. Нагрівач повинен забезпечувати нагрів зразків до температури 1000°C. Для контрольованого вимірювання температури необхідно використовувати термопари хромель-алюмель ТХА з діапазоном вимірювання температури 200...1000°C.

Дослідження в області застосування теплових безконтактних вихорострумів датчиків для різних температурних діапазонів в технологічному процесі випалу клінкеру мають велике теоретичне та практичне значення, так як від правильної організації процесу спалювання теплоносіїв та подальшого використання тепла залежать як витрати тепла, так і якість готового клінкеру. Таким чином, ці дослідження є актуальними з теплотехнічної та технологічної точок зору.

При використанні діапазону від 20 до 150°C інструментальну складову вірогідності контролю збільшують за рахунок зменшення методичної складової основної похибки вимірювань при повній компенсації ЕРС E_0 та стабілізації намагнічуючого струму I_n . Це реалізовано в схемі на рис. 1, за рахунок використання компенсаційного датчика КД та стабілізації струму за допомогою баретера Б. Зменшити основну похибку дозволяє і термоізоляція самого датчика та його обмоток (додаткова та систематична складові основної похибки вимірювань). Автоматизація процесу вимірювального контролю для діапазону температур від 200 до 1000°C дозволяє зменшити випадкову складову похибки вимірювань. Подальше підвищення інструментальної складової вірогідності контролю D_u можливо за рахунок лінеаризації функції перетворення вимірювальних перетворювачів, визначення часткових екстремумів функції перетворення (реалізація екстремальних методів) та мінімізації коефіцієнтів впливу при похибках аргументів. Для частоти 100 КГц, та $t_1 = 200^\circ\text{C}$ по спеціальній програмі при використанні ПК були отримані значення коефіцієнтів a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : $a_0 = 0,998$, $a_1 = 0,0000213$, $a_2 = -9,465 \times 10^{-8}$, $a_3 = 8,02 \times 10^{-10}$, $a_4 = 1,33 \times 10^{-13}$.

Висновки

Визначені шляхи вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення якості цементу за рахунок підвищення вірогідності вимірювального контролю температури t при випалюванні клінкеру. Отримані нові універсальні функції перетворення $N_t = f(\varphi_{\text{внт}})$ та $N_{yt} = f(\varphi_{\text{внт}})$ теплового трансформаторного вихорострумowego датчика (ТВД) з пробою портландцементного клінкеру, яка контролюється. Функції $N_t = f(\varphi_{\text{внт}})$ та $N_{yt} = f(\varphi_{\text{внт}})$ представляють собою залежності нормованих амплітуд N_t и N_{yt} від фазового кута зсуву $\varphi_{\text{внт}}$ теплового ТВД із пробою клінкеру. На основі цих функцій перетворення проведено дослідження методу вимірювального вихорострумowego контролю питомого електричного опору ρ_t та температури t в діапазоні від 20 до 150°C при використанні двох частотних діапазонів - від 1 до 20 КГц та від 1 до 1,5 МГц.

Приведені основні співвідношення, які описують вимірювальний контроль температури від 200 до 1000°C при імітації процесу випалювання клінкеру. Даний діапазон температур використовується в таких важливих зонах випалювальних агрегатів як зона випарування води, підігріву та дегідратації, зона декарбонізації и др. Проведений аналіз підвищення вірогідності контролю за рахунок використання методик визначення похибок вимірювання, а також застосування структурних методів в схемі включення теплового ТВД з пробою портландцементного клінкеру, що контролюється.

Науковою новизною проведених досліджень є запропонований алгоритм вимірювального контролю температури при реалізації двохпараметрових вихорострумowych методів, які використовуються в різних температурних діапазонах при імітації процесу випалювання клінкеру.

Практичне значення проведених досліджень полягає в тому, що підвищення вірогідності вимірювального контролю температури t дозволяє підвищити вірогідність контролю таких найважливіших параметрів, які використовуються при виробництві портландцементу, як температура витримки клінкеру, температура охолодження клінкеру в спеціальних холодильних установках, що дасть можливість підвищити міцність готової продукції.

Перспективи подальших досліджень полягають у підвищенні вірогідності вимірювального контролю температури зразків клінкеру в технологічному процесі за рахунок реалізації екстремальних електромагнітних методів неруйнівного контролю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. – Л.: Госстройиздат. – 1969. – 454с.
2. Алексеев Б.В. Технология производства цемента. – М.: Высшая школа. – 1980. – 323 с.
3. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. – К.: Техника. – 1981. – 150 с.
4. Себко В.П., Сомхиева О.С. Совместное определение радиуса и удельной электрической проводимости изделий дифференциальным электромагнитным методом // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 1998. – С. 134–137.
5. Горкунов Б.М., Сомхиева О.С., Ду Хуан Янг. Дифференциальный электромагнитный преобразователь с цилиндрическим проводящим изделием // Збірник наукових праць 2-ї

Міжнародної науково-техничної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 99)». – Харків: 1999. – Т1. – С. 220 – 223.

6. Себко В.В. Погрешности совместного измерения диаметра, удельного электрического сопротивления и температуры изделия в продольном магнитном поле // Луганськ: Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля. – 2002. – № 8. – С. 224–228.
7. Патент України на корисну модель № 18632. Безконтактний модифікований спосіб контролю параметрів немагнітних виробів сумісно з температурою /В.В Себко. – Бюл. № 11. – 2006.
8. Себко В.В. Вихретоковый контроль геометрических, электрических и температурных параметров немагнитных цилиндрических изделий // Харків: Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – № 4. – С. 85–89.